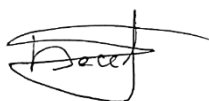


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Бессонов Александр Евгеньевич



ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАРЬЕРНОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА КАК ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Михайлов А.В.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТКАХ.....	11
1.1 Современные подходы к разработке открытых месторождений полезных ископаемых	11
1.2 Горные машины и оборудование открытых горных работ	15
1.3 Классификация и конструктивные особенности карьерных экскаваторов	18
1.4 Изменения эффективности эксплуатации карьерного экскаватора и его технического состояния от влияющих факторов.....	20
1.4.1 Горно-геологические и горнотехнические факторы	21
1.4.2 Климатические факторы.....	23
1.4.3 Качество подготовки забоя и горной массы.....	25
1.4.4 Техническое состояние экскаватора	28
1.4.5 Организация ведения горных работ	30
1.4.6 Эргатическая система	31
1.5 Выводы по главе 1	35
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА.....	37
2.1 Детерминированная модель времени рабочего цикла экскаватора с учетом эргатической системы.....	38
2.2 Анализ подходов к оценке профессиональной подготовки операторов	46
2.3 Разработка комплексного критерия оценки эффективности функционирования системы «оператор-машина» на основе временных и энергетических характеристик технологического процесса	50
2.4 Выводы по главе 2.....	55
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ	

ИМИТАЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРА КАРЬЕРНОГО ГУСЕНИЧНОГО ЭКСКАВАТОРА..... 59

3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований	60
3.2 Программа обучения операторов карьерного экскаватора ЭКГ-18р/20к на тренажёрном комплексе	61
3.3 Структура тренажёрного комплекса обучения операторов карьерного экскаватора ЭКГ-18р/20к.....	63
3.3.1 Функциональные возможности тренажёрного комплекса обучения операторов карьерного экскаватора ЭКГ-18р/20к.....	65
3.3.2 Информационно-диагностическая система тренажёрного комплекса обучения операторов карьерного экскаватора ЭКГ-18р/20к.....	69
3.3.3 Требования к оператору для обучения на тренажёрном комплексе.....	71
3.3.4 Методические и инструментальные средства контроля процесса обучения оператора.....	72
3.4 Методика проведения экспериментальных исследований на тренажёрном комплексе	73
3.4.1 Условия проведения экспериментальных исследований.....	75
3.4.2 Перечень контролируемых параметров.....	76
3.4.3 Распределение критических и некритических ошибок оператора	77
3.5 Методика обработки результатов экспериментов	78
3.6 Выводы по главе 3.....	78

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ ЭКГ-18Р/20К..... 80

4.1 Результаты исследования изменений основных параметров рабочего цикла в ходе обучения оператора.....	80
4.2 Результаты анализа достигаемых показателей эффективности использования карьерных экскаваторов на основе экспериментальных данных с использованием комплексного подхода	86

4.3 Результаты анализа методического подхода к оценке показателей квалификации операторов.....	89
4.4 Разработка программного обеспечения для расчета рациональных режимов работы карьерного электрического экскаватора.....	93
4.5 Практические рекомендации по применению тренажерного комплекса для повышения квалификации.....	96
4.6 Выводы по главе 4.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	102
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов диссертационного исследования	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	118
ПРИЛОЖЕНИЕ В Унифицированный экскаватор ЭКГ-18Р/20К	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Карьерный самосвал БелАЗ-75306	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Ведомость учета результатов заданий.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Перечень контролируемых ошибок оператора	124

ВВЕДЕНИЕ

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.

Целью работы является 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 научной 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:

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., Приложение А).

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 Международная научно-техническая конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека (г. Екатеринбург 2022 год); XXI Международная научно-техническая конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека (г. Екатеринбург 2023 год); 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 (пункты списка литературы № 13-18, 58, 100), 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 (Приложение Б).

Структура диссертации

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.

ГЛАВА 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТКАХ

1.1 Современные подходы к разработке открытых месторождений полезных ископаемых

Открытые горные работы, как одна из основных форм освоения минерально-сырьевых ресурсов, продолжают занимать ведущие позиции в структуре мировой и отечественной горнодобывающей промышленности. Метод открытой разработки применяется в случаях относительно неглубокого залегания полезных ископаемых и характеризуется высокой степенью технологической доступности, возможностью широкого применения крупногабаритного оборудования и высокой производственной мощностью. Однако при этом он предъявляет комплексные требования к организации горных работ, техническому оснащению предприятий, устойчивости производственного процесса и взаимодействию всех компонентов горнотранспортной системы.

На протяжении последних десятилетий наблюдается трансформация подходов к планированию и ведению открытых горных работ. Если ранее приоритет отдавался экстенсивному наращиванию производственных мощностей [14], то в современных условиях акцент смещается в сторону повышения эффективности и устойчивости производственного процесса. Это проявляется в стремлении к сокращению удельных затрат на вскрышные и добычные работы, стабилизации производительности техники, снижению простоев и незапланированных отказов оборудования, а также обеспечению более точного соответствия технологических решений геологическим и горнотехническим условиям.

Развитие открытых горных работ в настоящее время характеризуется системным подходом, в рамках которого добыча рассматривается не изолированно, а как совокупность взаимосвязанных технологических, организационных и человеческих факторов. Всё более значимым становится не только обеспечение физической возможности извлечения полезного ископаемого, но и достижение рационального баланса между производительностью, надёжностью техники,

квалификацией персонала, логистическими ограничениями и экологическими требованиями. Такой подход требует не просто модернизации оборудования, но и методологического переосмысления всей системы управления горными работами на всех этапах – от проектирования карьера до рекультивации отработанных участков.

Устойчивое развитие отрасли диктует необходимость совершенствования методов оценки эффективности эксплуатации машин и технологических схем, что, в свою очередь, требует формирования единой информационной среды, охватывающей как технико-экономические, так и производственные параметры. В результате вектор развития открытых горных работ ориентируется на повышение системной согласованности процессов, минимизацию влияния внешних дестабилизирующих факторов и интеграцию технических и управленческих решений в рамках целостного производственного контура.

Одним из определяющих направлений трансформации открытых горных работ выступает внедрение цифровых и автоматизированных технологий, позволяющих радикально повысить управляемость и адаптивность производственных процессов. Разработка и внедрение интеллектуальных систем мониторинга, цифровых моделей рельефа и недр, программ планирования вскрышно-добычных работ формируют новую производственную среду, основанную на управлении данными и интеграции всех звеньев горнотранспортного комплекса в единое информационное пространство.

Применение геоинформационных систем (ГИС), глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) и беспроводных каналов передачи данных обеспечивает возможность высокоточной привязки производственных операций к геопространственным координатам, что, в свою очередь, способствует снижению потерь, увеличению полезного объёма добычи и минимизации человеческих ошибок. Установка датчиков и телеметрических узлов на ключевые единицы оборудования позволяет фиксировать параметры их работы в реальном времени, обеспечивая обратную связь для диспетчерских систем, осуществляющих контроль и оперативное управление.

Автоматизированные системы диспетчерского управления на базе модулей предиктивной аналитики не только фиксируют фактические показатели производственного цикла, но и прогнозируют потенциальные отказы, что открывает возможности перехода к концепции технического обслуживания по состоянию [89]. Такая модель эксплуатации обеспечивает более высокий уровень готовности техники, снижает количество внеплановых простоев и оптимизирует загрузку ремонтных служб.

Наряду с этим, наметилась тенденция к созданию цифровых двойников объектов открытой разработки – виртуальных копий оборудования и процессов, синхронизированных с их физическими прототипами [27]. Эти системы позволяют осуществлять симуляционное планирование, визуализацию производственного потока, оценку альтернативных сценариев ведения работ, а также моделировать поведение сложных машин в условиях, приближённых к реальным. Таким образом, цифровизация становится не только инструментом автоматизации, но и основой для принятия обоснованных инженерных и управленческих решений.

Параллельно с цифровизацией и автоматизацией процессов возрастает значимость рационального использования минерально-сырьевой базы и соблюдения экологических ограничений, что отражает смещение отраслевых приоритетов в сторону устойчивого развития. Учитывая истощаемость легкоразрабатываемых месторождений, повышение глубины залегания рудных тел и ужесточение экологических норм, организация открытых горных работ всё в большей степени ориентируется на повышение коэффициента извлечения, сокращение потерь и загрязнений, а также оптимизация объёмов вскрышных работ.

С этой целью усиливается внимание к геолого-геотехническому моделированию, позволяющему более точно описывать структуру месторождений и адаптировать технологические решения к реальным условиям. Точные данные о литологической неоднородности, прочностных характеристиках пород и гидрогеологических особенностях формируют основу для проектирования оптимальных схем разработки, направленных на снижение удельных затрат, повышение стабильности откосов и снижение риска аварийных ситуаций.

Особое значение в современных условиях приобретает управление экологическими аспектами деятельности карьера, включая снижение пылеобразования, шумового воздействия, загрязнения вод и рациональное использование горного пространства. Внедрение технологий пылеподавления, применение специализированного навесного оборудования, замкнутые системы водоотлива и постоянный мониторинг выбросов стали обязательными элементами при проектировании и эксплуатации карьеров. В условиях близости населённых пунктов или особо охраняемых территорий подобные мероприятия не просто целесообразны, но и необходимы с точки зрения соблюдения законодательных требований и общественной приемлемости деятельности горнодобывающих предприятий.

Рационализация использования ресурсов касается не только природных объектов, но и технических средств. Повышение энергетической эффективности карьерных экскаваторов, оптимизация загрузки самосвалов, снижение холостых пробегов и внедрение систем энергосбережения напрямую влияют на удельные затраты и экологический след производства. Принципы «умной» логистики и синхронизации операций вскрыши, экскавации и транспортировки обеспечивают не только рост производительности, но и снижение нерационального расходования топлива, масла, электроэнергии и других ресурсов.

Прослеживается тенденция к интеграции показателей ресурсной эффективности в общую систему оценки результативности горных работ. Ориентиры смещаются от исключительно количественных характеристик к совокупности экономических, технических и экологических критериев, позволяющих сбалансированно оценить результативность производственного процесса. Таким образом, устойчивость и ресурсосбережение становятся неотъемлемыми элементами современной парадигмы открытого горного производства.

При этом, несмотря на все достижения в области автоматизации, ключевую роль в обеспечении стабильности, эффективности и безопасности технологического цикла продолжает играть человеческий фактор. Особенно это

актуально для звеньев, где управление остаётся в значительной степени ручным, как, например, в случае работы карьерных экскаваторов. От уровня подготовки оператора, его способности принимать обоснованные решения в условиях высокой производственной нагрузки и неопределённости зависят как производительность, так и эксплуатационная надёжность оборудования.

В современных условиях возрастает потребность в переходе от субъективных и формальных подходов к оценке квалификации к объективной, количественно обоснованной диагностике профессиональных навыков. Обучение на тренажёрах, имитирующих реальную производственную среду, а также использование систем мониторинга параметров работы оператора становятся важным направлением подготовки кадров. На основе накопленных данных становится возможным выявление характерных ошибок, отслеживание динамики освоения навыков и формирование индивидуальных рекомендаций.

Таким образом, современный подход к организации открытых горных работ требует комплексного учёта как технических, так и человеческих факторов. Надёжное функционирование производственной системы во многом определяется не только возможностями техники, но и уровнем квалификации обслуживающего персонала. Повышение объективности в оценке квалификации операторов и совершенствование системы их подготовки становится неотъемлемой частью стратегии повышения эффективности и устойчивости добычных процессов [19].

1.2 Горные машины и оборудование открытых горных работ

Разработка месторождений открытым способом остаётся приоритетной формой добычи твёрдых полезных ископаемых, обеспечивая высокий уровень экономической рентабельности за счёт относительной простоты вскрытия, высокой степени механизации и возможности масштабного применения тяжёлой техники. Основу технологического процесса составляет последовательность операций, охватывающая подготовку фронта работ, разрушение массива, экскавацию, транспортировку, складирование и рекультивацию нарушенных территорий. Для эффективного выполнения каждой из этих стадий требуется применение специализированных технических средств, обладающих высокой

надёжностью, производительностью и адаптивностью к разнообразным горно-геологическим условиям.

Технологический цикл открытой разработки начинается с организационно-подготовительных мероприятий, включающих расчистку площадок, устройство временной инфраструктуры и формирование устойчивых фронтов работ. После этого на подготовленных участках выполняются буровзрывные работы, целью которых является разрушение крепких пород с образованием кускового материала, пригодного для экскавации. На этом этапе используются самоходные и стационарные буровые установки, оснащённые современными системами навигации, позиционирования и контроля глубины. Высокоточное бурение, соответствующее геометрическим и энергетическим параметрам заряда, обеспечивает заданную кратность и направленность взрыва, снижает объём переуплотнённых зон и минимизирует разрушение полезного компонента.

Следующей стадией выступает экскавация разрушенного массива, на которой сосредоточены ключевые элементы горнотранспортной системы. На данном этапе осуществляются операции по черпанию, подъёму, перемещению и разгрузке горной массы, зачастую в условиях ограниченного пространства и переменной структуры забоя [11]. В этих условиях центральную роль играют карьерные экскаваторы, служащие не только основным средством добычи, но и важным звеном, формирующим энергетическую эффективность всего производственного потока. От точности позиционирования ковша, согласованности действий оператора и соблюдения рациональных режимов копания зависит загрузка автотранспорта, стабильность фронта и минимизация потерь полезного ископаемого.

Современный парк карьерных экскаваторов представлен широким ассортиментом машин – от универсальных гидравлических экскаваторов с высокой манёвренностью до мощных гусеничных и шагающих электрических экскаваторов, предназначенных для работы в условиях тяжёлых вскрышных работ. Каждая модель адаптирована под определённый тип горных пород, глубину разработки, требуемую производительность и особенности транспортной схемы. Инженерные

решения в конструкции рабочего оборудования, ходовой части и систем управления обеспечивают необходимую тяговую мощность, устойчивость на рабочем участке, точность позиционирования и минимальные потери при погрузке.

Экскавационные работы тесно связаны с этапом транспортировки. Наиболее распространённым средством транспортировки на открытых горных работах остаются карьерные самосвалы, характеризующиеся высокой грузоподъёмностью (от 30 до 400 тонн), надёжностью ходовой части и способностью работать в условиях пересечённого рельефа. Альтернативой или дополнением к ним в зависимости от условий могут выступать ленточные конвейеры, железнодорожные составы, а также тяжёлые скреперные установки. Организация взаимодействия между экскавационным и транспортным звеном требует точной координации действий и эффективной диспетчеризации, особенно в условиях многопоточности [52].

Дополнительные операции такие как планировка, перемещение отвальных пород, рекультивация и обеспечение устойчивости фронта – выполняются с помощью бульдозеров, грейдеров, фронтальных погрузчиков и прочей вспомогательной техники. Эти машины формируют геометрию рабочих площадок, обеспечивают подготовку новых участков и участие в технической рекультивации, возвращая нарушенные земли в пригодное состояние. Роль этой техники, хотя и вспомогательная, но крайне важная в обеспечении непрерывности и безопасности всего цикла.

Нельзя не отметить и возрастающую значимость информационно-диагностических систем, встраиваемых во многие современные машины. Датчики на базе CAN-шин, телеметрические модули, бортовые контроллеры и программные комплексы анализа данных позволяют в режиме реального времени отслеживать техническое состояние оборудования, параметры работы и качество выполнения технологических операций. На основе накопленных массивов данных принимаются решения о переводе машин в ремонт, изменении режимов работы или корректировке действий операторов [38].

Вся система машин и оборудования открытых горных работ подчинена принципу комплексной механизации, в которой эффективность одного звена не может быть оценена вне контекста всего производственного потока. В этом контексте особенно значима роль карьерных экскаваторов, как машин, находящихся в непосредственном контакте с горной породой и в значительной степени определяющих производительность, энергозатраты и технологическую надёжность предприятия. Именно поэтому в практике проектирования и эксплуатации особое внимание уделяется параметрам их работы, обучению операторов и совершенствованию методов оценки эффективности их применения.

1.3 Классификация и конструктивные особенности карьерных экскаваторов

Карьерные экскаваторы занимают центральное место в технологической цепочке открытых горных работ, обеспечивая выполнение операций по выемке и погрузке горной массы. Их роль в горнотранспортной системе выходит далеко за рамки простой функции черпания: экскаватор во многом определяет производительность участка, влияет на качество формирования забоя, эффективность загрузки автотранспорта и, в конечном счёте, на себестоимость добычи полезного ископаемого [43]. Учитывая это, особую актуальность приобретает вопрос классификации экскаваторов и анализа их конструктивных особенностей, оказывающих влияние на технологическую эффективность.

Классификация карьерных экскаваторов осуществляется по различным признакам: принципу действия рабочего органа, типу привода, способу передвижения, характеру рабочего цикла, мощности, массе и другим параметрам. Наиболее широко распространённым типом остаются одноковшовые экскаваторы циклического действия, сочетающие высокую универсальность с надёжностью при различных горно-геологических условиях. Они выполняют черпание, подъём, поворот и разгрузку материала в рамках одного непрерывного цикла, что обеспечивает чёткую управляемость процессом и адаптацию к условиям фронта работ.

В зависимости от типа привода экскаваторы делятся на электрические и гидравлические. Электрические экскаваторы, в частности, экскаваторы типа ЭКГ –

электрические карьерные гусеничные, широко применяются в крупных угольных и рудных карьерах за счёт высокой надёжности, мощности и возможности работы в тяжёлых условиях эксплуатации. Они характеризуются высокой долговечностью узлов, жёсткой кинематикой рабочего оборудования и устойчивой работой при больших нагрузках.

Гидравлические экскаваторы, в свою очередь, отличаются компактностью, мобильностью и высокой точностью управления. Они предпочтительны при разработке нерудных месторождений, в условиях ограниченного пространства или необходимости высокой манёвренности. Модульная конструкция, возможность быстрой замены рабочего оборудования, плавность управления и точное следование заданной траектории обеспечивают широкий спектр применения, в том числе на вскрышных и вспомогательных работах.

По способу передвижения экскаваторы подразделяются на гусеничные, шагающие, полноповоротные и стационарные. Гусеничный ход наиболее распространён и обеспечивает хорошее сцепление с поверхностью, что особенно важно при работе на неровных площадках и в условиях сложного рельефа. Шагающие экскаваторы применяются преимущественно на вскрыше, особенно при значительном объёме перемещаемой породы, когда необходима большая рабочая зона и независимость от дорожных условий.

Конструктивная схема экскаватора включает в себя ряд ключевых компонентов: рабочее оборудование (ковш, рукоять, стрела), силовую установку, механизмы подъёма и поворота, кабину оператора, систему управления и базовое шасси. В работах [44, 45] подробно разобрана кинематика совместной работы механизмов. Основные конструктивные параметры, такие как вместимость ковша, радиус копания, максимальная высота разгрузки, усилие копания и геометрия рабочего органа, подбираются в зависимости от физико-механических свойств горной массы, требуемой производительности и условий карьера.

Ковши карьерных экскаваторов имеют различную форму и объём (обычно от 4 до 40 м³ и более), в зависимости от назначения машины. Форма ковша, расположение зубьев и угол врезания влияют на коэффициент заполнения,

энергозатраты и износ [61]. Конструкции современных ковшей оптимизируются по принципам объёмной геометрии и сопротивления разрушению, что позволяет добиться максимального коэффициента наполнения при минимальных потерях.

Отдельного внимания заслуживают системы управления, которые эволюционировали от механических и электромеханических схем к цифровым и адаптивным. Интеграция электронных блоков, датчиков нагрузки, систем стабилизации и ограничителей движения позволяет повысить безопасность, точность и надёжность операций. Современные экскаваторы также оснащаются системами мониторинга технического состояния, а в ряде моделей реализована возможность дистанционного или полуавтоматического управления.

Карьерные экскаваторы представляют собой высокотехнологичные и конструктивно разнообразные машины, приспособленные к широкому спектру условий эксплуатации. Их классификация и конструктивные особенности определяют возможности адаптации к геолого-технической ситуации, а также эффективность функционирования в составе горнотранспортного комплекса. Глубокое понимание принципов действия и конструктивных параметров экскаваторов необходимо для выбора оптимального оборудования, организации рационального режима работы и последующей оценки квалификации операторов.

1.4 Изменения эффективности эксплуатации карьерного экскаватора и его технического состояния от влияющих факторов

Разработка эффективных подходов к управлению эксплуатацией карьерных экскаваторов невозможна без всестороннего анализа комплекса факторов, определяющих их работоспособность. Карьерный экскаватор цикличного действия функционирует в условиях сложной производственной среды, где на его техническое состояние и производительность одновременно воздействуют как внешние, так и внутренние факторы. На рисунке 1.1 представлена обобщённая схема, отражающая основные группы факторов, влияющих на работоспособность и производительность карьерного электрического экскаватора. Подобная классификация позволяет не только систематизировать внешние и внутренние воздействия, но и выделить направления для последующего анализа.



Рисунок 1.1 – Факторы, влияющие на работоспособность и производительность карьерного экскаватора цикличного действия (составлено автором)

1.4.1 Горно-геологические и горнотехнические факторы

Условия разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом являются исключительно вариативными и в значительной степени определяют технические, организационные и эксплуатационные параметры применения горного оборудования. Среди совокупности влияющих факторов особое значение имеют горно-геологические и горнотехнические условия, которые формируют исходную производственную среду для функционирования экскаваторов и сопряжённого с ними транспорта.

Одним из определяющих факторов, оказывающих влияние на работу карьерного экскаватора при разработке горных пород, выступают физико-механические характеристики разрабатываемого массива. Прежде всего следует отметить твердость породы, от которой напрямую зависит необходимое усилие резания, уровень износа рабочего оборудования и продолжительность рабочего цикла, что подтверждается данными о снижении производительности при росте прочности породы [77, 96]. Повышенная твердость требует более мощного привода, увеличивает продолжительность цикла копания и, как следствие, снижает общую производительность экскаватора.

Также немаловажным параметром выступает слоистость породы, определяющая направление и взаимное расположение пластов. В случаях, когда линия реза экскаватора пересекает пласты под углом, может возникать нарушение устойчивости забоя и осыпание, а также ухудшение условий резания. Это влечет за собой снижение точности экскавации, перерасход энергии и увеличенные потери рабочего времени на стабилизацию положения машины и коррекцию траектории копания.

Рыхлость и влажность породы, в свою очередь, влияют на усилие входа зубьев ковша в забой, на сцепление породы с рабочим органом и на возможность налипания материала. Повышенная влажность и пластичность могут снижать сопротивление, в то время как неравномерная фрагментация, связанная с геотехническими условиями, приводит к снижению коэффициента использования вместимости ковша [93, 98, 111].

Следует отметить, что влияние перечисленных характеристик породы проявляется не только в снижении производительности, но и в росте энергоёмкости выполняемых операций, в увеличении повторяемости циклов (за счёт вынужденных корректировок) и в росте вариативности значений показателей эффективности. Все эти аспекты требуют учёта при проектировании горных работ, выборе оборудования и построении программ обучения операторов. Правильный выбор типа экскаватора в зависимости от категории пород и характеристик массива позволяет минимизировать потери времени на зачерпывание и снизить вероятность

отказов рабочего оборудования [77, 90, 121]. Наряду с этим, от геомеханических свойств массива зависит не только производительность, но и общая надёжность системы, как рассматривало в трудах по теории и эксплуатации экскаваторов [33, 34, 51].

Также в условиях сложной горно-геологической обстановки возрастает роль квалификации оператора. Именно он принимает решения в реальном времени о направлении копания, глубине заглубления ковша, скорости перемещения и величине усилия. Чем выше изменчивость горной массы, тем выше требования к его подготовке, способности адаптироваться к среде и применять различные режимы работы машины.

Горно-геологические и горнотехнические факторы представляют собой сложную совокупность внешних условий, определяющих степень нагруженности карьерных экскаваторов, эффективность их применения, уровень эксплуатационной надёжности и производственной безопасности. Их детальный анализ на этапе проектирования, а также оперативный учёт в процессе эксплуатации являются необходимыми условиями рационального использования техники в условиях открытых горных работ.

1.4.2 Климатические факторы

Климатические условия, в которых осуществляется эксплуатация карьерных экскаваторов, оказывают многостороннее влияние на их техническое состояние, надёжность работы и общую производственную эффективность. Температурный режим, влажность, осадки, ветер и другие атмосферные воздействия формируют внешнюю среду, с которой вынуждено взаимодействовать как само оборудование, так и обслуживающий персонал.

В условиях отрицательных температур происходит промерзание горной массы, в результате чего существенно возрастает её прочность и сопротивление резанию. Это приводит к снижению производительности экскаватора и повышению износа рабочего оборудования, в особенности зубьев ковша. Промерзшая порода требует увеличенных усилий на копание, вызывает дополнительные вибрационные и ударные нагрузки, что сказывается как на

ресурсе техники, так и на утомляемости оператора. При низких температурах физико-механические свойства горной массы изменяются: происходит смерзание отдельных фракций, увеличение сцепления между частицами, что затрудняет процесс зачерпывания, повышает сопротивление ковшу и снижает коэффициент его заполнения [73, 56, 127].

Кроме того, эксплуатация экскаваторов при низких температурах предъявляет особые требования к используемым конструкционным материалам. Работа в условиях экстремальных температур усиливает риск разрушения металлоконструкций, снижает ударную вязкость стали, увеличивает вероятность хрупких разрушений, особенно в силовых элементах рабочих органов [55, 69, 128]. В этих условиях особенно уязвимыми становятся сварные швы, элементы рабочих органов и несущие конструкции. Для обеспечения надёжной и безопасной работы в холодном климате необходимо применение хладостойких сталей, обладающих повышенной ударной вязкостью и способных сохранять прочностные характеристики при температуре до -40°C и ниже [127]. Такие материалы позволяют снизить вероятность разрушения при резких изменениях нагрузок, что особенно актуально при копании промёрзших пород и работе в условиях высокой вибрации. Также в условиях севера карьерные экскаваторы сталкиваются с повышенным уровнем отказов, снижением ресурса рабочих органов и систем из-за температурных перепадов и обмерзания узлов [31, 54]. При выборе экскаваторов для работы в экстремальных климатических условиях учитываются не только производственные характеристики, но и степень адаптации техники к холоду: наличие подогревов, защита от обмерзания, термозащита кабины и узлов [106, 87].

Наряду с этим, в условиях чередования температур около 0°C , характерных для переходных сезонов, наблюдается налипание породы на ковш, зубья и другие элементы рабочего оборудования. Это особенно актуально для глинистых, влажных и мелкодисперсных материалов. Налипание снижает коэффициент наполнения ковша, затрудняет разгрузку и увеличивает продолжительность каждого цикла. Кроме того, в случае замерзания налипшей массы наблюдаются сбои в разгрузке ковша и необходимость остановки техники для ручной очистки.

Высокие температуры, напротив, способствуют снижению влажности породы, улучшая её сыпучесть и облегчая зачерпывание. Однако при этом усиливается запылённость рабочей зоны, что негативно сказывается на условиях труда оператора. В жаркий период также возможен перегрев отдельных узлов экскаватора, особенно в сочетании с повышенной нагрузкой.

Относительная влажность и осадки напрямую влияют на состояние рабочей площадки. Повышенная влажность горной массы затрудняет зачерпывание и способствует её налипанию на рабочие органы, в том числе на ковш и зубья, что снижает эффективность цикла экскавации [94]. В условиях дождя или снега снижается устойчивость техники, особенно на уклонах.

Ветровая нагрузка при определённых скоростях может оказывать влияние на точность и безопасность операций, особенно при работе с навесным грузом или в условиях ограниченной видимости. В частности, боковой ветер способен вызывать раскачивание стрелы и дестабилизацию ковша при разгрузке, что влечёт за собой риски для оборудования и персонала [59].

Комплексное влияние температуры, влажности и ветровой нагрузки определяет как уровень механических нагрузок на оборудование, так и надёжность систем автоматики, гидравлики и электрооборудования [30, 68].

1.4.3 Качество подготовки забоя и горной массы

Результативность работы экскаватора в значительной степени обусловлена условиями, в которых осуществляется процесс экскавации. Одним из определяющих элементов этих условий выступает качество подготовки забоя и физическое состояние горной массы. Именно от характеристик массива, сформированного в результате буровзрывных и иных подготовительных работ, зависит устойчивость рабочего цикла, величина зачерпываемого объёма, равномерность нагрузки на рабочее оборудование и безопасность производственного процесса. Отмечается также связь между условиями подготовки забоя и долговечностью металлических конструкций экскаватора [97].

Наиболее значимым показателем неудовлетворительной подготовки забоя является выход негабарита – крупных блоков породы, превышающих допустимый

размер для эффективного зачерпывания ковшем. Появление негабарита обусловлено, как правило, нарушением параметров буровзрывных работ: недостаточной плотностью сетки скважин, неравномерным заряданием или ошибками в выборе характеристик взрывчатых веществ. Негабариты затрудняют загрузку, вызывают неполное заполнение ковша, вынуждают оператора к дополнительным манёврам и нередко требуют применения вспомогательной техники (гидромолота, вторичного взрывания). В результате, цикл работы экскаватора нарушается, возрастает время простоя, а эффективность резко снижается. Как показано в ряде работ, именно оптимизация параметров взрывных работ позволяет добиться требуемой фрагментации и, соответственно, устойчивости режима экскавации [85, 86, 88].

При этом проблема негабарита отражает не только особенности породы, но и качество организации подготовительных процессов: от точности бурения до соблюдения проектной глубины и равномерности разрушения массива. Повышенный выход негабарита особенно критичен в условиях поточной технологии с ограниченным временем погрузки, где каждая задержка нарушает синхронизацию с транспортом и провоцирует простой автосоставов.

Наряду с этим, важное значение имеет равномерность кускового состава подготовленной горной массы. Даже при допустимых размерах фрагментов, чередование крупных и мелких включений создаёт неравномерное сопротивление при копании, что затрудняет стабильную работу оборудования и снижает коэффициент заполнения ковша [10, 81, 110], также снижая надёжность оборудования [63]. В таблице 1.1 приведены значения коэффициента наполнения ковша экскаватора, основанные на фактических условиях работы [83]. Кусковатость непосредственно влияет на коэффициент заполнения ковша: при его снижении за один цикл извлекается меньшее количество полезной массы при тех же энергозатратах. В результате уменьшается объёмная производительность машины и возрастает удельный расход энергии на единицу добычи. Кроме того, фрагментированная структура массива усложняет процесс зачерпывания, поскольку зубья ковша встречают переменное сопротивление, что затрудняет

равномерное наполнение и может вызывать дополнительную вибрационную нагрузку на оборудование.

Таблица 1.1 – Коэффициент заполнения ковша экскаватора [83]

Вид грунта	Коэффициент наполнения ковша
Рыхлый	
Смешанные влажные грунты	0,95-1,00
Однородные грунты размером частиц, мм	
< 3	0,95-1,00
– 3-9	0,90-0,95
– 12-20	0,85-0,90
> 24	0,85-0,90
Взорванная порода	
Хорошо взорванная (малой крупности)	0,80-0,95
Средне взорванная (средней крупности)	0,75-0,90
Плохо взорванная (большой крупности)	0,60-0,75
Другие	
Каменно-грунтовые смеси	1,00-1,20
Влажный суглинок	1,00-1,10
Почва, валуны, корни	0,80-1,00
Цементированные грунты	0,85-0,95

Дополнительное значение имеют геометрические параметры уступов – их высота, угол залегания, крутизна откосов [99, 103]. При чрезмерно высоких уступах или недостаточной ширине рабочих площадок ограничивается пространство для маневров, усложняется позиционирование экскаватора, увеличивается радиус поворота, а в отдельных случаях нарушается устойчивость техники. Снижается точность подачи ковша, возрастают холостые траектории, искажается направление силового воздействия при копании [101]. Всё это не только увеличивает продолжительность рабочего цикла, но и снижает эффективность эксплуатации оборудования.

Таким образом, качество подготовки забоя – это не только геометрические и физические характеристики фронта работ, но и степень его соответствия возможностям и параметрам конкретной машины. Минимизация выхода негабарита, обеспечение равномерного кускового состава, соблюдение проектной геометрии уступа и стабильность физико-механических свойств массива являются необходимыми условиями для эффективной и безопасной работы экскаватора.

1.4.4 Техническое состояние экскаватора

Для поддержания устойчивой работы карьерных экскаваторов в условиях интенсивной эксплуатации необходимо не только своевременно устранять возникающие неисправности, но и применять обоснованную систему технического обслуживания и ремонта (ТОиР), соответствующую специфике работы тяжёлого горного оборудования. На практике по сей день широко используется модель технического обслуживания по наработке до отказа. В рамках этого подхода вмешательство производится только после фактического выхода узла из строя, без предварительной диагностики и контроля. Несмотря на кажущуюся простоту и экономичность, данная стратегия не позволяет гарантировать надёжную и бесперебойную работу экскаватора. Внеплановые поломки при таком подходе зачастую сопровождаются значительными простоями, перераспределением техники, необходимостью срочного ремонта, а также повышенными затратами на восстановление оборудования и утратой части производственного потенциала [95].

Планово-предупредительная система технического обслуживания основана на выполнении регламентных работ через строго определённые интервалы времени или наработки, вне зависимости от текущего технического состояния оборудования [3]. Такой подход позволяет систематизировать обслуживание, сократить вероятность незапланированных отказов и обеспечить стабильный уровень готовности оборудования. Однако его универсальность одновременно является и ограничением: при высоких нагрузках и изменяющихся условиях эксплуатации, характерных для открытых горных работ, интервалы обслуживания, рассчитанные по среднестатистическим данным, не всегда отражают реальное состояние машины. Это может приводить как к преждевременной замене ещё

работоспособных узлов, так и к пропуску скрытых дефектов, развивающихся быстрее, чем предполагает регламент.

Альтернативой выступает система технического обслуживания по состоянию, при которой решения о проведении работ принимаются на основе фактического анализа технических параметров машины [114]. Такой подход требует оснащения экскаватора датчиками и средствами сбора информации, обеспечивающими контроль за состоянием ключевых узлов: приводов, гидросистем, ходовой части, опорно-поворотного устройства и др. Своевременное выявление отклонений – таких как рост вибраций, перегрев, снижение давления или отклонения в потреблении энергии – позволяет проводить вмешательство до возникновения незапланированного отказа, избегая внеплановых простоев и повышая эффективность эксплуатации.

Наиболее перспективным направлением развития ТОиР считается предиктивное техническое обслуживание, при котором данные с машин анализируются с использованием математических моделей, машинного обучения и алгоритмов прогнозирования [4]. Это позволяет не только фиксировать текущее состояние, но и с высокой вероятностью предсказывать момент наступления отказа, формируя по-настоящему адаптивный график обслуживания. Предиктивный подход особенно эффективен в условиях массовой эксплуатации оборудования с централизованной системой мониторинга, где он обеспечивает баланс между надёжностью, экономичностью и производственной ритмичностью.

На практике же наиболее целесообразным решением для карьерной техники является смешанная система технического обслуживания, сочетающая элементы планово-предупредительной схемы с механизмами оценки технического состояния. Такой подход позволяет сохранять предсказуемость и управляемость ремонтной службы, одновременно учитывая реальные условия эксплуатации и динамику износа. Интеграция цифровых платформ, телеметрии и автоматизированной диагностики в процессы ТОиР экскаваторов обеспечивает надёжную базу для реализации смешанных моделей, повышая уровень

технической готовности оборудования и снижая совокупные затраты на его содержание [5].

1.4.5 Организация ведения горных работ

Даже при высокой технической готовности оборудования и квалифицированности персонала недостатки в организации рабочего процесса могут существенно снизить производительность, привести к простоям, нарушению рабочего цикла и избыточным расходам ресурсов. Эффективность ведения горных работ во многом определяется технически обоснованной организацией взаимодействия экскаватора и автотранспорта, что было отмечено в работах по эксплуатации подъёмно-транспортных машин [64].

Одним из определяющих организационных факторов является согласованность действий между экскаваторным и транспортным звеньями. Несвоевременная подача автосамосвалов к фронту работ, дефицит транспортных единиц или их несоответствие плановому графику погрузки приводят к вынужденным простоям экскаватора. Такие простои нарушают структуру рабочего цикла, снижают эффективность эксплуатации оборудования. Анализ процессов распределения транспортных средств на открытых работах также подчёркивает важность учета вероятностей простоев экскаваторов [120].

Значительное влияние оказывает и размещение экскаватора на уступе. Нарушения в планировке рабочего пространства, ограниченная манёвренность, несогласованность между положением экскаватора и маршрутом транспорта создают дополнительные затруднения при выполнении операций. В частности, чрезмерные углы поворота платформы, необходимость многократного изменения позиции ковша или ограничения в зоне безопасности увеличивают продолжительность рабочего цикла и усиливают износ механизмов. Эти аспекты необходимо учитывать при выборе оборудования и проектировании схем вскрыши [84].

Кроме того, важную роль играет правильное определение объёма и последовательности вскрышных и очистных работ. Несвоевременное удаление негабарита, слабая очистка оттаявшей или размытой породы, а также нарушение

очередности разработки блоков могут вызывать трудности при формировании забоя и затруднять доступ к рабочей зоне, снижая тем самым эффективность экскавации.

Нарушения в логистике и снабжении, такие как перебои в доставке горюче-смазочных материалов и запасных деталей, недостаток технического персонала для обслуживания, неоперативное устранение мелких неисправностей – всё это в совокупности формирует негативный фон, на котором даже высокопроизводительное оборудование не может реализовать свой потенциал в полном объёме [72].

Следует отметить точность соблюдения графиков, координации действий дежурных бригад, эффективного проведения оперативных совещаний и регламентированного документооборота. Несоблюдение этих условий нарушает преемственность смен, увеличивает длительность переналадок и затрудняет оперативное управление производственным процессом.

Организация горных работ выступает как интегрирующий фактор, объединяющий технические, кадровые и логистические компоненты. Любое несоответствие в этой системе приводит к каскадным последствиям, снижающим эффективность не только экскаватора, но и всей технологической цепочки. Рациональное управление организационными аспектами позволяет не только повысить производительность, но и продлить ресурс техники, снизить эксплуатационные издержки и обеспечить устойчивость горного производства.

1.4.6 Эргатическая система

Эргатическая система представляет собой человеко-машинный комплекс, в котором эксплуатационная эффективность определяется согласованностью взаимодействия между оператором и техническим устройством. В применении к карьерным экскаваторам речь идёт о функциональной связке «человек–машина», где результат работы напрямую зависит от уровня квалификации оператора и его способности реализовать потенциал машины при выполнении технологических операций [13, 74]. Как показано в работе [109], даже при наличии технических решений по демпфированию колебаний и снижению вибрационных нагрузок

важнейшую роль продолжает играть поведение оператора, от которого зависит устойчивость и эффективность функционирования системы в динамически сложных условиях.

Рассмотрение экскаватора как элемента эргатической системы позволяет учитывать не только конструктивные и энергетические параметры машины, но и качество управления, стабильность выполнения операций, согласованность действий. Такой подход служит основой для разработки объективных методов оценки квалификации машинистов и совершенствования подготовительных процессов, включая тренажёрную отработку и сопровождение на этапе адаптации к реальным условиям эксплуатации [80].

Актуальность рассмотрения эргатической системы в горной технике подтверждается данными о высокой вариативности производительности оборудования при разных операторах. Как показано в ряде исследований, включая сравнительный анализ производственных показателей в добыче угля, при использовании однотипных экскаваторов расхождения в суточной выработке, обусловленные исключительно качеством управления, достигают 30-40 % [102]. При этом сами технические параметры машин, условия забоя и объём плановых задач оставались неизменными. Это свидетельствует о том, что квалификация машиниста и его способность эффективно взаимодействовать с машиной оказывают определяющее влияние на эксплуатационные показатели.

В ряде исследований, посвящённых оценке эффективности эксплуатации карьерных гусеничных экскаваторов, производится классификация машинистов по стажу работы и анализ зависимости между квалификацией оператора, производительностью и наработкой оборудования до отказа [20, 41, 42]. В частности, в работе к.т.н. Шарипова Р.Х. была рассмотрена наработка на отказ рабочих органов экскаватора в зависимости от стажа машиниста и представлена в таблице 1.2. Установлено, что характер управления техникой в процессе экскавации горной массы варьируется в зависимости от профессионального опыта оператора. Менее опытные машинисты склонны к неравномерному темпу ведения операций и частым отклонениям от оптимальных параметров движения ковша, что

формирует дополнительные динамические нагрузки на конструктивные элементы машины.

Таблица 1.2 – Приведенное число циклов нагружения рукояти [70]

Наименование	Стажевые группы машинистов, лет		
	Менее 5	5-10	Более 10
Приведенное число циклов нагружения, ед	49000	169000	294000
Объем горной массы, тыс. м ³	22	745	1310
Фактическое число циклов экскавации, ед	48500	165000	290000
Фактический объем горной массы, тыс. м	223	762	1325

Характерным примером практического влияния эргатической, представленном в исследовании [17], составляющей на надёжность карьерной техники является серия отказов рабочих органов экскаваторов ЭКГ-18Р, эксплуатируемых на Эльгинском месторождении. В течение трёх месяцев из-за излома балок рукояти было выведено из эксплуатации шесть машин. Проведённые прочностные расчёты не выявили конструктивных дефектов, а сами поломки происходили в идентичных нетипичных местах, что позволило исключить перегрузку из-за проектных просчётов (рисунок 1.2). Одним из основных факторов, обусловивших возникновение аварийных ситуаций, признаны действия операторов, в том числе несанкционированное изменение параметров работы оборудования и неадекватное управление силовыми нагрузками. Данный случай демонстрирует, что недостаточное внимание к системе «человек-машина» может приводить к серьёзным эксплуатационным потерям даже при корректной инженерной реализации конструкции. Это подчёркивает необходимость внедрения автоматизированных систем регистрации и анализа действий операторов, позволяющих своевременно выявлять рискованные режимы эксплуатации и адаптировать систему технического обслуживания и ремонта с учётом эргатической составляющей.

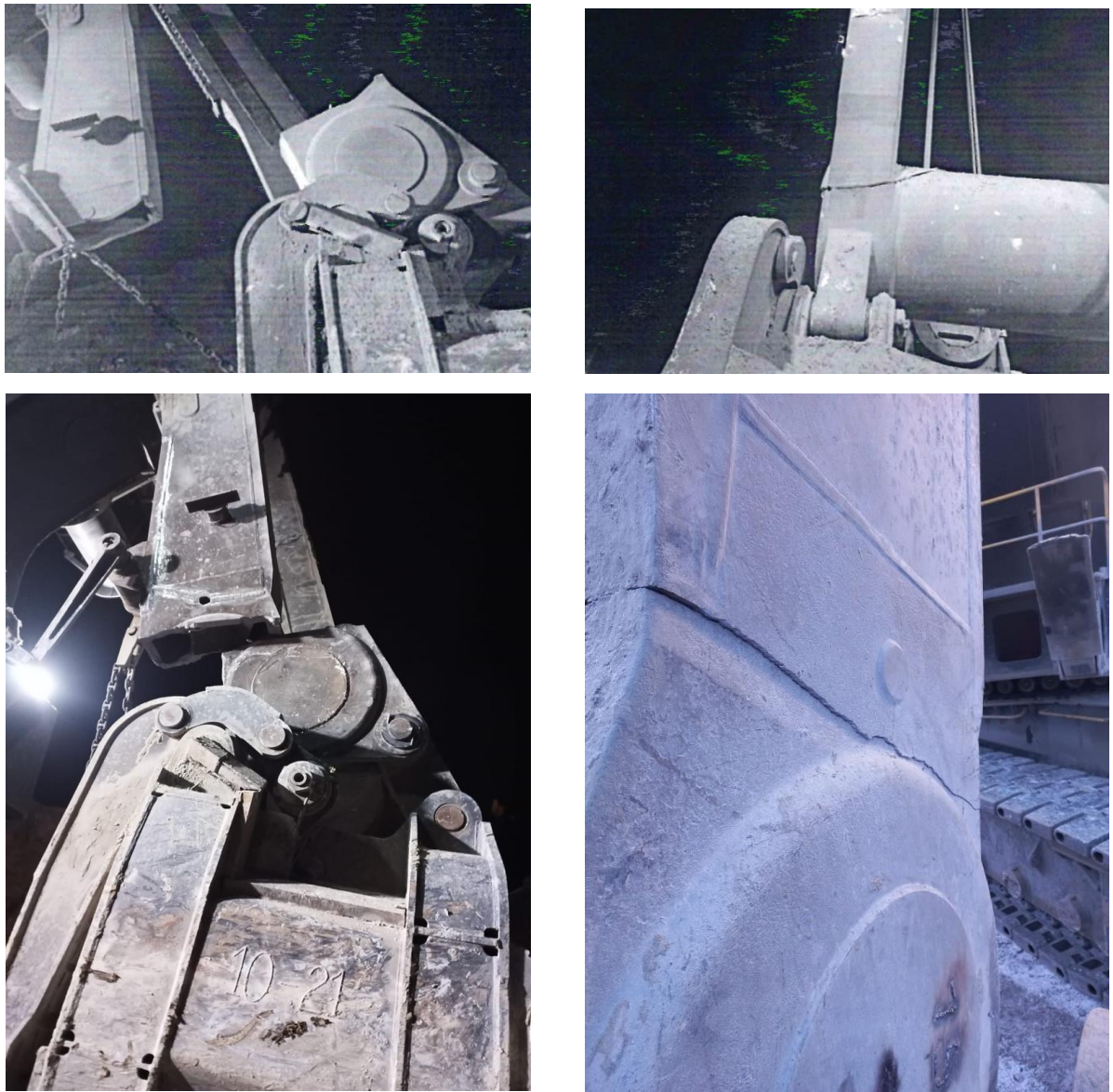


Рисунок 1.2 – Излом и трещинообразование балок рукояти ЭКГ-18Р (составлено автором)

Таким образом, эргатическая система оказывает существенное влияние на надёжность и эффективность эксплуатации карьерного экскаватора. Профессиональные навыки и действия оператора напрямую связаны с характером нагружения основных узлов машины, что отражается на ресурсе оборудования и частоте отказов [44, 71]. Анализ практических ситуаций показывает, что при одинаковых технических условиях различия в стиле управления могут приводить к значительным отклонениям в показателях наработки на отказ. Это подтверждает необходимость повышения требований к подготовке машинистов, а также

внедрения инструментов наблюдения и анализа их работы в рамках общей системы управления эксплуатацией.

1.5 Выводы по главе 1

Проведённый анализ современного состояния эксплуатации оборудования при открытых горных работах позволил выделить ключевые технические и организационные особенности, определяющие эксплуатационную эффективность карьерных экскаваторов. Рассмотрены современные подходы к освоению месторождений, охарактеризованы виды и функциональные возможности применяемого оборудования, с акцентом на конструктивные особенности и роль экскаваторов в технологическом процессе. Установлено, что на эффективность и надёжность эксплуатации экскаваторов значительное влияние оказывают как горно-геологические и горнотехнические условия, так и факторы, связанные с организацией производства, техническим состоянием машин, уровнем управления и качеством подготовки забоя.

Особое внимание уделено рассмотрению эргатической системы как ключевого звена, определяющего согласованность функционирования человека и техники. Выявлено, что при увеличении конструктивной сложности экскаваторов возрастает потребность в высококвалифицированном управлении, а также в использовании более совершенных подходов к оценке и развитию профессиональных навыков операторов. Несмотря на широкую представленность вопросов надёжности и производительности в научной литературе, именно аспекты, связанные с взаимодействием машиниста и оборудования, остаются недостаточно проработанными. Проведённый анализ подтверждает актуальность дальнейшего исследования параметров работы карьерного экскаватора как эргатической системы, направленного на разработку и обоснование методик повышения эффективности управления оборудованием за счёт совершенствования подготовки операторов и использования комплексных критериев оценки их квалификации.

В связи с этим для достижения поставленной в работе цели необходимо решение следующих задач:

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.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

По мере того, как горнодобывающая отрасль стремительно развивается и переключается на освоение более глубоких и объёмных рудных горизонтов, горное машиностроение ориентируется на выпуск всё более мощного оборудования, рассчитанного на экстенсивное наращивание объёмов экскавируемой массы за счёт повышения единичной производительности. Увеличение энергетической оснащённости машин сопровождается ростом их себестоимости, поэтому любые остановки, вызванные поломками или нерациональным режимом работы, приводят к существенным экономическим потерям для предприятия. В этих условиях карьерные электрические экскаваторы по-прежнему играют ключевую роль в выемке горной массы и погрузочно-транспортных процессах. С одной стороны, данный вид оборудования представляет собой высокотехнологичные комплексы, оснащённые независимыми приводами поворота, подъёма и напора, системами бортовой диагностики и встроенными средствами телеметрии. С другой – потенциал их использования напрямую зависит от человеческого фактора, а именно – от уровня сформированности навыков, устойчивости внимания и готовности оператора к управлению сложным многофункциональным оборудованием [32, 47].

В соответствии с концепцией эргатической системы «человек-машина» эксплуатационная эффективность экскаватора определяется не изолированными техническими или организационными показателями, а их целостным взаимодействием. Как показывают результаты фундаментальных и прикладных исследований, именно согласованность действий оператора с динамическими возможностями исполнительных органов позволяет реализовать заложенный конструкторами производственный потенциал техники, тогда как несбалансированное взаимодействие приводит к росту простоев, перерасходу энергии и преждевременному износу агрегатов [79, 105, 107]. При этом, несмотря на значительный объём работ, посвящённых совершенствованию конструкций

экскавационного оборудования, методические вопросы комплексного учёта эргатического фактора всё ещё остаются недостаточно разработанными.

Таким образом, надёжная эксплуатация карьерного экскаватора в реальном горнотехническом контексте должна рассматриваться сквозь призму целостного взаимодействия человека и техники. Данное положение обуславливает необходимость создания формализованной теоретической базы, способной описывать как механическую часть рабочего цикла, так и влияния субъективных факторов, определяющих характер воздействия навыков оператора. Исходя из этого, главная цель настоящего раздела диссертации – представить логически стройное и математически обоснованное описание параметров функционирования эргатической системы экскаватора, пригодное для последующей верификации на основе экспериментальных данных и внедрения в практику производственного контроля.

В совокупности изложенные предпосылки подчёркивают как научную, так и прикладную значимость дальнейшего исследования эргатической системы карьерного экскаватора. Достижение заявленной цели позволит не только расширить теоретическое понимание взаимодействия «оператор-машина», но и заложить основу для практических решений, направленных на повышение надёжности оборудования, сокращение производственных затрат и рост общей эффективности горнодобывающих предприятий.

2.1 Детерминированная модель времени рабочего цикла экскаватора с учетом эргатической системы

В настоящем исследовании детерминированная математическая модель рабочего цикла карьерного экскаватора представляет собой совокупность функциональных зависимостей, в которой каждой элементарной операции (копание, подъём, поворот, опускание, выгрузка) соответствует однозначно определяемая пара «время – энергия». Все входные параметры модели – конструктивные характеристики машины и горно-геологические условия – задаются фиксированными значениями; при их неизменности результаты расчёта остаются идентичными. Тем самым модель принципиально отличается от

стохастических и имитационных подходов, опирающихся на случайные величины, и предоставляет нормативно-репрезентативную оценку длительности рабочего цикла. Представленная формулировка обеспечивает единое репрезентативное значение длительности цикла, и одновременно допускает введение уточняющих коэффициентов, количественно характеризующих влияние человеческого фактора.

Первые попытки формализовать рабочий цикл карьерного гусеничного экскаватора относятся к работам профессора Н. Г. Домбровского, который в своих исследованиях исходил из предположения о высокой квалификации машиниста и идеальной согласованности действий всех приводов [34]. Исходная схема, вошедшая в учебники и нормативные методики, широко применяется при паспортизации машин и расчёте производительности карьеров. Тем не менее, анализе она демонстрирует принципиальное упрощение, главным образом касающееся квалификации оператора – совмещение фаз поворота платформы и опускания ковша при прямом и обратном ходе.

На рисунке 2.1 представлены траектории движения ковша, рассчитанные по данной методике. Ковш перемещается из точки O_1 – у начала забоя – в точку O_2 , осуществляя копание и подъём горной массы. Далее, без остановок, начинается одновременный поворот платформы и опускание ковша (сегмент $O_2 \rightarrow O_3$), завершающееся разгрузкой в точке O_3 в кузов автосамосвала. Возврат выполняется зеркально: из точки O_3 ковш единовременно опускается, и платформа поворачивается обратно к забою, замыкая цикл в точке O_1 .

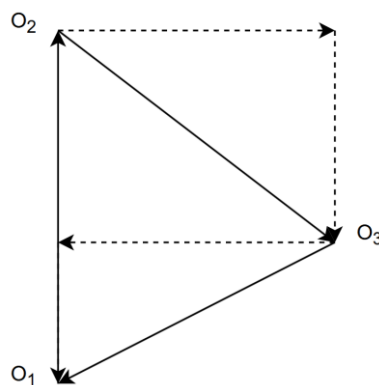


Рисунок 2.1 – Траектория движения ковша экскаватора: O_1 – точка начала копания; O_2 – точка окончания копания; O_3 – точка выгрузки материала в кузов самосвала (составлено автором)

Таким образом, можно сказать, что в данной модели рассматривается оператор с высоким стажем и большим опытом работы, позволяющие ему совмещать данный вид операций и не учитывать их последовательность. Математическая модель времени рабочего цикла при таком рассмотрении принимает следующий вид (1):

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

где $t_{\text{кп}}$ – суммарное время подъёма и копания горной массы, с;

$t_{\text{пов.с}}$ – время поворота платформы и опускания ковша к самосвалу совмещенное, с;

$t_{\text{в}}$ – время выгрузки ковша, с;

$t_{\text{пов.х.с}}$ – время поворота платформы с пустым ковшом к началу забоя совмещенное, с.

Существуют и альтернативные подходы к оценке продолжительности рабочего цикла землеройной техники, применимые к карьерным экскаваторам. Наибольший интерес представляет множество моделей, разработанных профессором В.И. Баловневым для интенсификации технологических процессов и расчета дорожно-строительной техники, оценки и оптимального использования машины [7-9]. Принципиальная особенность этих моделей заключается в строгом последовательном выполнении всех технологических операций, – каждое новое действие начинается только после полного завершения предыдущего. Такое разнесение во времени делает возможным «пошаговое» наблюдение за работой машиниста и тем самым позволяет количественно учитывать квалификацию оператора на каждом этапе цикла [6, 40].

На рисунке 2.1 последовательная схема траектория ковша выглядит следующим образом. Сначала выполняется копание из точки O_1 в O_2 ; далее, чтобы выгрузить породу, платформа экскаватора полностью поворачивается к самосвалу, и лишь после остановки ковш опускается в точку O_3 для разгрузки. При возвращении к забою порядок действий остаётся тем же: сначала поворот платформы, затем опускание ковша в исходную позицию O_1 .

Данное представление позволяет учесть влияние эргатической системы и нерациональных режимов управления, возникающих вследствие недостаточной квалификации оператора. С учётом этого предложена математическая модель времени рабочего цикла, включающая выполнения всех операций последовательно (2) [58]:

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

где $t_{\text{кп}}$ – суммарное время подъёма и копания горной массы, с;

$t_{\text{пов}}$ – время поворота платформы к самосвалу, с;

$t_{\text{оп}}$ – время опускания ковша к кузову самосвала, с;

$t_{\text{в}}$ – время выгрузки ковша, с;

$t_{\text{пов.х}}$ – время поворота с пустым ковшом к началу забоя, с;

$t_{\text{оп.х}}$ – время опускания ковша к началу забоя, с.

Аналогично математическим моделям времени рабочего цикла представленным профессором В.И. Баловневым, в настоящей работе для дальнейшего анализа и возможности применения данного подхода для теоретического расчета, время каждой стадии операции добычи представляется через две взаимосвязанные физические величины: работу оборудования, выполняемую рабочим органом и номинальную мощность соответствующего привода. Такой приём позволяет непосредственно связывать временные характеристики с режимами силовой нагрузки на оборудование.

Оператор не оказывает существенного влияния на продолжительность разгрузки ковша, а переменные эксплуатационные факторы практически не изменяют длительность времени, затрачиваемого на данную операцию. В моделях её длительность целесообразно учитывать как постоянную в диапазоне 1,0-1,5 с.

Опираясь на данный принцип, формулируется математическая модель совокупного времени цикла карьерного экскаватора, в которой продолжительность каждой фазы выражается через работу и мощность задействованного привода (3):

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

где $A_{\text{к}}$ – работа при копании, Дж;

A_n – работа при подъеме, Дж;

$A_{нов}$ – работа при повороте ковша к самосвалу, Дж;

$A_{оп}$ – работа при опускании ковша к самосвалу, Дж;

$A_{нов.х}$ – работа при повороте ковша к забою, Дж;

$A_{оп.х}$ – работа при опускании ковша к началу забоя, Дж;

$N_{под}$ – суммарная мощность приводов подъема, Вт;

$N_{нов}$ – мощность привода поворота, Вт;

$N_{нап}$ – мощность привода напора, Вт;

η – КПД приводов;

k_y – коэффициент участия привода напора при копании и подъеме.

В выражении (3) не учитывается работа, затрачиваемая на удержание заполненного ковша во время поворота платформы. Данная операция относится к категории вспомогательных: она выполняется силовыми узлами поворотного механизма параллельно основной фазе перемещения без формирования самостоятельного временного интервала. В кинематике цикла удержание ковша реализуется посредством поддержания стабильного момента на тормозах и редукторах, что обеспечивает заданный угол наклона подвески и исключает потерю горной массы. Поскольку длительность поворота определяется траекторией и скоростью вращения платформы, а не величиной удерживающего момента, дополнительная работа, связанная с компенсирующими усилиями, не влияет на суммарное время цикла. Следовательно, при аналитическом расчёте продолжительности рабочего цикла эта составляющая правомерно исключается из уравнения, оставаясь учтённой лишь в энергетическом, но не во временном, балансе процесса.

Для дальнейшего анализа приведём работу каждого этапа добычной операции через соответствующие параметры (4–9). Такое представление обеспечивает сопоставимость величины работы с номинальной мощностью приводов на каждом этапе рабочего цикла [16, 100]. Данная формализация обеспечивает строгость и наглядность анализа, поскольку позволяет учесть

реальные условия эксплуатации и конструктивные особенности экскаватора [2, 12, 46].

$$A_k = k_{pz} q k_z k_{уд.э}, \quad (4)$$

$$A_{\Pi} = (q k_H Y_s + m_k g) H_k, \quad (5)$$

$$A_{пов} = k_{всп.э} (m_{\Pi\Pi} + m_k + m_{\Gamma}) r^2 \varepsilon \varphi, \quad (6)$$

$$A_{оп} = (m_k + m_{\Gamma}) g H_k, \quad (7)$$

$$A_{пов.х} = k_{всп.э} (m_{\Pi\Pi} + m_k) r^2 \varepsilon \varphi, \quad (8)$$

$$A_{оп.х} = m_k g H_k, \quad (9)$$

где k_z – коэффициент заполнения ковша;

m_z – масса породы, кг;

r – радиус центра масс поворотных частей экскаватора, м;

H_k – высота забоя, м;

H_c – высота самосвала, м;

q – вместимость ковша, м³;

m_k – масса ковша, кг;

$m_{\Pi\Pi}$ – масса поворотной платформы, кг;

Y_s – объемный вес грунта, Н/м³;

$k_{уд.э}$ – коэффициент сопротивления копанию;

k_{pz} – коэффициент разрыхления;

ε – угловое ускорение платформы, рад/с²;

$k_{всп.э}$ – безразмерный экспериментальный коэффициент на вспомогательные операции позиционирования ковша;

φ – угол поворота платформы для выгрузки ковша, рад;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Исходя из количественной оценки работы на каждом этапе, сформулируем обобщённую математическую модель времени рабочего цикла карьерного электрического экскаватора (10):

$$t_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{рз}} q k_3 k_{\text{уд.з}} + (q k_{\text{н}} Y_{\text{с}} + m_{\text{к}} g) H_{\text{к}}}{N_{\text{под}} \eta_{\text{под}} + k_{\text{у}} N_{\text{нап}} \eta_{\text{под}}} + \frac{k_{\text{всп.э}} (m_{\text{пп}} + m_{\text{к}} + m_{\text{г}}) r^2 \varepsilon \varphi}{N_{\text{пов}} \eta_{\text{пов}}} + \frac{(m_{\text{к}} + m_{\text{г}}) g H_{\text{к}}}{N_{\text{под}} \eta_{\text{под}}} + t_{\text{в}} + \frac{k_{\text{всп.э}} (m_{\text{пп}} + m_{\text{к}}) r^2 \varepsilon \varphi}{N_{\text{пов}} \eta_{\text{пов}}} + \frac{m_{\text{к}} g H_{\text{к}}}{N_{\text{под}} \eta_{\text{под}}}. \quad (10)$$

В качестве базовой машины в данном исследовании принято рассматривать карьерный электрический экскаватор ЭКГ-18Р (Приложение В), эксплуатируемый в номинальных условиях со следующими исходными параметрами:

- порода – III категория по сложности экскавации, предварительно разрыхлённая взрывом;
- высота забоя – 15 м;
- угол поворота платформы – 90°;
- вместимость ковша – 18 м³ [75, 76];
- паспортное время цикла – 27 с;
- транспортное средство для перевозки горной массы – самосвал БелАЗ 75306 (Приложение Г).

На основе математической модели (10) выполнен расчёт продолжительности рабочего цикла при варьировании коэффициента заполнения ковша k_3 в диапазоне 0,6 - 1,2. Рассматривались два характерных сценария (рис. 2.2):

- параллельное выполнение поворота и опускания исполнительных органов (параллельная схема, соответствует выражению (1));
- последовательное выполнение всех операций без временного перекрытия (соответствует выражению (2)).

Подобная разница между паспортным и фактическим временем цикла отмечена и для колёсных погрузчиков [104]. Все расчётные параметры, задействованные на данном этапе исследования, будут использованы и в дальнейшем – при проведении экспериментальных испытаний и последующем анализе полученных результатов.

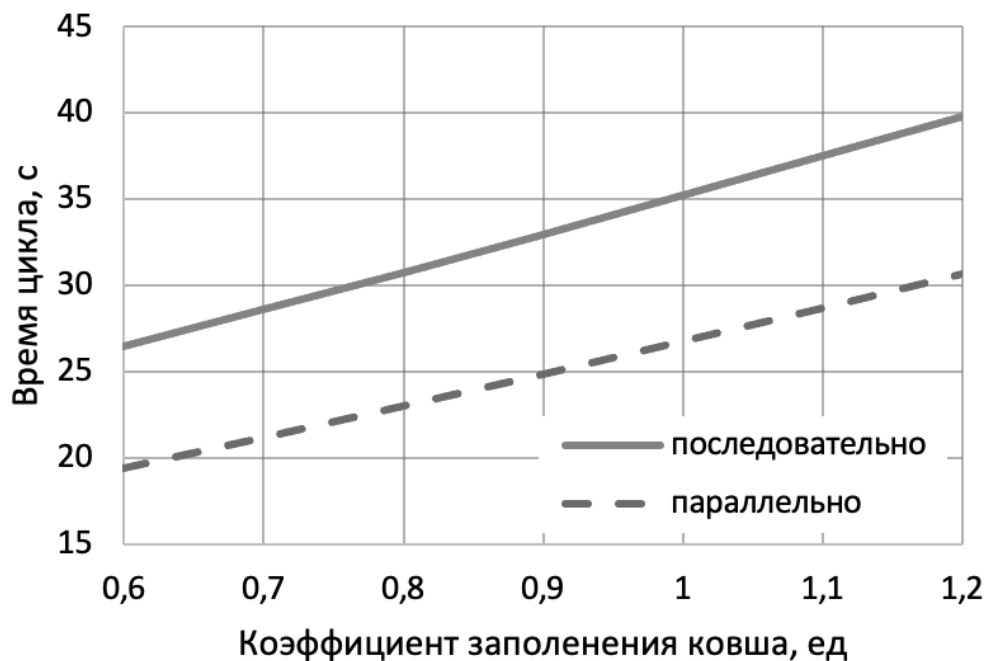


Рисунок 2.2 – Время рабочего цикла двух стилей управления оборудованием относительно коэффициента заполнения ковша (составлено автором)

Конструктивная специфика карьерного электрического экскаватора – наличие независимых приводов поворота, подъёма и напора – теоретически даёт возможность совмещать движения поворота платформы и опускания ковша, тем самым сокращая продолжительность технологического цикла. Указанная особенность заложена в нормативные методики и прямо отражена в технической документации машины: паспортное время цикла рассчитывается исходя из идеального параллелизма указанных операций. Однако такое допущение опирается исключительно на кинематический потенциал оборудования и игнорирует эргатический компонент, то есть различия в уровне профессиональной подготовки машиниста и текущие горнотехнические условия.

Проведённые расчёты показали, что при коэффициенте заполнения ковша $k_3 \approx 1$ переход от паспортного (совмещённого) режима к последовательному исполнению операций способен увеличить фактическую длительность цикла в среднем на 30 %. Это обусловлено тем, что оператору без достаточного опыта трудно обеспечивать синхронность приводов без рывков и корректирующих пауз. С возрастанием k_3 сверх единицы временной разрыв между параллельной и последовательной схемами остаётся стабильным в абсолютных величинах, но доля

прироста по отношению к базе растёт, что указывает на дополнительный негативный эффект переполнения ковша для малоквалифицированного персонала.

Модель рабочего цикла, представленная в выражении (2), позволила построить графическую зависимость времени цикла от k_z (рисунок 2.2). Аналитическое описание кривой служит не только для паспортного нормирования, но и для выявления потенциальных резервов повышения производительности: любое отклонение фактических телеметрических данных от расчётной кривой параллельного режима свидетельствует о нереализованном кинематическом ресурсе машины.

Таким образом, учёт эргатической системы переносит акцент с конструктивно-энергетических характеристик на интегральную «операторскую» составляющую процесса экскавации. Полученные зависимости формируют теоретическую основу для совершенствования горно-технологических процессов: оптимизации коэффициента заполнения ковша, разработки алгоритмов адаптивной поддержки управления и внедрения специализированных программ тренажёрной подготовки, направленных на повышение квалификации операторов.

2.2 Анализ подходов к оценке профессиональной подготовки операторов

Объективная характеристика уровня управления экскаватором является необходимым условием для корректного сопоставления расчётной и фактической производительности горнотехнологических процессов. В отличие от качественных квалификационных описаний, аналитические критерии позволяют численно оценивать степень реализации конструктивного потенциала машины в конкретных горнотехнических условиях и, тем самым, формулировать обоснованные рекомендации по совершенствованию операторской подготовки.

Методологическая основа таких критериев заключается в сопоставлении нормативных параметров технологического цикла – продолжительности элементарных операций, паспортной часовой производительности, удельных энергозатрат – с их фактическими значениями, регистрируемыми в ходе эксплуатации. Эволюция подходов отражает постепенное расширение спектра анализируемых величин. На раннем этапе внимание ограничивалось временными

отклонениями: предполагалось, что сверхнормативная добавка к длительности цикла является прямым индикатором недостаточной сформированности навыков. С внедрением систем телеметрического мониторинга и балансных методик расчёта энерго-материальных потоков в оценочные схемы были интегрированы показатели массы перемещаемой горной массы и удельных энергетических издержек.

В результате в научной практике закрепился ряд безразмерных коэффициентов, предназначенных для количественного сопоставления расчётных и фактических показателей цикла. Ниже представлено три показателя, каждый из которых отражает качество управления экскаватором через различную исходную величину.

Одним из наиболее распространенных критериев является коэффициент управления, предложенный П.И. Кохом [Великанов Великанова] и основанный на времени рабочего цикла оборудования (11):

$$K_y = \frac{T_T}{T_\phi}, \quad (11)$$

где T_T – теоретическая продолжительность рабочего цикла, с;

T_ϕ – фактическое время цикла, с.

Интерпретация показателя прозрачна. Значение коэффициента управления по Коху близкое к единице, свидетельствует о полном соответствии фактического темпа работы паспортному (расчетному) нормативу, значения меньше 1 указывают на перерасход времени и потенциальный резерв, а $K_y > 1$ фиксируют опережение номинальных параметров.

В качестве T_ϕ рекомендуется использовать среднестатистическую длительность цикла, полученную путём хронометражных наблюдений за машинистом в однородных горнотехнических условиях. Такой приём позволяет нивелировать влияние разовых отклонений и сделать оценку более репрезентативной. В то же время методика учитывает исключительно временной компонент и не фиксирует объём экскавируемой горной массы. Следовательно, сокращение цикла может быть достигнуто за счёт недозаполнения ковша, что формально увеличит K_y , но приведёт к снижению суточной выработки. Указанное

обстоятельство требует корректного интерпретирования результатов и дополнения критерия данными о массе погрузки.

Для более полной характеристики работы экскаватора Н.Г. Домбровский предложил использовать критерий K_m , основанный на показателе производительности машины (12):

$$K_m = \frac{Q_{\phi}}{Q_t}, \quad (12)$$

где Q_{ϕ} – фактическая часовая производительность экскаватора, м³/ч, определяемая по среднесменному объёму перемещённой горной массы;

Q_t – теоретическая (паспортная) производительность машины при номинальном коэффициенте заполнения ковша и оптимальном режиме управления, м³/ч.

Показатель обладает важным достоинством: он учитывает временную и объёмную составляющие процесса, поскольку фактическая производительность Q_{ϕ} пропорциональна массе породы, перемещённой за единицу времени. Следовательно, K_m позволяет выявлять случаи ускорения рабочего цикла, возникающие при неполной загрузке ковша, к чему не чувствителен коэффициент Коха.

На практике применение критерия сопряжено с двумя методическими трудностями. Во-первых, расчёт Q_t требует корректного учёта конструктивных параметров машины и горнотехнических ограничений забоя; погрешность в исходных данных непосредственно переносится на итоговую оценку. Во-вторых, величина Q_{ϕ} зависит не только от действий оператора, но и от организации сопряжённого транспортного звена: задержка автосамосвалов, вынужденные простои либо ограниченная ёмкость отвалов приводят к снижению среднесменной выработки [35], хотя скоростные и траекторные характеристики управления могут соответствовать нормативу или превышать его.

Таким образом, коэффициент Домбровского является более информативным, чем временной критерий, но чувствителен к внешним организационным факторам [60]. Для корректной интерпретации его значений необходимо дополнять анализ информацией о логистике, откатках породы и фактическом коэффициенте

заполнения ковша, в противном случае K_m может занижать реальный уровень квалификации машиниста.

Для устранения влияния переменного объёма ковша и коэффициента заполнения Н. Ф. Махно [57] предложил оценивать работу машиниста через удельную производительность (13):

$$K_y = \frac{T_{yt}}{T_{уст}}, \quad (13)$$

где T_{yt} – удельная теоретическая производительность экскаватора, с/м³;

$T_{уст}$ – удельная среднестатистическая (фактическая) производительность цикла экскаватора, с/м³.

Удельная теоретическая производительность экскаватора определяется по выражению (14):

$$T_{yt} = \frac{T_{тц}}{qK_э}, \quad (14)$$

где $T_{тц}$ – теоретическое время цикла, с;

$K_э$ – коэффициент экскавации, учитывающий разрыхление породы и потери при погрузке.

Фактическая удельная продолжительность рассчитывается через время загрузки одного транспортного средства (15):

$$T_{уст} = \frac{T_i}{Q}, \quad (15)$$

где T_i – время заполнения кузова автосамосвала, с;

Q – вместимость автосамосвала, м³.

Показатель интерпретируется по аналогии с ранее рассмотренными критериями: $K_y \approx 1$ означает, что фактическая скорость разработки соответствует расчётному потенциалу; $K_y < 1$ указывает на отставание, тогда как $K_y > 1$ фиксирует опережение нормативных значений.

Показатель характеризуется масштабной инвариантностью: изменения вместимости ковша или коэффициента заполнения автоматически отражаются в выражении (2), что обеспечивает корректную сопоставимость результатов для различных машин и режимов работы. Одновременно он наследует те же методические ограничения, что и предыдущий коэффициент Домбровского:

точность оценки существенно зависит от исходных данных, прежде всего от коэффициента экскавации и фактического объёма погрузки, а также от организации транспортного цикла. Задержки автосамосвалов увеличивают время заполнения кузова автосамосвала и тем самым искусственно занижают оценку квалификации оператора, даже если экскавация выполняется в нормативном темпе.

Завершая анализ безразмерных критериев, можно констатировать, что каждый из рассмотренных показателей акцентирует внимание на специфической стороне управления оборудованием машинистом: коэффициент Коха фиксирует только темп выполнения цикла, коэффициент Домбровского дополнительно отражает объёмную составляющую, а удельный показатель производительности Махно обеспечивает масштабную сопоставимость результатов при ковшах различной вместимости. При этом все три критерия в разной степени подвержены влиянию внешних организационных факторов – прежде всего логистики автотранспортного звена и точности исходных параметров, таких как коэффициент экскавации или фактическая масса погрузки. Следовательно, опора на какой-либо один коэффициент не гарантирует объективного суждения о квалификации оператора. Этим обусловлена необходимость интегрального подхода [21, 62], объединяющего временные и энергетические характеристики и минимизирующего влияние организационных факторов, так чтобы итоговый показатель отражал исключительно уровень квалификации оператора.

2.3 Разработка комплексного критерия оценки эффективности функционирования системы «оператор-машина» на основе временных и энергетических характеристик технологического процесса

Рациональная эксплуатация карьерного электрического экскаватора определяется не столько номинальными кинематическими и энергетическими характеристиками машины, сколько степенью их согласованной реализации оператором в пределах технологического цикла. Для выявления этой согласованности целесообразно применять комплекс взаимосвязанных показателей, где интервальные характеристики по времени количественно описывают последовательность операций, а энергетические характеристики

отражают фактическую загрузку приводов, объемный резерв мощности и уровень энергоэффективности процесса [28, 29]. Интегрированное исследование указанных параметров обеспечивает комплексную, технологически нейтральную оценку функционирования системы «оператор-машина» и позволяет объективно локализовать как узловые ограничения, так и потенциальные направления повышения производительности при одновременном снижении энергетических затрат [18].

Временная составляющая предложенного комплексного подхода предназначена для оценки уровня квалификации оператора и эффективности эксплуатации карьерных электрических экскаваторов. При низкой квалификации оператора все этапы рабочего цикла выполняются последовательно, что приводит непосредственно к увеличению продолжительности рабочего цикла и появлению резервов времени. 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 (16):

$$K_y = k_c \frac{t_n}{t_\phi}. \quad (16)$$

Номинальное время рабочего цикла t_n характеризуется номинальными условиями эксплуатации и как правило, рассчитывающееся производителем оборудования. Безразмерный коэффициент, характеризующий условия эксплуатации, k_c определяется как (17):

$$k_c = \frac{t_T}{t_n}. \quad (17)$$

где t_c – теоретическое время рабочего цикла оборудования, может быть рассчитано с учетом параллельного выполнения операций (1), и условий эксплуатации, либо задаётся эмпирически как минимальное значение, зафиксированное при фактической работе техники данного типа на месторождении.

Применение критерия по времени обеспечивает оперативную количественную оценку степени эффективности действий оператора в текущих условиях эксплуатации и позволяет выявить наличие общих резервов времени для снижения продолжительности рабочего цикла. Однако данный подход не учитывает разноплановость этапов технологической операции добычи, аналогично критерию “эталонного времени”, предложенный Макаровым и Рогалисом [53].

Предлагается использовать коэффициенты управления непосредственно к каждому этапу рабочего цикла, на который влияет эргатическая система. Т.к. рассматриваемый рабочий цикл учитывает систему «оператор-машина», в расчете времени следует использовать метод расчета с последовательными операциями (2). Исходя из этого мы получим три коэффициента: K_{y1} – коэффициент управления операцией копания и подъема по времени (18, 21); K_{y2} , K_{y3} – коэффициенты управления операциями поворота – опускания полного (19) и пустого ковша (20) по времени соответственно.

$$K_{y1} = k_{кп.с} \frac{t_{кп.н}}{t_{к.ф}}, \quad (18)$$

$$K_{y2} = 1 - \frac{(t_{пов.ф.с} - t_{пов.н})}{t_{оп.н}}, \quad (19)$$

$$K_{y3} = 1 - \frac{(t_{пов.х.ф.с} - t_{пов.х.н})}{t_{оп.х.н}}, \quad (20)$$

$$k_{кп.с} = \frac{t_{кп.т}}{t_{кп.н}}, \quad (21)$$

где $t_{кп.н}$ – номинальное время на копание и подъем, с;

$t_{к.ф}$ – фактическое время на копание и подъем, с;

$k_{кп.с}$ – безразмерный коэффициента, характеризующий условия эксплуатации оборудования;

$t_{кп.т}$ – теоретическое время на копание и подъем, с учетом условий эксплуатации, с;

$t_{пов.ф.с}$ – фактическое время на поворот и опускание ковша к самосвалу, с;

$t_{пов.н}$ – номинальное время на поворот ковша к самосвалу, с;

$t_{оп.н}$ – номинальное время на опускание ковша к самосвалу, с;

$t_{пов.х.ф.с}$ – фактическое время на возврат ковша к началу забоя, с;

$t_{пов.х.ф.н}$ – номинальное время на поворот ковша к началу забоя, с;

$t_{оп.х.н}$ – номинальное время на опускание ковша к началу забоя, с.

Коэффициент приведения номинальных условий к эксплуатационным вводится в модель лишь для тех этапов цикла, где кинематика движения непосредственно регулируется величиной сопротивления горной массы. Во время черпания ковш взаимодействует с породой вдоль линии резания, и фактическая скорость приводов определяется совокупностью физико-механических показателей забоя и породы. Аналогичная зависимость проявляется и в фазе подъёма, когда масса породы, закреплённая в ковше, увеличивает инерционную нагрузку на силовую установку. В этих условиях отклонение от паспортных величин становится систематическим, а без корректирующего множителя невозможно перевести номинальные интервалы времени в координаты реального технологического процесса.

Напротив, перемещения, связанные с поворотом платформы, разгрузкой ковша и возвратом рабочего органа в исходное положение, протекают практически в отсутствии силового контакта с породой. Их продолжительность определяется конструктивно параметрами оборудования, а влияние эксплуатационной среды сводится к второстепенным факторам. Поскольку указанные эффекты лежат в пределах допуска, временные параметры этих фаз могут без существенной погрешности сравниваться с номинальными показателями. Таким образом, использование коэффициента приведения ограничивается стадиями с критически важным силовым взаимодействием между рабочим органом и забоем, что повышает точность оценки, не усложняя расчёт остальных компонентов цикла.

Таким образом добавив коэффициенты управления по времени в формулу продолжительности рабочего цикла с последовательным ходом этапов копания (2) получим (22):

$$t_{ц} = \frac{1}{K_{y1}} t_{кп} + t_{пов} + (1 - K_{y2}) t_{оп} + t_{в} + t_{пов.х} + (1 - K_{y3}) t_{оп.х}. \quad (22)$$

На основе предложенного подхода, наличие коэффициентов, 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 ($K_{y2}, K_{y3} > 1$), это может свидетельствовать, что оператор выполняет действия 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 ($0 < K_{y1}, K_{y2}, K_{y3} < 1$), это указывает на частичную последовательность выполнения операций поворота и опускания ковша, что может свидетельствовать о недостаточной синхронности и потребности в корректировке режима работы оборудования. Если значения коэффициентов меньше нуля ($K_{y1}, K_{y2}, K_{y3} < 0$), это свидетельствует о значительных временных потерях в производственном цикле и наличии простоев оборудования между операциями.

Второй составной частью комплексного подхода, является показатель энергоэффективности эксплуатации карьерного электрического экскаватора. Учет энергетической составляющей обусловлен необходимостью полного анализа уровня квалификации оператора и 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 (23):

$$K_e = E_f / E_t. \quad (23)$$

Теоретическое количество затрачиваемой энергии можно получить, основываясь на формуле продолжительности цикла работы карьерного электрического экскаватора с учетом последовательного выполнения этапов добычи (24):

$$E_t = A_k + A_{\Pi} + A_{\text{пов}} + A_{\text{оп}} + A_{\text{пов.х}} + A_{\text{оп.х}}, \quad (24)$$

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 приходится производить большее количество циклов, что приводит к излишним тратам энергии. При $K_e < 1$ и приближении его к 0, свидетельствует о перегрузе ковша и вероятности работы экскаватора с негабаритом. Совместный анализ энергетических и временных показателей процесса даёт возможность комплексно подходить к оптимизации управления карьерным электрическим экскаватором и вырабатывать рекомендации, направленные как на сокращение продолжительности рабочего цикла, так и на повышение использования потенциала оборудования.

Исходные данные для вычисления целесообразно собирать с помощью систем дистанционного мониторинга карьерной техники [67]. Преимущество предлагаемого комплексного критерия в том, что для его расчёта достаточно данных, уже регистрируемых штатной информационно-диагностической системой (IDS) экскаватора ЭКГ-18Р. Токи приводов, углы поворота, время фаз цикла и другие параметры автоматически фиксируются и обрабатываются бортовым контроллером, поэтому вычисления выполняются прямо на машине без внешних датчиков и без остановок оборудования. Такой подход снижает затраты, устраняет погрешности, связанные с установкой сторонней аппаратуры, и обеспечивает объективную оценку действий оператора в реальном времени, что влечет и экономическую окупаемость процесса обучения [37]. Главное же – показатель формируется исключительно на основе внутренних параметров цикла, поэтому он практически не зависит от организационных факторов: очередности подачи самосвалов, скорости откатки транспорта, смены маршрутов и других внешних задержек, которые обычно искажают традиционные производственные метрики.

2.4 Выводы по главе 2

Во второй главе диссертационного исследования представлено развернутое теоретическое обоснование принципов работы карьерного экскаватора как

эргатическая система – производственный комплекс, в котором фактические режимы движения и нагрузки узлов формируются не только заранее заданными конструктивными параметрами, но и характером и своевременностью управляющих действий оператора, накладывающихся на постоянно меняющиеся горнотехнические и климатические условия эксплуатации.

Разработана детерминированная модель продолжительности рабочего цикла карьерного электрического экскаватора, учитывающая особенности взаимодействия в системе «оператор-машина». Модель отражает различие в стилях управления (параллельное и последовательное выполнение операций), что позволяет оценивать влияние квалификации оператора на продолжительность рабочего цикла.

Показано, что использование последовательной и параллельной схемы исполнения операций существенно влияет на эффективность функционирования экскаватора. В частности, переход к параллельному выполнению операций поворота и опускания ковша позволяет сократить время цикла до номинального значения, заложенного в технической документации. При этом выявлено, что несоблюдение этих принципов на практике может приводить к увеличению времени цикла на 30 % и более, особенно при низких значениях коэффициента наполнения ковша.

На основе проведённого анализа можно заключить, что существующие методики оценки профессиональной подготовки операторов экскаваторов, несмотря на их широкое распространение в инженерной и учебно-производственной практике, демонстрируют ряд методологических ограничений при применении к оценке функционирования эргатической системы. Ранние подходы, основанные на прямом сравнении теоретической и фактической продолжительности рабочего цикла, позволяют дать лишь общую оценку темпа работы и не учитывают характер распределения операций во времени, различия в уровне сформированности навыков или степень использования технологических возможностей машины.

Анализ более современных критериев, таких как коэффициенты производительности и удельной производительности показатели, показал, что хотя они и стремятся учесть объёмную составляющую процесса, их точность существенно зависит от множества внешних факторов: от корректности исходных данных до логистики транспортного звена. Отсутствие чёткой привязки к фазовой структуре рабочего цикла и невозможность отслеживать особенности управления на отдельных этапах существенно ограничивают их применимость в условиях, когда требуется дифференцированный анализ действий оператора.

Предложенный в рамках исследования комплексный подход к оценке эффективности функционирования системы «оператор-экскаватор» сформирован на основе объединения временных и энергетических характеристик, отражающих как структуру управления технологическим циклом, так и степень рациональности использования энергетического потенциала оборудования. В отличие от рассмотренных ранее методик, данный подход позволяет получить объективную и технологически нейтральное представление работы, минимизируя влияние внешних организационных факторов.

Существенным преимуществом предложенной системы является возможность её практической реализации с использованием стандартных средств информационно-диагностической системы (IDS) экскаватора, что делает возможным применение методики без необходимости установки внешних датчиков или проведения специальных измерительных процедур. Это, в свою очередь, открывает перспективы для регулярного мониторинга, оперативной обратной связи и адресной корректировки действий операторов в режиме реального времени.

Предложенные модели и критерии формируют теоретическую основу для последующего экспериментального исследования, проводимого с использованием тренажёрного комплекса. На их основе может быть осуществлена объективная количественная оценка уровня профессиональной подготовки, динамики освоения операций и влияния человеческого фактора на производственные показатели карьерной техники.

Результаты главы 2 подтверждают необходимость интеграции аналитического моделирования с данными телеметрии и операционного мониторинга для получения достоверной и функциональной картины работы эргатической системы, что может существенно повысить точность оценки эффективности эксплуатации карьерного экскаватора.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИМИТАЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРА КАРЕРНОГО ГУСЕНИЧНОГО ЭКСКАВАТОРА

Современные карьерные гусеничные экскаваторы являются сложными многоприводными машинами, в которых последовательность операций копания, подъёма, поворота и разгрузки выполняется под управлением машиниста с использованием отдельных органов управления. От своевременности и точности управляющих воздействий зависит продолжительность рабочего цикла, уровень удельного энергопотребления и общий ресурс оборудования. Нарушения в координации действий оператора приводят к увеличению продолжительности рабочего цикла и росту затрат энергии.

Проведение исследований, направленных на выявление закономерностей в действиях машиниста и оценку эффективности эксплуатации оборудования, в условиях промышленного производства сопряжено с рядом существенных ограничений. К ним относятся нестабильность внешней среды, невозможность многократного воспроизведения идентичных технологических ситуаций, а также отсутствие условий для управляемого варьирования параметров без вмешательства в регламент производственного процесса. Наряду с этим, потенциальные ошибки со стороны оператора в ходе выполнения рабочих операций могут повлечь за собой отказ техники, вынужденные простои и дополнительные издержки, что делает применение действующего оборудования в качестве экспериментальной базы методически и организационно затруднительным [26, 91, 92]. Для освоения базовых функций всё чаще применяются ПК-симуляторы, эффективность которых доказана экспериментально [82].

В этой связи особую роль приобретают тренажёрные комплексы, позволяющие в безопасных и контролируемых условиях моделировать работу карьерного экскаватора в заданной конфигурации производственного процесса. Высокореалистичные симуляторы обеспечивают воспроизведение динамики работы основных приводов, допускают повторение одних и тех же сценариев в

стабильной среде и позволяют фиксировать широкий спектр параметров, характеризующих действия оператора и поведение машины [22, 122, 123]. Использование таких систем создаёт основу для постановки экспериментального исследования, направленного на изучение динамики формирования профессиональных навыков и влияния этапов подготовки на эффективность работы эргатической системы, что подчёркивается влиянием структуры расписания тренировок на скорость развития перцептивно-моторных навыков [23, 24, 119].

3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований

На основе анализа нормативно-технической документации, результатов обзора отечественных и зарубежных работ по обучению операторов карьерных экскаваторов, а также с учётом цели и задач диссертации сформирована следующая программа экспериментальных исследований:

1. Формирование однородной выборки участников-операторов – подобрать группу с сопоставимым профессиональным опытом и квалификацией, пригодную для репрезентативного анализа.
2. Фиксация исходные параметры рабочего цикла, проведением контрольные упражнения в начала обучения.
3. Проведение цикла имитационного обучения на тренажёрном комплексе – организовать серию учебных сессий с постепенным усложнением сценариев и без вмешательства в реальные производственные процессы.
4. Проведение регулярных контрольных упражнений – после каждой части обучения проводить типовой рабочий цикл и регистрировать результаты для мониторинга прогресса.
5. Осуществление непрерывной телеметрии работы исполнительных механизмов – автоматически записывать нагрузки, временные характеристики и другие технические параметры во время всех упражнений.
6. Фиксация ошибок операторов – регистрация нарушений при эксплуатации оборудования.

7. Обобщение и анализ динамики производительности, временных показателей и совершаемых операторами ошибок. Обоснование критериев оценки квалификации операторов.

Подготовительный этап. На первом этапе была сформирована репрезентативная группа операторов карьерных электрических экскаваторов, для которой предварительно зафиксировали исходные показатели выполнения рабочего цикла и определили цели наблюдения; параллельно настроили полноразмерный тренажёрный комплекс ЭКГ-18Р/20К, задав типовые сценарии, категории породы и параметры регистрации, чтобы обеспечить воспроизводимую экспериментальную среду и единообразие дальнейших измерений.

Экспериментальный этап. Далее группа проводилась недельный курс имитационного обучения, в ходе которого каждую сессию автоматически собирались телеметрические данные приводов, временные характеристики фаз цикла и показатели производительности, а также фиксировались и классифицировались ошибки; регулярное выполнение контрольного упражнения после каждой части тренинга позволило отслеживать текущую динамику навыков.

Заключительный этап. По завершении обучения, проанализировали изменение параметров рабочего цикла, динамики ошибок и синхронности работы приводов. Установлены устойчивые зависимости снижения времени операций и ошибок и достижение предельных показателей производительности, что подтвердило сформированность навыков и эффективность выбранной методики тренажёрной подготовки.

3.2 Программа обучения операторов карьерного экскаватора ЭКГ-18р/20к на тренажёрном комплексе

Программа разработана как дополнительная профессиональная подготовка, обеспечивающая перевод кандидатов с базовой квалификацией машиниста-экскаватора на уровень безопасной и энергетически рациональной работы на машинах типоразмера ЭКГ-18Р/20К. Общая трудоёмкость курса составляет 184 акад. ч, из которых 106 ч отведено аудиторной теории, 68 ч – практическим занятиям на тренажёре и 10 ч – промежуточному и итоговому контролю знаний.

Очная форма обучения длится 23 дня с отрывом от производства, занятия проводятся в учебном центре предприятия-изготовителя экскаваторов [66].

Теоретический блок охватывает шесть взаимосвязанных разделов (общее устройство, эксплуатация, техническое обслуживание, безопасность, организация работ и основы открытой разработки месторождений). Наибольший объём (75 ч) приходится на изучение конструкции и параметров экскаватора, включая рабочее оборудование и информационно-диагностическую систему; в каждом разделе предусмотрены зачётные занятия для поэтапной аттестации обучаемого.

Практический блок состоит из пяти базовых упражнений возрастающей сложности [50]:

1. знакомство с органами управления;
2. передвижение по забою;
3. подготовка и разработка забоя;
4. погрузка горной массы в автосамосвалы;
5. выполнение сменной нормы выработки в режиме реального времени.

Занятия распределены на три этапа: подготовительный (инструктаж и демонстрация), основной (многократная отработка с корректирующими подсказками инструктора) и заключительный (контрольное упражнение без подсказок). Каждый сеанс начинается с постановки цели, проверкой знаний условий и обязательным инструктажом по безопасности; по окончании инструктор анализирует ошибки, зафиксированные программой тренажёра, и выставляет оценку.

Тренажёр фиксирует длительности фаз цикла, токовые нагрузки приводов и типизацию ошибок; система автоматически формирует отчёт, который используется при промежуточных тестах и на итоговом экзамене. Успешное завершение заключительного упражнения служит основанием для допуска к наставнической практике на реальном экскаваторе.

Целевые компетенции и критерии оценки:

- знание конструкции ЭКГ-18Р/20К и требований охраны труда;
- устойчивое выполнение полного рабочего цикла за нормативное время;

- снижение частоты ошибок до допустимого уровня;
- способность поддерживать энергоэффективный режим работы, оцениваемый по удельному показателю расхода электроэнергии и интегральным данным ИДС.

Таким образом, программа сочетает поэтапную теоретическую подготовку, модульно организованную тренажёрную практику и многоуровневый контроль, что обеспечивает безопасное и воспроизводимое формирование профессиональных навыков оператора карьерного экскаватора.

3.3 Структура тренажёрного комплекса обучения операторов карьерного экскаватора ЭКГ-18р/20к

В рамках экспериментального исследования был использован полноразмерный тренажёрный комплекс, разработанный на основе конструкции экскаватора ЭКГ-18Р/20К (Приложение В) 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. Основное назначение комплекса заключается в формировании устойчивых профессиональных навыков без воздействия на реальную технику и без вовлечения ресурсов, ограниченных в промышленной эксплуатации [39, 49].

На рисунке 3.1 показана компоновка данного тренажерного комплекса, установленного на предприятии ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова».

В качестве базового оборудования рассмотрен экскаватор ЭКГ-18Р, эксплуатируемый при нормальных погодных условиях; для загрузки используется карьерный самосвал БЕЛАЗ-75306 (Приложение Г), а в качестве разрабатываемого материала принят грунт 3-й категории по трудности копания.

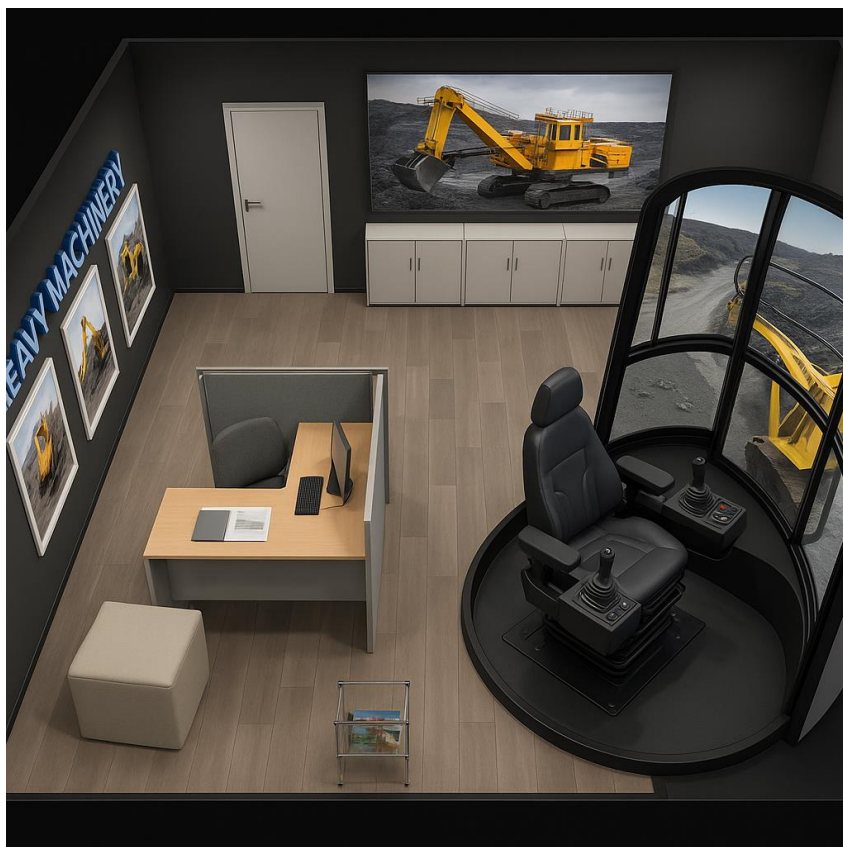


Рисунок 3.1 – Компоновка тренажёрной установки ЭКГ-18Р/20К в составе учебно-лабораторного модуля (составлено автором)

При анализе были учтены следующие значения: высота забоя $H_k = 15,4$ м; высота самосвала $H_c = 5,9$ м; вместимость ковша $q_k = 18$ м³; масса ковша $m_k = 31$ т; масса поворотной платформы $m_{пп} = 362,1$ т; суммарная мощность приводов подъема $N_{под} = 1120$ кВт; мощность привода поворота $N_{пов} = 700$ кВт; КПД приводов поворота и подъема соответственно $\eta_{д.пов}$, $\eta_{под}$ равны 0,85; объемный вес грунта $\gamma_s = 20$ кН/м³; коэффициенты сопротивления копанию и разрыхления грунта $k_{уд.э} = 0,25$, $k_{раз} = 1,25$ соответственно; угловое ускорение платформы $\varepsilon = 1,1$ 1/с²; безразмерный экспериментальный коэффициент на вспомогательные операции позиционирования ковша $k_{всп.э} = 1,1$; угол поворота платформы для выгрузки ковша $\varphi = 90^\circ$.

3.3.1 Функциональные возможности тренажёрного комплекса обучения операторов карьерного экскаватора ЭКГ-18р/20к

Архитектура комплекса включает три взаимосвязанных модуля: модуль машиниста, модуль инструктора и аппаратную часть, объединённые в локальную вычислительную сеть. Рабочее место машиниста, изображённое на рисунке 3.2, выполнено в виде полноразмерной кабины с аутентичными органами управления и приборами наблюдения, расположенными в соответствии с конструкцией экскаваторов ЭКГ-18Р/20К.



Рисунок 3.2 – Рабочее место машиниста (составлено автором)

Система визуализации и приборного контроля соответствует штатной комплектации реального оборудования и дополнена трёхступенной динамической платформой, позволяющей воспроизводить пространственные перемещения и

инерционные воздействия, возникающие в процессе работы. Визуальная система комплекса представленная на рисунке 3.3 обеспечивает непрерывное формирование изображения видимой части забоя и зоны погрузки с подъезжающим автотранспортом выполнена в нескольких вариантах, включая проекционные цилиндрические экраны, П-образные проекционные системы, а также мультимониторные конфигурации на базе плазменных панелей. Обеспечивается плавная смена освещения, симуляция тумана, осадков и загрязнения стекол, что позволяет достоверно имитировать работу в сложных метеоусловиях. Также существуют различные модификации тренажеров с AR и VR системами [78, 112, 113], а интерактивная визуализация доказала свою эффективность для передачи знаний операторам [126].



Рисунок 3.3 – Общий вид тренажёрного комплекса с системой визуализации
(составлено автором)

Модуль инструктора оснащён средствами мониторинга и управления, включая возможность наблюдения за действиями обучаемого, переключения ракурсов обзора, дублирования изображений, активации отказов и записи

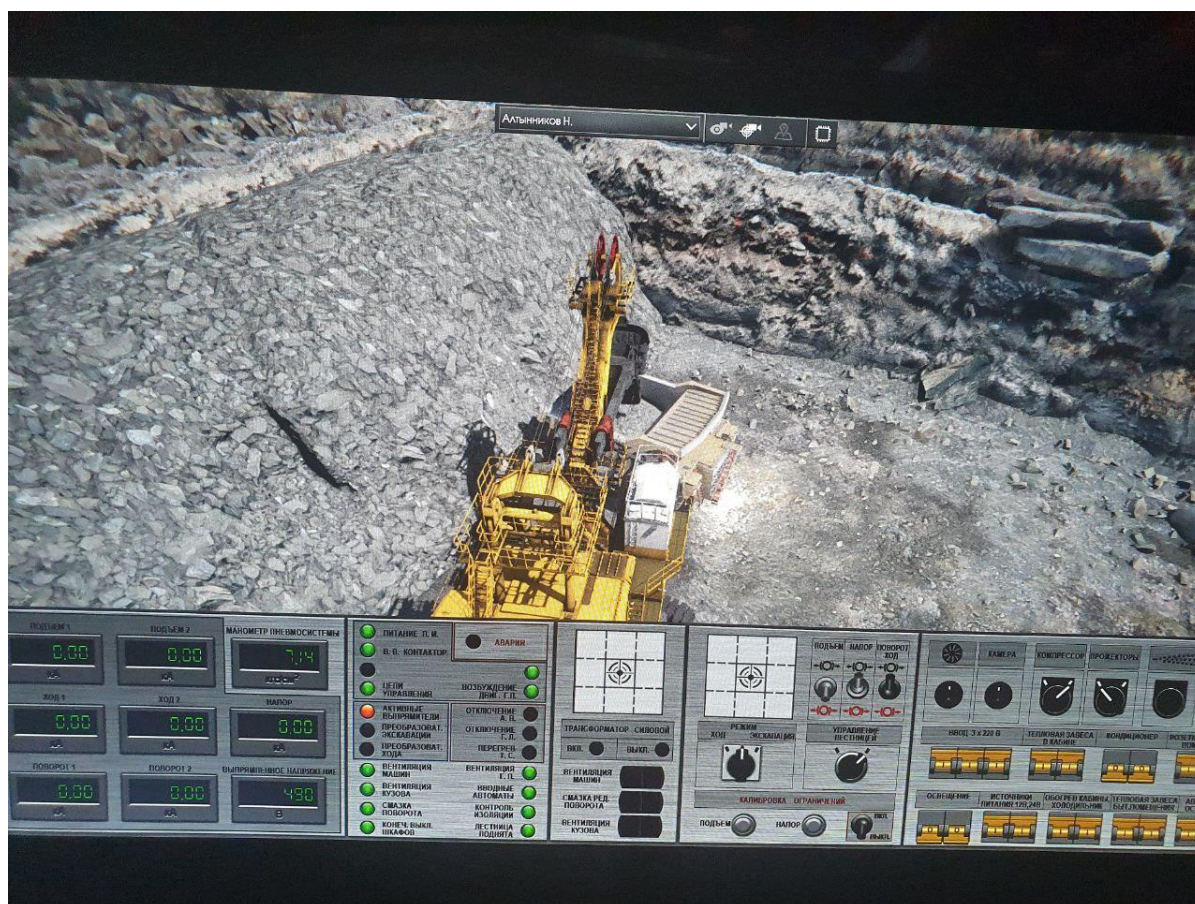


Рисунок 3.4 – Интерфейс системы модуля инструктора: визуализация положения экскаватора и контроль параметров работы (составлено автором)

Программное обеспечение тренажёрного комплекса включает встроенный редактор упражнений, позволяющий создавать и модифицировать учебные сценарии с учётом широкого спектра производственных условий. В рамках каждого упражнения возможно задание категории разрабатываемой породы (от I до V), степени её рыхления, высоты забоя, наличия и объёма негабаритных

включений, а также выбор типа транспортного средства под погрузку (БЕЛАЗ, думпкар, автосамосвал).

Устанавливаются параметры освещения (время суток, сезон года), погодные условия (туман, дождь, снег, ясная погода), интенсивность осадков, плотность запылённости и состояние остекления кабины.

В таблице 3.1. приведены значения коэффициента наполнения ковша экскаватора с учетом фактических условий работы [83].

Таблица 3.1 – Значения коэффициента наполнения ковша экскаватора с учетом фактических условий работы [83]

Вид грунта	Коэффициент наполнения ковша
Рыхлый	
Смешанные влажные грунты	0,95-1
Однородные грунты с размером частиц, мм:	
менее 3	0,95-1
3-9	0,90-0,95
12-20	0,85-0,90
более 24	0,85-0,90
Взорванная порода	
Хорошо взорванная (малой крупности)	0,80-0,95
Средневзорванная (средней крупности)	0,75-0,90
Плохо взорванная (большой крупности)	0,60-0,75
Другие	
Каменно-грунтовые смеси	1,00-1,20
Влажный суглинок	1,00-1,10
Почва, валуны, корни	0,80-1
Цементированные грунты	0,85-0,95

Дополнительно задаются конфигурация рабочей площадки, положение техники, допустимое время выполнения задания и условия окончания упражнения. Все выполненные задания автоматически сохраняются в базе данных с возможностью их воспроизведения, экспорта и анализа.

3.3.2 Информационно-диагностическая система тренажёрного комплекса обучения операторов карьерного экскаватора ЭКГ-18р/20к

Интеграция в тренажёрный комплекс полнофункциональной имитации информационно-диагностической системы (ИДС), которой в свою очередь оборудованы и реальные машины, обеспечивает не только визуальное сопровождение действий обучаемого, но и детальную регистрацию параметров работы основных приводов. Система фиксирует значения токов и напряжений на исполнительных механизмах поворотной платформы, напора и подъёма в реальном времени, что делает возможным воспроизведение вольтамперных характеристик с высокой степенью точности. Эти данные используются как для контроля заданий в процессе обучения, так и в качестве экспериментального материала при анализе нагрузочной картины в различных участках цикла.

Математическое ядро тренажёра построено на базе параметризованных моделей реального экскаватора ЭКГ-18Р и включает описание характеристик основных приводов (поворота, подъёма, напора и хода), их динамики и ограничений по механическим и электрическим перегрузкам, разработанных на базе цифровых моделей процесса экскавации [48].

В воспроизводимых сценариях учитываются вольтамперные характеристики электродвигателей, передаточные отношения приводов, масса рабочего оборудования, инерционные характеристики и параметры сопротивления породы, в том числе зависимости усилия резания от категории материала и положения ковша. Алгоритмы работы систем автоматической защиты, ограничения по току и скорости, а также реакция информационно-диагностической системы реализованы в полном соответствии с документацией производителя. В процессе выполнения упражнения ИДС обеспечивает синхронную запись телеметрии, идентификацию участков перегрузки, отображение аварийных состояний и последующую визуализацию параметров в графическом виде. На рисунке 3.5 приведены экспериментально полученные зависимости токов и напряжений, регистрируемые системой ИДС, которые демонстрируют характерную динамику нагрузки на

приводы в условиях экскавационного цикла и подтверждают воспроизводимость электромеханических процессов в модели.

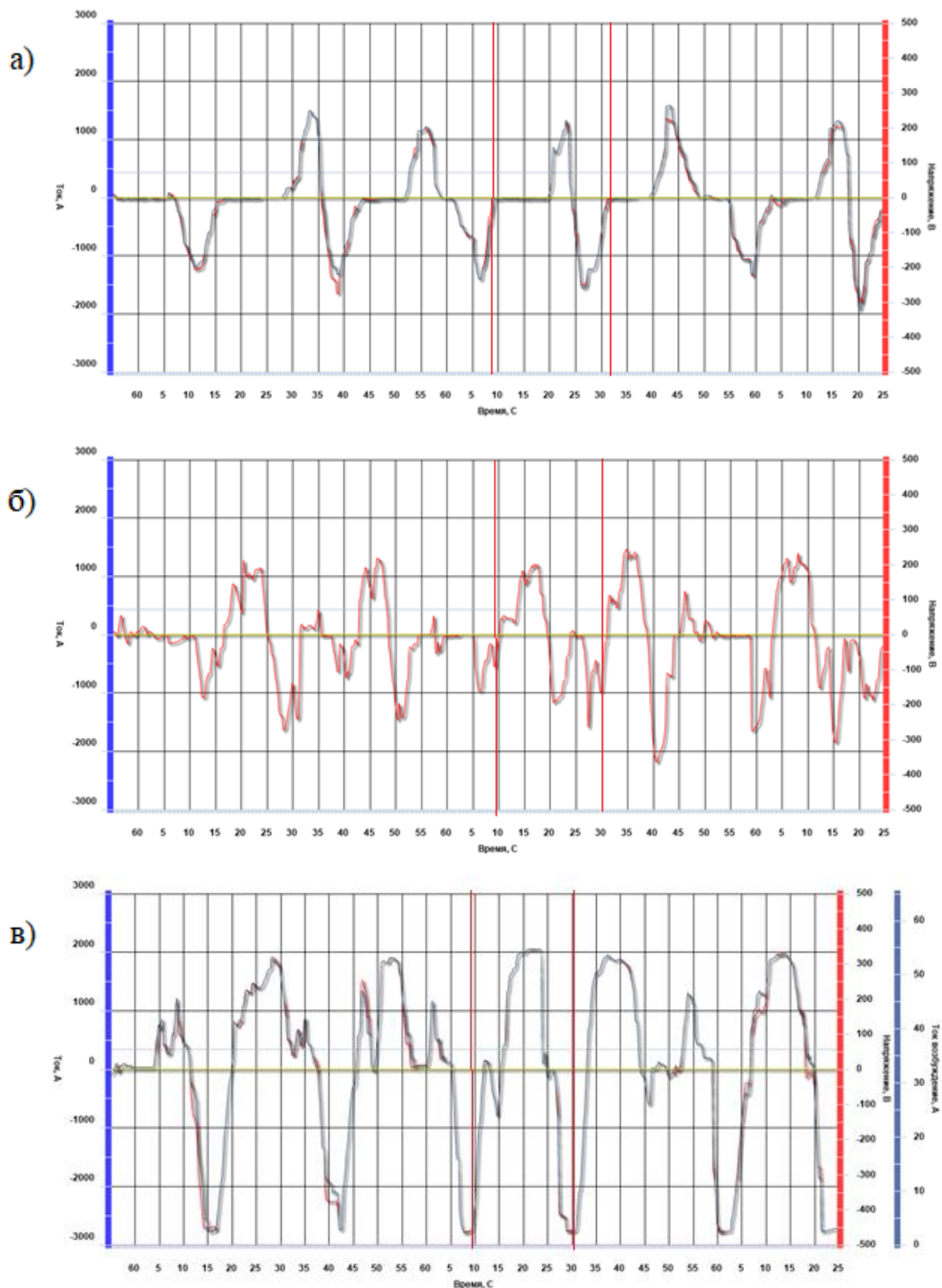


Рисунок 3.5 – Вольтамперные характеристики приводов в системе ИДС на тренажерном комплексе ЭКГ-18Р/20К: а) поворотной платформы; б) напора; в) подъема (составлено автором)

Точность воспроизведения этих процессов обеспечивает соответствие тактильной и визуальной обратной связи с реальными ощущениями оператора в кабине, что позволяет формировать устойчивая двигательная реакция, пригодная для последующего переноса в производственные условия.

3.3.3 Требования к оператору для обучения на тренажёрном комплексе

Чтобы приступить к занятиям на тренажёрном комплексе, обучаемый должен заранее подтвердить соблюдение нормативных, санитарно-гигиенических и профессионально-технических условий. Такой подход исключает существенные различия между слушателями и гарантирует корректность последующего обучения.

1. Правовой допуск к управлению самоходной техникой. Обучающийся обязан представить действующее удостоверение тракториста-машиниста установленного образца, выданное в соответствии с Правилами допуска к управлению самоходными машинами. Этот документ подтверждает право кандидата выполнять тренировочные операции, моделирующие реальные рабочие режимы экскаватора.

2. Медико-санитарная пригодность и возрастное соответствие. До начала занятий кандидат проходит предварительное медицинское освидетельствование и допускается только при отсутствии противопоказаний, перечень которых приведён в учебной программе, одновременно проверяется соответствие возрастным ограничениям, установленным правилами охраны труда для машинистов экскаваторов.

3. Базовая техническая подготовленность. Входное тестирование подтверждает, что кандидат обладает начальными сведениями об устройстве экскаватора и взаимодействии его систем, без успешного прохождения теста переход к практической фазе на тренажёре не допускается.

4. Первичные инструктажи по охране труда и технике безопасности. Перед первой сессией на тренажёре слушатель проходит вводный и первичный инструктажи, включающие общие требования безопасности, порядок действий в

аварийных ситуациях, правила применения средств индивидуальной защиты и регламент периодических проверок знаний.

5. Регламентированная проверка и фиксация ошибок в ходе курса. Учебная программа предусматривает промежуточные тестирования и автоматизированную регистрацию нарушений на каждом этапе тренажёрной подготовки; результаты используются для коррекции индивидуальной траектории обучения и подтверждения устойчивости навыков.

Таким образом, соблюдение перечисленных требований гарантирует, что все участники исследования начинают тренажёрный курс в сопоставимых базовых условиях, а результаты будут отражать исключительно эффект обучения.

3.3.4 Методические и инструментальные средства контроля процесса обучения оператора

Обучение осуществляется в режиме реального времени с возможностью поэтапного усложнения заданий – от освоения базовых операций управления до выполнения циклов с повышенной нагрузкой, включающих взаимодействие с породами высокой категории, разработку забоев с негабаритами и реагирование на аварийные ситуации. Инструкторский модуль предоставляет широкие средства контроля: наблюдение за действиями обучаемого, управление сценарием, внесение изменений в ходе выполнения упражнения. Предусмотрена возможность принудительной активации отказов с целью отработки нестандартных ситуаций. В число реализуемых аварийных сценариев входят: отключение электропитания, срабатывание защит по превышению допустимого тока в приводах, обрыв подъемного каната и вант, потеря зуба ковша, перегрев подшипников, электродвигателей и редукторов, а также падение давления в пневмосистеме. Система автоматически фиксирует и нарушения, допускаемые операторами, включая начало работы без подачи звукового сигнала, перемещение экскаватора с погружённым в породу ковшом, поворот платформы в неподходящих условиях и др. Наряду с этим, система обеспечивает формирование и вывод оценочных показателей, характеризующих результаты выполнения заданий и представляет их в виде ведомости учета результатов заданий (Приложение Д): объём выполненной

работы, расчётная производительность, число погруженного транспорта, среднее время рабочего цикла и перечисление совершенных ошибок при эксплуатации оборудования.

Функциональные возможности комплекса включают полную имитацию производственного цикла с отображением технологических параметров, визуальной и звуковой обстановки, а также динамики внешней среды: времени суток, погодных условий, запылённости, видимости и др. Система позволяет последовательно отрабатывать задачи различного уровня сложности в реальном времени – от базового освоения элементов управления до сложных сценариев, включающих взаимодействие с тяжёлыми грунтами, негабаритами и аварийными ситуациями. Инструктор может в реальном времени контролировать ход выполнения упражнений, вмешиваться в сценарий, фиксировать ошибки и формировать индивидуальные отчёты по результатам. В Приложении Е перечислены все ошибки, регистрируемые тренажерным комплексом, а также их описание.

Таким образом, тренажёрный комплекс на базе экскаватора ЭКГ-18Р представляет собой многофункциональное техническое средство, обеспечивающее не только обучение операторов в условиях, приближённых к реальности, но и создание воспроизводимой экспериментальной среды для регистрации телеметрических данных, анализа операционного поведения и оценки профессиональной подготовки и даже служить инструментом оценки остаточного ресурса экскаватора [36].

3.4 Методика проведения экспериментальных исследований на тренажёрном комплексе

Экспериментальное исследование, проведённое в рамках настоящей работы, направлено на изучение особенностей функционирования эргатической системы при управлении карьерным экскаватором в условиях, приближённых к реальной эксплуатации, с акцентом на влияние профессиональной подготовки оператора на параметры выполнения рабочего цикла. В качестве основной экспериментальной платформы использован тренажёрный комплекс ЭКГ-18Р/20К в ООО «ИЗ-

КАРТЭКС имени П. Г. Коробкова», воспроизводящий кинематические, энергетические и визуальные характеристики соответствующей модели экскаватора, а также оснащённый встроенной имитацией информационно-диагностической системы и системой регистрации телеметрических параметров с основных исполнительных узлов.

Актуальность постановки эксперимента обусловлена тем, что при формально идентичных технических характеристиках карьерные экскаваторы в реальной эксплуатации демонстрируют широкий диапазон производительности, что в значительной степени связано с действиями машиниста. Подобные методики тренажёрной подготовки зарекомендовали себя как эффективный инструмент повышения квалификации операторов [24], а использование компьютерных моделирующих комплексов позволяет приблизить условия обучения к реальной эксплуатации [23]. Таким образом, точная оценка роли человеческого фактора в достижении проектных показателей машины требует воспроизводимой и управляемой среды, в которой исключено влияние внешних технологических и организационных переменных. Тренажёрный комплекс предоставляет такую возможность: за счёт полной моделируемости условий, повторяемости сценариев и регистрации параметров с высокой временной детализацией он становится инструментом не только для обучения, но и для научно обоснованного исследования процессов взаимодействия «человек-машина».

Целью экспериментального исследования является выявление закономерностей, отражающих влияние уровня профессиональной подготовки оператора на эффективность функционирования эргатической системы карьерного экскаватора, на основе сопоставления фактических параметров рабочего цикла, зафиксированных в процессе имитации экскавационных операций, с расчётными характеристиками, выведенными ранее в теоретической части работы. Объектом исследования выступает процесс изменения параметров наработки оборудования на протяжении полного цикла экскавации при изменении квалификации оператора.

Для реализации поставленной цели в рамках исследования были сформулированы следующие задачи:

- зафиксировать исходные параметры выполнения рабочего цикла до начала обучения;
- осуществить регистрацию вольтамперных характеристик исполнительных механизмов в процессе типовых упражнений;
- выявить характер изменений в параметрах цикла на фоне увеличения практического стажа в симулированной среде;
- оценить устойчивость приобретённых навыков при варьировании внешних условий: категории породы, визуальной обстановки, геометрии забоя;
- провести анализ зафиксированных ошибок и нарушений, определив их частотность, типологию и связь с этапами обучения

3.4.1 Условия проведения экспериментальных исследований

Обучение проводилось на протяжении недели и включало 35 академических часов практической подготовки, распределённых равномерно в течение восьми дней. По завершении каждого дня проводилось контрольное упражнение, в рамках которого оператор выполнял типовой рабочий цикл – экскавацию угольного забоя высотой 15 м, углом поворота 90° и последующую погрузку породы в автосамосвал БЕЛАЗ-75306 с грузоподъёмностью 220 т в дневное время без осадков и критических ситуаций, выход негабарита составлял при этом 0%. При этом фиксировались ключевые показатели: средняя и минимальная продолжительность цикла, количество допущенных ошибок, а также параметры нагрузки на основные исполнительные механизмы машины. Такая структура обучения позволила отслеживать динамику изменения уровня подготовки, включая прогрессивное сокращение временных затрат, стабилизацию управляющих воздействий, снижение количества нарушений и общее приближение к математической модели, выведенной в теоретической части.

В экспериментальном исследовании приняла участие однородная по профилю группа из 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. Возрастная структура испытуемых варьировалась от 28 до 52 лет, при этом 60 % участников имели уровень квалификации не ниже восьмого разряда по единой квалификационной сетке. В качестве иллюстративного примера можно привести оператора восьмого разряда, обладавшего более чем 12-летним опытом непрерывной работы на экскаваторе ЭКГ-12К в угледобывающем подразделении, что позволило оценить влияние высокого уровня первоначальной подготовки на скорость и качество освоения тренажерных программ. Применение данной когорты специалистов обеспечило возможность выявления зависимостей динамики формирования профессиональных навыков от исходного уровня квалификации и профильного опыта.

3.4.2 Перечень контролируемых параметров

В ходе выполнения всех упражнений автоматически регистрировались следующие параметры:

- объём выполненной работы;
- производительность;
- продолжительность каждого этапа рабочего цикла (в том числе средняя и минимальная);
- вольтамперные характеристики работы механизмов подъёма, поворота и напора;
- частота и характер нарушений.

Дополнительно по завершении каждого упражнения формировался автоматизированный отчёт, включающий визуальную фиксацию действий оператора, графическую динамику параметров нагрузки и перечень зафиксированных отклонений. Отчёты сохранялись в цифровом виде и использовались как для текущей обратной связи, так и для последующего анализа хода обучения. Такая организация позволила не только отследить индивидуальную траекторию формирования навыка, но и обеспечить верификацию данных,

необходимых для аналитического сопоставления с расчётными моделями, что составляет предмет рассмотрения следующей главы.

3.4.3 Распределение критических и некритических ошибок оператора

Анализ динамики формирования навыков оператора в процессе обучения требует не только количественной фиксации показателей производительности, но и оценки качества выполняемых действий. Одним из ключевых индикаторов уровня профессиональной подготовки является частота и характер допускаемых ошибок, особенно в условиях, приближённых к реальной эксплуатации. В рамках настоящего исследования на каждом этапе обучения регистрировались ошибки, возникавшие при выполнении типового рабочего цикла, с последующей классификацией и анализом их изменения во времени.

Все фиксируемые отклонения подразделялись на критические, то есть потенциально опасные для работы оборудования или нарушающие технологическую логику цикла, и некритические, не приводящие к отказам, но свидетельствующие о недостаточной точности действий оператора.

К числу критических ошибок относились:

- поворот платформы при погружённом ковше в забой;
- перемещение экскаватора с загруженным ковшом;
- удар ковшом по оборудованию;
- стопор в приводе подъёма или напора;
- удар рукояти при резком напоре или возврате;
- удар ковшом о грунт с превышением допустимого усилия.

Некритические ошибки включали:

- превышение времени отдельных фаз цикла;
- несвоевременная подача звукового сигнала;
- отклонения от рекомендуемой последовательности действий;
- неравномерность перемещений исполнительных органов.

Проведённая группировка критических и некритических отклонений формирует методологический каркас для последующей обработки информации в едином массиве данных, охватывающем всю совокупность испытуемых.

Структурированное представление ошибок позволяет нормировать показатели, устранить влияние случайных факторов и обеспечить воспроизводимость измерений, что критически важно для внутригрупповой динамики.

3.5 Методика обработки результатов экспериментов

Первичные данные тренажёрных испытаний – временные ряды фаз рабочего цикла, параметры токовых нагрузок приводов и реестр эксплуатационных ошибок – экспортировались и сохранялись в единую рабочую книгу Microsoft Excel. Каждой записи присваивался комплексный идентификатор «оператор – дата», что обеспечивало прослеживаемость наблюдений. На основе стандартных функций Excel вычислялись усреднённая продолжительность цикла, энергоэффективность процесса экскавации и суммарная частота критических и некритических отклонений, а также формировались графические зависимости названных показателей от накопленного времени обучения.

Для исключения ручных операций при регулярном пополнении массива данных применялись автоматизированные процедуры на Python, интегрированные в среду Excel. Скрипты выполняли импорт, актуализировали рабочую таблицу и инициировали обновление производных метрик и диаграмм. Дополнительно, в КОМПАС-3D строились упрощённые пространственные модели ковша и рабочей зоны экскаватора, что позволило визуально сопоставить наблюдаемые динамические нагрузки с геометрическим положением оборудования. Совокупность указанных инструментов обеспечила воспроизводимую и оперативную обработку результатов эксперимента при сохранении его достоверности.

3.6 Выводы по главе 3

Полноразмерный тренажерный комплекс ЭКГ-18Р/20К, воспроизводящий кинематические, энергетические и визуальные характеристики карьерного экскаватора и интегрирующий штатную информационно-диагностическую систему, сформирован в качестве лабораторной установки, позволяющей моделировать эксплуатацию машины при варьируемых погодных и

технологических условиях без вовлечения реального производственного ресурса. Аппаратно-программный контур непрерывно регистрирует телеметрию приводов и фиксирует все отклонения от регламентов управления, обеспечивая целостность массива первичных данных.

Методическая схема исследования опирается на действующие стандарты и рекомендации по лабораторно-полевым испытаниям. Подготовительный этап включает калибровку типовых сценариев забоя, фиксацию исходных параметров операторов и настройку регистрационных каналов, что гарантирует однородность последующих замеров. Непрерывный недельный курс симуляционного обучения (35 академических часов) разворачивается в идентичной среде: каждый день завершается контрольным упражнением, а тренажёр автоматически собирает временные характеристики цикла, силовые параметры и классифицированные ошибки оператора.

Представленная структура эксперимента оставляет за рамками данной главы интерпретацию результатов, фокусируясь на обосновании аппаратных средств, нормативной базы и последовательности процедур, необходимых для последующей оценки влияния подготовки машиниста на параметры функционирования эргатической системы карьерного экскаватора.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ ЭКГ-18Р/20К

Повышение требований к точности, устойчивости и эффективности работы операторов карьерной техники предопределяет необходимость разработки методов объективного диагностирования уровня их подготовки. В современных условиях особую актуальность приобретает использование тренажёрных комплексов, позволяющих в контролируемой среде имитировать производственные процессы и фиксировать широкий спектр параметров, характеризующих действия оператора.

Проведение экспериментальных исследований с регистрацией телеметрических и хронометрических показателей, полученных в ходе тренажёрной подготовки, открывает возможности для количественной оценки уровня профессиональных навыков. Такая оценка требует как достоверных исходных данных, так и обоснованных показателей, способных отразить не только временную составляющую, но и технологическую целесообразность выполняемых операций.

Настоящая глава направлена на анализ параметров, регистрируемых в процессе тренажёрного обучения, и их использование в качестве основы для оценки качества управления экскаватором. Полученные данные легли в основу формулирования прикладных положений, ориентированных на повышение эффективности подготовки операторов карьерного экскаватора.

4.1 Результаты исследования изменений основных параметров рабочего цикла в ходе обучения оператора

На ранних этапах профессиональной подготовки операторов карьерного оборудования ключевым показателем эффективности обучения выступает динамика изменения параметров рабочего цикла машины. Анализ таких параметров позволяет не только оценить уровень усвоения оператором основных функциональных приёмов, но и выявить характерные этапы формирования устойчивых навыков, а также определить моменты перехода от базового понимания управления к эффективному выполнению рабочих операций.

Изменения временных характеристик, особенностей последовательности и координации движений, а также проявление ошибок различного уровня критичности в процессе обучения могут быть зафиксированы и интерпретированы с помощью данных, регистрируемых тренажёрным комплексом. Это позволяет не только отслеживать прогресс, но и формировать объективные критерии оценки профессионального роста. Анализ основан на массиве данных, автоматически зафиксированных информационно-диагностической системой тренажёрного комплекса в ходе поэтапной подготовки группы обучающихся. В процессе каждой тренировочной сессии регистрировались телеметрические параметры исполнительных приводов, временные отрезки выполнения операций, а также частота возникающих в ходе тренировочной сессии отклонений.

На рисунке 4.1 представлено распределение количества критических и некритических ошибок, зафиксированных в процессе обучения операторов карьерного электрического экскаватора на тренажёрном комплексе. По оси абсцисс отложено суммарное количество отработанных часов, по оси ординат – количество ошибок соответствующего типа.

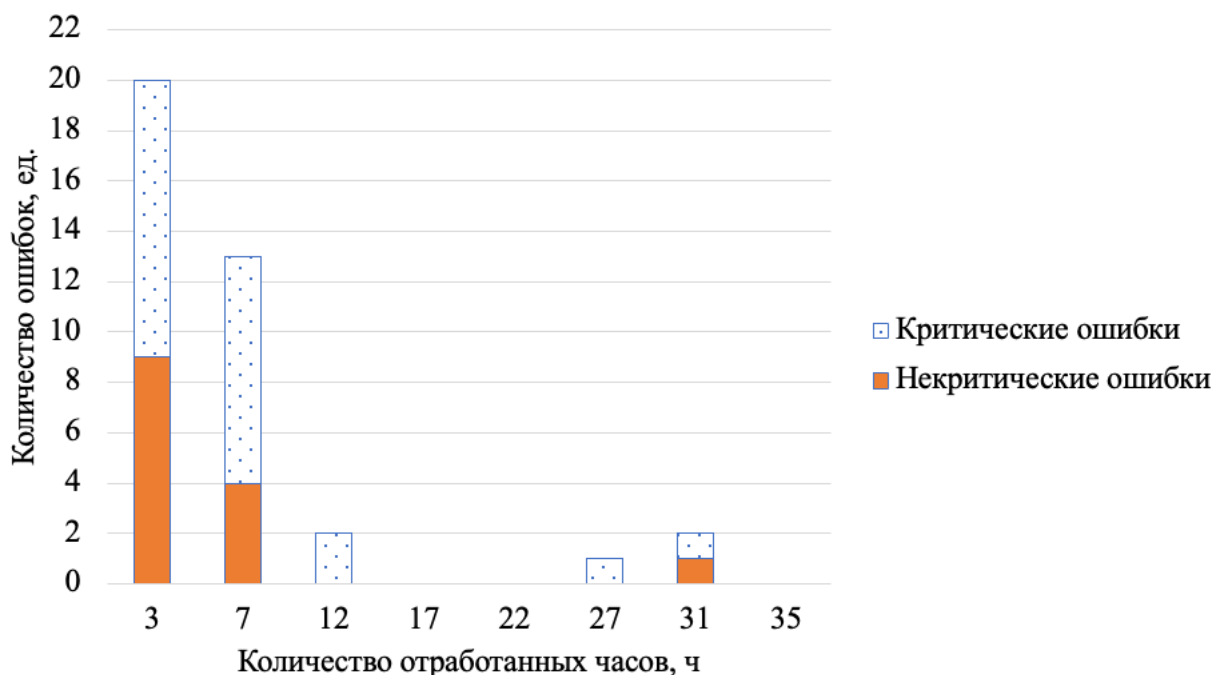


Рисунок 4.1 – Зависимость медианного количества ошибок от отработанных часов
(составлено автором)

Анализ графика демонстрирует выраженную тенденцию к снижению общего числа ошибок по мере увеличения продолжительности тренировок. На начальном этапе (3 – 7 ч) наблюдается наибольшее количество нарушений, причём в структуре преобладают критические ошибки, потенциально приводящие к сбоям в работе оборудования или к опасным отклонениям от технологического регламента. Некритические ошибки также имеют значительную долю и отражают недостаточную координацию движений, погрешности в позиционировании исполнительных органов и нарушения последовательности действий.

Начиная с 12-го часа обучения, общее количество ошибок снижается более чем в 6 раз, а критические ошибки становятся единичными. В дальнейшем (после 17 ч) большинство тренировочных сессий проходит либо без нарушений, либо с минимальным числом незначительных отклонений, что указывает на достижение операторами приемлемого уровня автоматизации действий и закрепление навыков безопасной и эффективной работы. Подобные закономерности снижения количества ошибок и формирования устойчивых навыков при обучении на тренажёрах подтверждаются результатами ряда зарубежных исследований, в которых подчёркивается значимость поэтапной отработки навыков с обратной связью от симулятора [108, 125].

Следует отметить практически полное исчезновение критических ошибок после 22 ч обучения, за исключением отдельных эпизодов на 31-м часу, которые могут быть связаны с утомлением или перегрузкой внимания. Данные результаты 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 рисунке 4.2 представлена временная характеристика напряжения в приводах экскаватора, зафиксированная при выполнении одного из рабочих циклов в составе контрольного упражнения общей продолжительностью 22 с. Цикл начинается с момента захвата породы и завершается возвращением

исполнительных механизмов в исходное положение. Выбранный цикл иллюстрирует наиболее эффективную реализацию операций, в которой за счёт высокой скоординированности действий достигается опережение нормативных временных характеристик. В то же время усреднённые значения временных параметров, рассчитанные по всем циклам данного контрольного упражнения, превышают нормативные показатели, что подчёркивает репрезентативность приведённого цикла как локально оптимального, но статистически нестабильного примера.

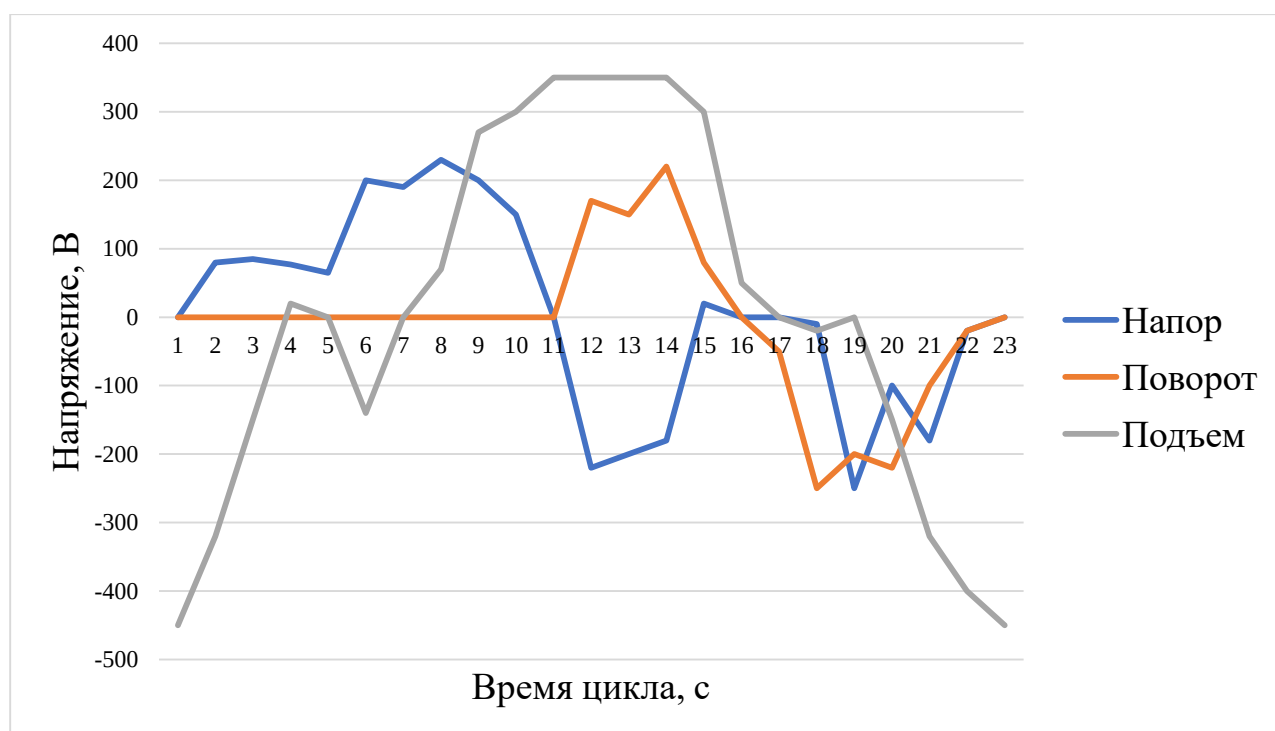


Рисунок 4.2 – Наложение работы приводов (составлено автором)

Анализ временных характеристик показывает, что приводы напора, подъёма и поворота функционируют в тесной координации и демонстрируют характерную трёхфазную структуру в пределах одного рабочего цикла.

Первая фаза (0 – 11 с) соответствует заглублению ковша в забой и выборке горной массы. В этот период регистрируется возрастание напряжения в приводах напора и подъёма, что отражает активную работу механизмов по преодолению сопротивления породы.

Вторая фаза (11 – 17 с) связана с прицельным позиционированием ковша для разгрузки породы в кузов самосвала: в данном интервале наблюдается синхронная активность всех трёх приводов, обеспечивающая одновременное выполнение операций подъёма, напора и поворота, что соответствует структуре номинального цикла.

Третья фаза (17 – 22 с) характеризуется возвратом исполнительных органов в исходное положение – напряжения в приводах снижаются, механизмы стабилизируются, завершая цикл и обеспечивая готовность к следующему рабочему действию.

На рисунке 4.3 представлена обобщённая оценка изменения ключевых показателей производственной деятельности оператора экскаватора в ходе имитационного обучения на тренажёрном комплексе [15].

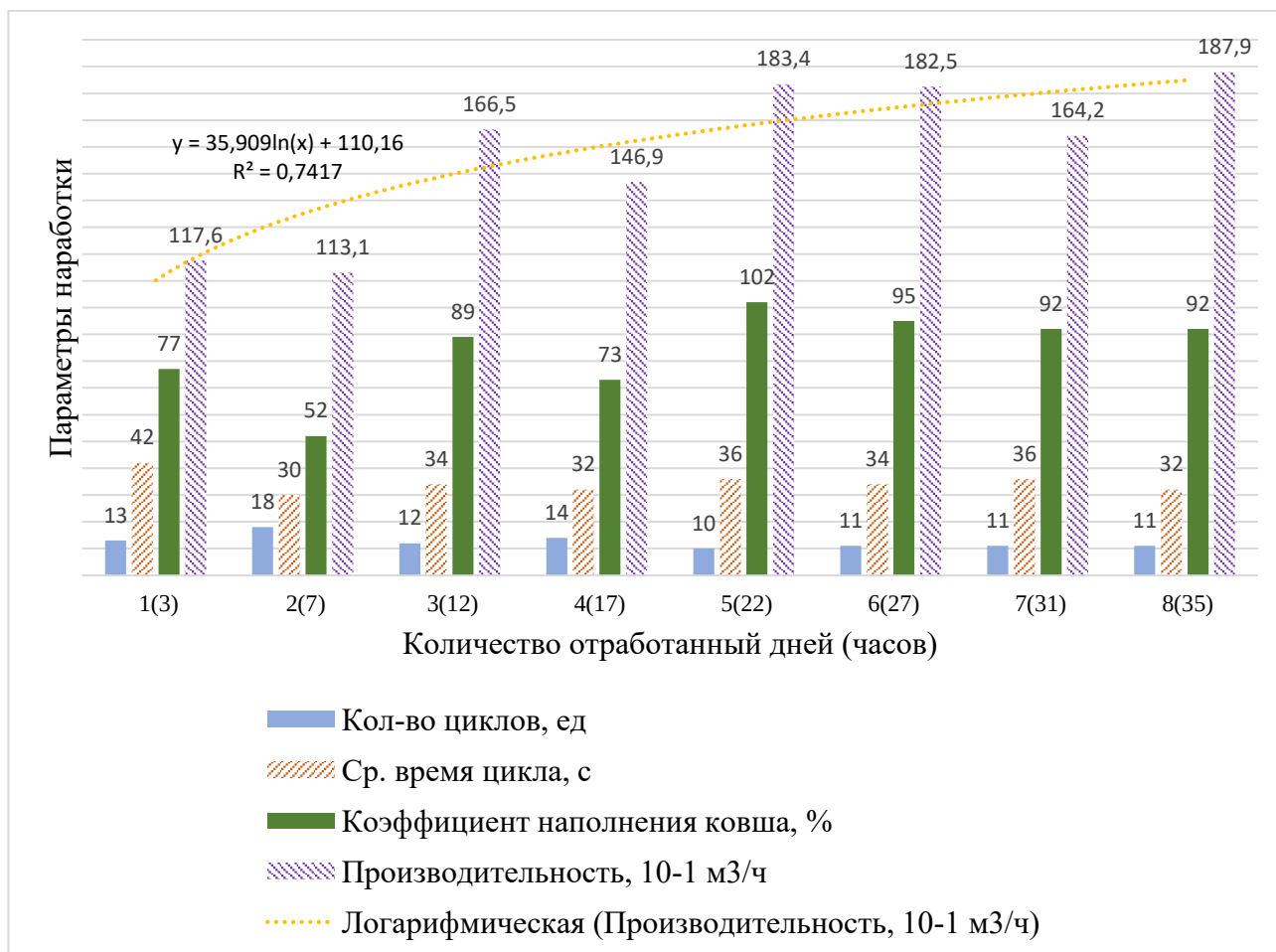


Рисунок 4.3 – Зависимость изменения параметров наработки от отработанных часов (составлено автором)

По оси абсцисс отображены этапы обучения, выраженные в виде совокупного количества отработанных дней и суммарного времени взаимодействия с системой (в скобках – количество часов). По оси ординат отражены значения четырёх основных параметров: количество выполненных рабочих циклов, среднее время одного цикла, коэффициент наполнения ковша и расчётная производительность (в пересчёте на $10^{-1} \text{ м}^3/\text{ч}$).

По мере накопления оператором опыта фиксируется устойчивая положительная динамика производительности. Кривая логарифмической аппроксимации, наложенная на значения производительности, демонстрирует тенденцию к её росту с достижением максимума к 30 – 35 часам обучения. На начальных этапах (1 – 2 день) наблюдаются существенные флуктуации: значения средней продолжительности цикла превышают 40 с, а коэффициент наполнения ковша варьирует от 52 до 77 %. По мере отработки типовых действий происходит стабилизация показателей: среднее время цикла снижается до 30 – 34 с, а коэффициент наполнения ковша выходит на устойчивый уровень 92 – 95 %, что указывает на повышение точности и уверенности операторских действий.

Максимальные значения производительности фиксируются на 5 – 6 **день** (22 – 27 ч), что коррелирует с оптимизацией продолжительности цикла и качеством наполнения ковша. После 27 часа темп прироста производительности замедляется, приближаясь к предельным значениям, что свидетельствует о достижении операторами предельного уровня усвоения базовых навыков в рамках симулируемой среды.

Полученные данные подтверждают эффективность использования тренажёрного комплекса для обучения операторов карьерных электрических экскаваторов. В ходе тренировочного процесса наблюдается устойчивое улучшение показателей производительности, сокращение времени выполнения циклов и повышение точности операций. Эти изменения указывают на формирование у обучающихся уверенных практических навыков, соответствующих требованиям реальной производственной среды. Таким образом, проведённое исследование демонстрирует значимость тренажёрных технологий в

обучении операторов сложной техники и в анализе эргатических систем, что также подчёркивается в работах [25]. Ранее показано, что системная тренажёрная подготовка напрямую влияет на эффективность эксплуатации горного оборудования [116, 117].

4.2 Результаты анализа достигаемых показателей эффективности использования карьерных экскаваторов на основе экспериментальных данных с использованием комплексного подхода

Комплексная оценка эффективности управления экскаватором требует интеграции телеметрических, временных и энергетических показателей в единую систему измерения квалификационной пригодности оператора. Такая оценка позволяет учитывать не только скорость выполнения операций, но и качество их исполнения, координацию действий, устойчивость навыка и степень реализации потенциала оборудования. Особенно важным является то, что расчёт ключевых коэффициентов может быть выполнен на основе данных, поступающих от штатной информационно-диагностической системы, без необходимости в дополнительных измерительных средствах.

Использование унифицированных коэффициентов энергоэффективности и управления исполнительными операциями позволяет выявить сильные и слабые стороны в технике работы оператора, проследить динамику профессионального роста и определить направления для дальнейшего совершенствования полученных навыков. Применение такого подхода обеспечивает объективность оценки и делает возможным её использование как в учебно-тренировочных, так и в производственных условиях.

Для подтверждения эффективности применения комплексного подхода к оценке квалификации операторов был проведён расчёт соответствующих коэффициентов на основе экспериментальных данных, полученных от одного из обучающихся, участвовавших в тренировочном курсе. Этот оператор был выбран в качестве представительного примера с целью проследить изменения ключевых характеристик на протяжении всего периода имитационного обучения. Расчётные значения коэффициентов энергоэффективности и управления исполнительными

операциями приведены на рисунке 4.4 и отражают динамику формирования профессиональных навыков оператора экскаватора в процессе прохождения тренажёрной подготовки.

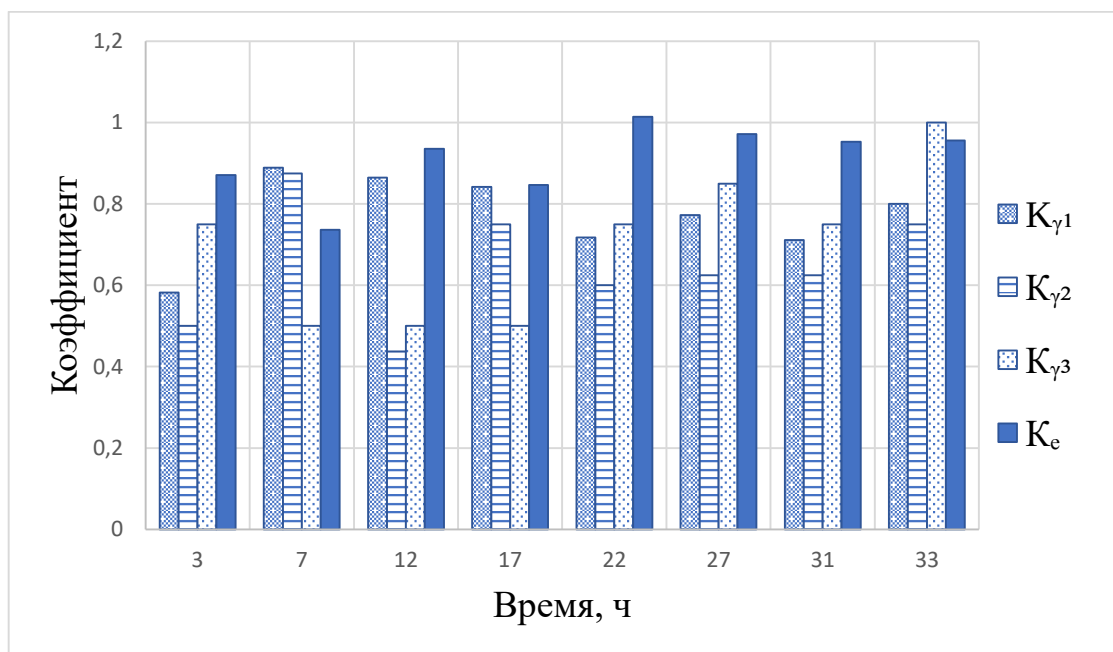


Рисунок 4.4 – Динамика изменения коэффициентов для оценки квалификации оператора в процессе обучения. Коэффициенты: K_e – энергоэффективности; $K_{\gamma 1}$ – управления операцией копания; $K_{\gamma 2}$, $K_{\gamma 3}$ – управления операциями поворота и опускания с полным и порожним ковшом соответственно (составлено автором)

На начальном этапе обучения (3 – 7 часов) значения всех коэффициенты находятся на пониженном уровне. Особенно это касается показателя $K_{\gamma 1}$, что свидетельствует о недостаточном уровне владения основными приёмами копания и слабой устойчивости операционных навыков. Показатели $K_{\gamma 2}$ и $K_{\gamma 3}$, отражающие способность оператора выполнять поворот и опускание ковша параллельно, также демонстрируют низкие значения, указывая на отсутствие навыков координирования действий.

По мере накопления опыта значения всех коэффициентов последовательно возрастают. Наиболее выраженный рост демонстрирует коэффициент энергоэффективности K_e приближающийся к единице к 27 – 33 часу обучения. В данном контексте K_e отражает степень реализации технического потенциала

машины: высокое его значение указывает на то, что наполнение ковша происходит близко к номинальной вместимости, что свидетельствует о рациональном расходовании энергии и эффективном взаимодействии оператора с оборудованием. Таким образом, рост K_e не означает снижение энергозатрат, а напротив – подтверждает приближение к рациональному уровню загрузки техники в условиях моделируемой производственной задачи, что говорит о полном использовании энергетического потенциала оборудования.

Коэффициенты K_{y2} и K_{y3} также демонстрируют положительную, но менее устойчивую динамику. K_{y3} , отражающий параллельность операций при порожнем ковше, увеличивается быстрее, что может быть связано с меньшими требованиями к точности, чем при разгрузке. Значения коэффициента K_{y2} на протяжении всего периода обучения остаются ниже, что указывает на повышенную сложность совмещения поворота и опускания при полной массе ковша, где требуется высокая координация, синхронность и аккуратность при разгрузке материала в самосвал.

К завершению тренировочного курса оператор демонстрирует признаки выхода на устойчивый режим управления: значения всех коэффициентов стабилизируются и приближаются к нормативным предельным величинам. Несмотря на сохраняющийся положительный тренд, динамика улучшения значительно замедляется, что свидетельствует о завершении фазы активного формирования базовых навыков и переходе к фазе их закрепления. Подобная картина была характерна и для других участников экспериментальной группы, что подтверждает воспроизводимость полученных результатов и позволяет говорить о типовых закономерностях адаптации оператора к функциональной модели экскаватора в рамках тренажёрной среды.

Комплексная оценка уровня квалификации оператора на тренажёре ЭКГ-18Р/20К, при достижении значений коэффициента энергоэффективности $K_e \geq 0,9$, управления операцией копания $K_{y1} \geq 0,7$, операциями поворота и опускания с полным и пустым ковшом $K_{y2}, K_{y3} \geq 0,6$, может рассматриваться в качестве допустимого критерия выхода на производственную практику.

Практика в рамках тренажёрной среды показала, что достижение указанных значений становится устойчивым к 33 – 35 часу тренажёрной подготовки. Все участники эксперимента преодолели данные пороговые уровни к этому моменту, что позволяет рассматривать объём тренировки в пределах 35 ч как достаточный для формирования у оператора уверенных, воспроизводимых навыков управления экскаватором, соответствующих требованиям реальной производственной деятельности.

Таким образом, применение комплексного подхода к оценке квалификационной готовности операторов на основе фиксируемых телеметрических данных позволяет не только зафиксировать индивидуальную динамику освоения программы повышения квалификации, но и установить объективные пороговые значения, достижение которых свидетельствует о сформированности устойчивых профессиональных навыков.

Важным преимуществом данного подхода является возможность оперативного диагностирования: анализ значений отдельных коэффициентов позволяет точно определить, какие элементы управления усвоены в достаточной мере, а какие требуют дополнительной тренировки и целенаправленного совершенствования. Это делает подход применимым не только как инструмент итоговой оценки, но и как средство текущего контроля и персонализированной коррекции образовательной траектории. Полученные результаты подтверждают диагностическую состоятельность предложенной системы показателей и обосновывают её практическую ценность как для учебных центров, так и для производственных организаций.

4.3 Результаты анализа методического подхода к оценке показателей квалификации операторов

В рамках оценки навыков оператора экскаваторной техники широко используются обобщённые коэффициенты, позволяющие на основе сравнения фактических и нормативных параметров рабочего процесса сделать количественное заключение об уровне квалификации оператора. Такие коэффициенты обладают высокой практической применимостью и легко

интерпретируются, что делает их удобным инструментом как для текущего контроля, так и для итоговой аттестации. Наибольшее распространение получили три подхода: методика П.И. Коха, методика Н.Ф. Махно и методика Н.Г. Домбровского, каждая из которых базируется на сравнении различных характеристик производственного цикла.

Методика Коха [1] опирается на временной аспект и определяет уровень управления как отношение нормативной продолжительности рабочего цикла к фактической, тем самым отражая способность оператора к темповой оптимизации процесса.

Методика Махно [57] предлагает оценку на основе удельной производительности, соотнося время, затраченное на перемещение единицы объёма породы, с нормативной величиной, что позволяет сгладить влияние абсолютной загрузки ковша и обеспечить сопоставимость между операторами, работающими в различных условиях.

Подход проф. Домбровского [34] ориентирован на объёмную результативность, сравнивая фактическую производительность с расчётной паспортной, и тем самым отражает степень приближения уровня оператора к номинальным возможностям техники.

С целью объективного сопоставления этих подходов и выявления их информативности в контексте тренажёрной подготовки был выполнен анализ соответствующих коэффициентов по данным, собранным в ходе обучения одного оператора. Представленные далее результаты позволяют проследить динамику показателей во времени, а также выявить различия в чувствительности методик к этапам формирования профессиональных навыков.

В целях оценки согласованности и аналитической чувствительности рассмотренных методик были выполнены расчёты соответствующих коэффициентов на основе телеметрических и хронометрических данных, зафиксированных в процессе поэтапной тренажёрной подготовки оператора. Это обеспечило условия для объективного сопоставления динамики показателей при неизменной экспериментальной базе. Сравнительный анализ рассчитанных

значений, представленный на рисунке 4.5, позволяет проследить характер изменения каждого из коэффициентов по мере продолжительности обучения, а также выявить различия в их отклике на стадии становления и стабилизации действий оператора.

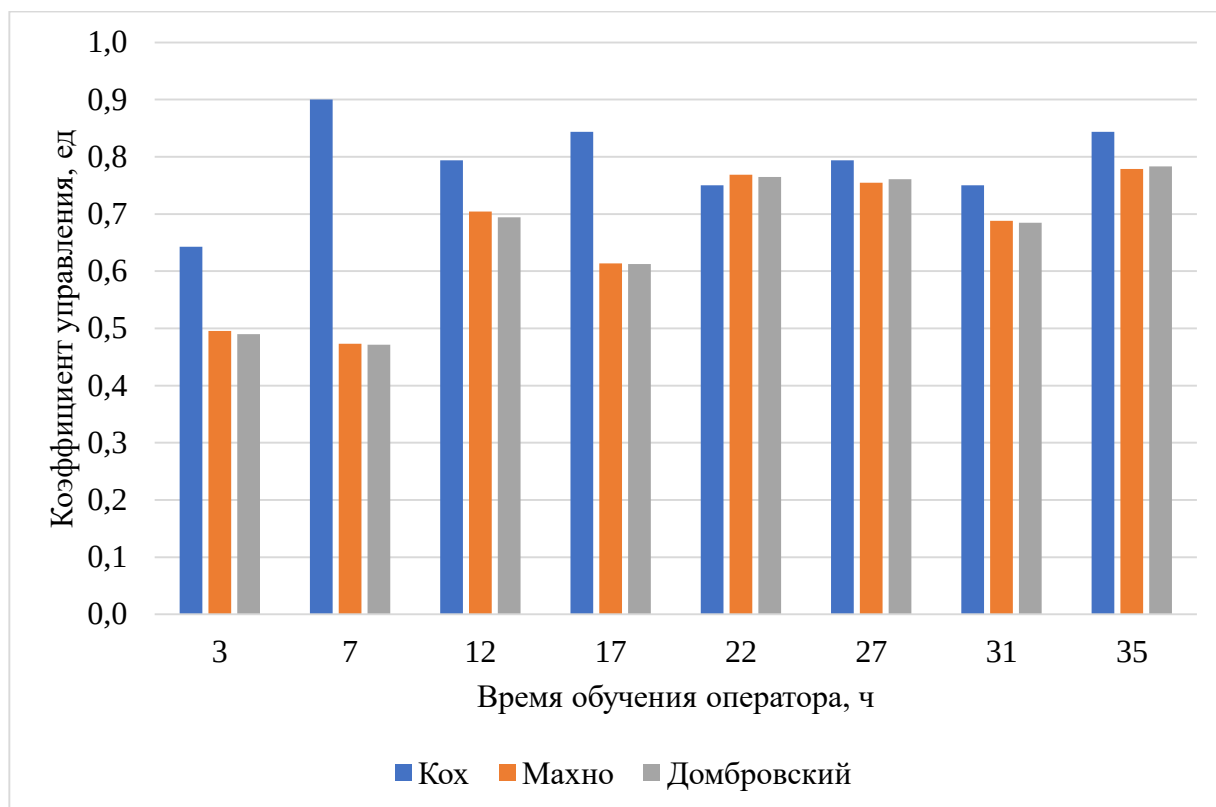


Рисунок 4.5 – Динамика изменения коэффициентов оценки квалификации оператора, рассчитанных по методикам Коха, Махно и Домбровского в процессе обучения (составлено автором)

Анализ представленных результатов свидетельствует о положительной динамике навыков управления в процессе подготовки. Наиболее выраженный рост наблюдается у коэффициента по методике Коха на начальных этапах, что обусловлено его высокой чувствительностью к изменениям времени рабочего цикла. Однако, ввиду отсутствия в модели учёта полноты загрузки и технологической завершённости операций, он подвержен переоценке результатов при формально быстром, но неэффективном выполнении цикла. В частности,

возможно формирование завышенных значений при систематическом недогрузке ковша.

В отличие от этого, методики Махно и Домбровского отражают производственную компоненту управления. Коэффициент Махно, основанный на удельной производительности, обеспечивает сопоставимость при работе с ковшами различной вместимости и фиксирует эффективную отдачу времени. Коэффициент Домбровского, напротив, сравнивает фактическую и расчётную производительность, ориентируясь на реализацию заложенного технического потенциала машины. Эти показатели демонстрируют более плавный рост и выход на стабилизированные значения к завершению обучения, что коррелирует с формированием устойчивых производственных навыков.

Завершая сравнительный анализ, следует отметить, что каждый из рассмотренных безразмерных коэффициентов отражает лишь ограниченный аспект деятельности оператора. Методика Коха фиксирует исключительно темп выполнения цикла, не учитывая полноту операций и объёмную результативность. Методика Домбровского демонстрирует чувствительность к производственной нагрузке, но остаётся подверженной влиянию логистических факторов. Удельный коэффициент Махно обеспечивает масштабную сопоставимость, но также не свободен от внешних факторов.

Таким образом, все три подхода в различной степени подвержены влиянию организационных и технологических факторов, таких как точность исходных параметров, особенности автотранспортного звена и коэффициента экскавации. Это ограничивает возможность их использования в качестве самостоятельных универсальных критериев оценки квалификации. На этом основании обоснована необходимость интегрального подхода, минимизирующего влияние внешних условий за счёт объединения различных аспектов производственной деятельности оператора.

Разработанный в настоящем исследовании комплексный критерий, основанный на оценке энергоэффективности, точности управления операцией копания и синхронности совмещённых действий, продемонстрировал более

высокую информативность и устойчивость. Зарубежные исследования также подчёркивают практическую пользу подобных методов, особенно в аспектах диагностики уровня оператора и планирования индивидуальных траекторий обучения [124]. Его структура позволяет не только объективно фиксировать уровень квалификации, но и идентифицировать конкретные элементы, требующие отработки. Предложенный интегральный показатель обладает высокой степенью адаптивности к условиям ИДС, поскольку все параметры, необходимые для его расчёта, уже фиксируются средствами телеметрии, в отличие от показателей производительности, требующих дополнительных расчётов и привязки к внешним данным. Это существенно упрощает его внедрение в контуры ИДС и повышает практическую применимость для автоматизированной оценки и управления обучением операторов.

4.4 Разработка программного обеспечения для расчета рациональных режимов работы карьерного электрического экскаватора

В рамках реализации комплексного подхода к оценке квалификации операторов карьерных экскаваторов была разработана специализированная программа, предназначенная для автоматизированного расчёта предложенных в исследовании оценочных коэффициентов. Алгоритмы расчёта основаны на параметрах рабочего цикла, характеристиках применяемого оборудования и условиях технологической среды. Программное обеспечение ориентировано на использование как в процессе имитационного обучения, так и при анализе производственной деятельности, обеспечивая единый формат вычислений и интерпретации результатов. Применение алгоритмов расчёта оценки квалификации в автоматизированных системах также рассматривается в ряде современных работ, где особое внимание уделяется переносу навыков с тренажёра на реальную технику [108, 115].

Созданная система позволяет в автоматизированном режиме рассчитывать интегральные показатели уровня подготовки, что обеспечивает объективность, воспроизводимость и оперативность диагностики. Учитывая прикладную значимость и оригинальность реализованных алгоритмов, программный продукт

прошёл процедуру патентной регистрации, было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025615717 [65] и представлено в Приложении Б.

На рисунке 4.6 продемонстрировано формирование входных параметров для расчета коэффициентов оценки квалификации оператора в виде конфигурационного файла config.json. В его структуру включены сведения, характеризующие категорию разрабатываемой горной массы, энергетические параметры оборудования, геометрические и массогабаритные характеристики экскаватора и самосвала, а также значения продолжительности операций в рамках рабочего цикла. Все данные структурированы в логически разделённые блоки: параметры работы цикла, условия эксплуатации, характеристики машины и технологической среды.

```

=== Условия расчёта (Config) ===
cat (категория породы)           : 3
nu (КПД электродвигателей)      : 0.85
// Параметры работы цикла //
cyclesTimes                      : [
    [39 45 42 38 41 37 46 42 45 37 47 47 46]
    [30 40 35 45 32 48 34 36 38 42]
]

// Параметры самосвала //

qS (ёмкость самосвала, м3)       : 180.00
hsam (высота самосвала, м)      : 5.90

// Параметры машины //

QB (ёмкость ковша, м3)           : 18.00
mB (масса ковша, кг)             : 31000.00
mTt (масса платформы, кг)       : 362100.00
NLift (мощн. прив. подъёма, Вт)  : 1120000.00
Nturn (мощн. прив. поворота, Вт) : 700000.00
Nturn (мощн. прив. напора, Вт)  : 187000,
n (высота платформы, м)         : 10.00
x (габаритный радиус, м)        : 14.50

// Условия эксплуатации //

Hlift (высота копания, м)        : 15.00
u (угол поворота, рад)           : 1.57

```

Рисунок 4.6 – Фрагмент структуры конфигурационного файла config.json, содержащего исходные параметры для расчёта коэффициентов оценки квалификации оператора (составлено автором)

Такой формат обеспечивает удобство редактирования, модификации и хранения входной информации, необходимой для проведения вычислений в программном модуле. При этом в случае интеграции программного обеспечения с системой ИДС предполагается, что значения параметров рабочего цикла будут поступать напрямую из телеметрических каналов, минуя ручной ввод и повышая тем самым автоматизацию и точность оценки. На основании данных, представленных в конфигурационном файле, в программном обеспечении выполняется последовательный расчёт ключевых параметров, характеризующих квалификацию оператора экскаватора.

На рисунке 4.7 приведён пример вывода результатов для двух периодов наблюдений.

```

=== Period #1 ===
Tavc (среднее время цикла, с)      : 42
Fill (наполняемость ковша)        : 0.769
CycleCount (кол-во циклов)         : 13
AFull (полная работа, Дж)         : 19849661
StabilityCoeff (устойчивость)       : 1.769
Waw (энергоёмкость)                : 1433586.66
Tteor (теор. время цикла)          : 27
Et (теор. кол-во затр. энергии)     : 22846776
Ky1 (коэф. управления коп.)        : 0.58
Ky2 (коэф. управления пов.)        : 0.5
Ky3 (коэф. управления пов.х.)      : 0.75
Ke (коэф. энергоэффективности)     : 0.87
Repeatness (повторяемость)          : 14.667
CoefVariance (коэффициент вариации) : 14.352
Outliers (выбросы)                 : []

=== Period #2 ===
Tavc (среднее время цикла, с)      : 34
Fill (наполняемость ковша)        : 0.887
CycleCount (кол-во циклов)         : 12
AFull (полная работа, Дж)         : 21382976
StabilityCoeff (устойчивость)       : 1.980
Waw (энергоёмкость)                : 1340444.80
Tteor (теор. время цикла)          : 27
Et (теор. кол-во затр. энергии)     : 22846776
Ky1 (коэф. управления коп.)        : 0.86
Ky2 (коэф. управления пов.)        : 0.43
Ky3 (коэф. управления пов.х.)      : 0.5
Ke (коэф. энергоэффективности)     : 0.93
Repeatness (повторяемость)          : 33.111
CoefVariance (коэффициент вариации) : 19.477
Outliers (выбросы)                 : []

```

Рисунок 4.7 – Вывод результатов, рассчитываемых программным модулем по исходным данным (составлено автором)

Для каждого временного отрезка автоматически рассчитываются показатели энергетической и временной эффективности отдельных этапов технологической операции добычи.

Таким образом, разработанное программное обеспечение обеспечивает полную автоматизацию расчёта комплекса показателей, характеризующих уровень квалификации оператора карьерного экскаватора. Реализация расчётной логики в виде отдельного программного модуля позволяет не только ускорить процесс анализа, но и обеспечить объективность, воспроизводимость и интеграцию с цифровыми платформами мониторинга и управления производством. Формализованная структура входных и выходных данных упрощает внедрение решения в существующие системы сбора телеметрической информации и создаёт предпосылки для его использования в составе интеллектуальных диагностических систем.

4.5 Практические рекомендации по применению тренажерного комплекса для повышения квалификации

На основании проведённого анализа динамики формирования навыков оператора карьерного электрического экскаватора, рассчитанных коэффициентов оценки квалификации и результатов внедрения специализированного программного обеспечения, можно сформулировать ряд практических рекомендаций, направленных на повышение эффективности подготовки машинистов карьерных экскаваторов с использованием тренажёрного комплекса.

Ключевым условием результативности обучения является его систематичность и соответствие этапам развития профессиональных умений. На ранних стадиях обучения необходимо сосредоточить внимание на снижении частоты критических ошибок и формировании базовых навыков управления, обеспечивающих безопасность и техническую грамотность действий. Объективным критерием завершения этой стадии является достижение устойчивого сокращения количества нарушений, регистрируемых средствами информационно-диагностической системы, преимущественно в пределах первых 12–15 ч тренажёрной практики.

Дальнейшая подготовка должна быть ориентирована на оптимизацию рабочих параметров оборудования. На этом этапе особую роль приобретает применение расчётных коэффициентов, характеризующих точность выполнения операций, синхронность действий и степень реализации технического потенциала оборудования. Их динамика позволяет не только оценивать общее продвижение обучающегося, но и давать рекомендации по повышению эффективности в технике выполнения этапов технологической операции копания.

Опыт тренажёрной подготовки показал, что достижение предельных значений интегральных показателей квалификации, соответствующих нормативным требованиям, становится возможным в среднем к 33–35 часу занятий. Именно это время обучения целесообразно принимать за ориентир при формировании программ обучения и планировании индивидуальных траекторий подготовки. Вместе с тем, достижение пороговых значений коэффициентов ($K_e \geq 0,9$; $K_{y1} \geq 0,7$; $K_{y2}, K_{y3} \geq 0,6$) следует рассматривать не только как критерий завершённости курса, но и как условие допуска к выполнению производственных задач в реальной среде.

Использование специализированного программного обеспечения в учебном процессе позволяет существенно повысить объективность оценки и обеспечить обратную связь между результатами выполнения упражнений и рекомендациями по их корректировке. Автоматизированный расчёт показателей и их визуализация в динамике способствуют осознанному восприятию обучающимся собственных успехов и проблемных зон, что повышает мотивацию и способствует целенаправленной работе над ошибками.

Рекомендуется интеграция разработанной системы оценки в структуру интеллектуальных тренажёрных комплексов и производственных ИДС, что позволит в перспективе организовать непрерывную диагностику профессионального уровня оператора как на этапе обучения, так и в процессе его работы. Это создаёт предпосылки для построения адаптивных программ повышения квалификации, ориентированных на конкретные индивидуальные дефициты.

Таким образом, представленный подход к обучению операторов с опорой на телеметрические данные, аналитические показатели и автоматизированную систему оценки формирует основу для построения научно обоснованной, адаптивной и высокоэффективной системы профессиональной подготовки кадров в горнодобывающей отрасли.

4.6 Выводы по главе 4

Результаты проведённых экспериментальных исследований, проведенных на базе тренажёрного комплекса карьерного гусеничного экскаватора ЭКГ-18Р/20К, свидетельствуют о высокой информативности параметров рабочего цикла при решении задач количественной оценки квалификации оператора. Последовательная регистрация хронометрических и телеметрических данных в ходе имитационной подготовки позволяет не только фиксировать текущий уровень навыков, но и отслеживать их развитие в динамике. Полученные данные легли в основу комплексной аналитической обработки, позволившей выделить закономерности становления профессиональной компетентности и определить ключевые индикаторы эффективности учебного процесса.

Выявлено, что предложенные в рамках настоящего исследования коэффициенты – в том числе показатели энергоэффективности, согласованности действий и устойчивости управления – обладают высокой чувствительностью к изменениям в технике выполнения оператором основных операций. При этом характер изменений значений коэффициентов в ходе обучения отражает переход от этапа механического воспроизведения к осознанному и устойчивому выполнению технологических задач. Достижение стабильно высоких значений интегрального показателя квалификации наблюдается, как правило, по прошествии 33–35 часов тренажёрной практики, что может быть принято за рациональный ориентир при формировании индивидуальных учебных траекторий.

Разработанное программное обеспечение, предназначенное для автоматизированного расчёта показателей квалификации, доказало свою практическую эффективность в условиях реальных учебных сессий. Программа обеспечивает точность и воспроизводимость вычислений. Важным

преимуществом является её технологическая совместимость с системой ИДС, поскольку набор необходимых входных параметров уже формируется в рамках современных комплексов сбора производственных и учебных данных.

Сравнительный анализ существующих в отрасли подходов к оценке квалификации (методики Коха, Махно, Домбровского) выявил их ограниченность и неполную пригодность к целям комплексной диагностики. Эти методики акцентируют внимание на частных аспектах деятельности оператора – таких как темп работы, объёмная производительность или её удельное значение, – при этом оставаясь чувствительными к внешним организационно-производственным факторам. Как отмечалось ранее [118], опора исключительно на один параметр не позволяет получить объективное и сбалансированное представление о квалификационном уровне.

Результаты настоящего исследования подтверждают справедливость указанного положения и подчёркивают важность интегрального подхода, в котором синтезируются временные, энергетические и управленческие характеристики, а влияние переменных внешней среды минимизируется. В этом контексте предложенный в работе метод оценки представляет собой шаг в направлении построения универсальной, технологичной и практически применимой системы контроля и управления профессиональной подготовкой операторов горнотранспортного оборудования.

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 тренажерном 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманов, А.А. О коэффициентах, влияющих на эффективность эксплуатации и управления карьерным экскаватором / А.А. Абдрахманов, Г.Г. Сафин // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 3(59). – С. 153-156.
2. Альшанская, А.А. Моделирование и численный расчет рабочего оборудования карьерного экскаватора типа ЭКГ / А.А. Альшанская // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – 2020. – С. 222-225.
3. Андреева, Л.И. О техническом сервисе горного оборудования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2006. – № 4. – С. 127-135.
4. Андреева, Л.И. К вопросу определения периодичности замены основного горнотранспортного оборудования карьера. / Л.И. Андреева, О.А. Лапаева // Горное оборудование и электромеханика. – № 6 – 2009. – С. 27-30.
5. Андреева, Л.И. Совершенствование качества ремонта горного оборудования с применением современной технологической оснастки / Л.И. Андреева, О.В. Поскотинов // Горные машины и автоматика. – 2001. – №8. – С. 27-31.
6. Бабенков, П.Ю. Моделирование рабочего процесса гидравлического экскаватора / П.Ю. Бабенков, В.С. Шестаков // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 1. – С. 10-15.
7. Баловнев, В.И. Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвёртой координаты. – М.: МАДИ, 2014. – 180 с.
8. Баловнев, В.И. Определение оптимальных параметров и выбор землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации. – М.: МАДИ, 2010. – 134 с.
9. Баловнев, В.И. Продолжительность рабочего процесса – важный показатель эффективности технологической машины / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77. – № 3. – С. 34-38.

10. Барон, Л.И. Кусковатость и методы ее измерения. – М.: АН СССР, 1982. – 121 с.
11. Безкоровайный, П.Г. Исследование нагружения рабочего оборудования гидравлического экскаватора при транспортировании ковша / П.Г. Безкоровайный, В.С. Шестаков, Т.И. Юсупов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 11-1. – С. 209-218.
12. Безкоровайный, П.Г. Оптимизация рабочего оборудования карьерного экскаватора / П.Г. Безкоровайный, В.С. Шестаков, К.А. Извеков // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. – Екатеринбург, 2022. – С. 222-225.
13. Бессонов, А. Е. Анализ функциональности карьерного электрического экскаватора с позиции эргатической системы / А. Е. Бессонов, Д. А. Шибанов, А. В. Михайлов // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2022. – С. 621-625.
14. Бессонов, А. Е. Влияние роста мощности карьерных электрических экскаваторов на параметры рабочего оборудования / А. Е. Бессонов, Д. А. Шибанов, А. В. Михайлов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГГУ, 2022. – С. 19-22.
15. 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.
16. 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.

17. **Бессонов, А.Е.** Влияние эргатической системы на ТОиР карьерных электрических экскаваторов / А. Е. Бессонов, Д. А. Шибанов, А. В. Михайлов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГГУ, 2023. – С. 349-351.

18. **Бессонов, А. Е.** Комплексный подход к повышению квалификации оператора карьерного экскаватора / А. Е. Бессонов, А. В. Михайлов // Современные проблемы машиностроения: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 2024. – С. 70-71.

19. Боярских, Г.А. Надежность и ремонт горных машин. – Екатеринбург: УГГА, 2003. – 340 с.

20. Великанов, В.С. Исследование связи между коэффициентом управления и квалификацией машиниста экскаватора / В.С. Великанов, С.С. Великанова // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – 2009. – С. 24-28.

21. Великанов, В.С. К вопросу ранжирования профессиональных навыков машиниста карьерных экскаваторов / В.С. Великанов, В.В. Олизаренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 3. – С. 315-319.

22. Великанов, В.С. Мультимедийная обучающая система для подготовки операторов горных машин и транспортно-технологических комплексов / В.С. Великанов, С.А. Семинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S9. – С. 164-171.

23. Великанов, В.С. Подготовка и тренинг операторов горнотранспортных машин с использованием компьютерного тренажёрно-моделирующего комплекса / В.С. Великанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S5. – С. 312-317.

24. Великанов, В.С. Тестовые методики и тренажёрные средства в системе повышения профессионального мастерства операторов горных машин / В.С. Великанов // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 131-133.

25. Великанов, В.С. Тренажёрная подготовка кадров для горной промышленности как системообразующий фактор в сфере обеспечения эффективной эксплуатации горного оборудования / В.С. Великанов, К.В. Исмагилов, А.А. Шабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 2. – С. 153-158.

26. Великанов, В.С. Тренажёрная подготовка как фактор обеспечения эффективной эксплуатации горного оборудования и формирования кадрового резерва горных предприятий / В.С. Великанов // Горная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 122-124.

27. Великанов, В.С. Цифровая трансформация горнодобывающих предприятий и теротехнология наземных транспортных средств / В.С. Великанов, А.В. Дремин, О.А. Лукашук, С.А. Чернухин, М.Д. Лукашук // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 1 (171). – С. 50-56.

28. Воронов, Ю.Е. Обоснование и определение показателей технического уровня карьерных одноковшовых экскаваторов / Ю.Е. Воронов, П.А. Зыков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 2. – С. 67-70.

29. Воронов, Ю.Е. Функциональный критерий оценки технического уровня и качества карьерных одноковшовых экскаваторов / Ю.Е. Воронов, П.А. Зыков, А.Ю. Воронов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2011. – № 6. – С. 3-7.

30. Ганин, А.Р. Практические результаты внедрения экскаваторов новой продуктовой линейки ООО «ИЗ'КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» на горных предприятиях России / А.Р. Ганин, Т.В. Донченко, Д.А. Шибанов // Горная промышленность. – 2013. – № 2. – С. 6-9.

31. Ганин, А.Р. Современные инженерные решения и практический опыт эксплуатации карьерных экскаваторов ЭКГ-18Р/20К производства «ИЗ-КАРТЭКС» / А.Р. Ганин, Т.В. Донченко, Д.А. Шибанов // Горное дело. – 2014. – № 1(2). – С. 40-47.

32. Гафурьянов, Р.Г. Моделирование рабочего процесса карьерных экскаваторов / Р.Г. Гафурьянов, А.П. Комиссаров, В.С. Шестаков // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 6. – С. 40-45.

33. Домбровский, Н.Г. Многоковшовые экскаваторы: конструкции, теория и расчёт. – М.: Машиностроение, 1972. – 432 с.

34. Домбровский, Н.Г. Экскаваторы: общие вопросы теории, проектирования, исследования и применения – М.: Машиностроение, 1969. – 318 с.

35. Емельянов, А.А. К вопросу оценки влияния квалификации машиниста на техническое состояние экскаватора / А.А. Емельянов, С.Л. Иванов, Д.А. Шибанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S38. – С. 442-453.

36. Емельянов, А.А. Тренажёрный комплекс карьерного экскаватора как инструмент оценки величины его остаточного ресурса / А.А. Емельянов, С.Л. Иванов, Д.А. Шибанов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – 2018. – С. 378-383.

37. Жариков, С.Н. Совершенствование расчёта производительности карьерного экскаватора / С.Н. Жариков // Записки Горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 56-61.

38. Замышляев, В.Ф. Эксплуатация и ремонт карьерного оборудования / В.Ф. Замышляев, В.И. Русихин, Е.Е. Шешко. – М.: Недра, 1991г. – 285 с.

39. Иванов, А.С. Цифровой двойник карьерного электрического экскаватора / А.С. Иванов, Д.М. Костыгова, Д.В. Казунин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № S37. – С. 151-157.

40. Капанин, Н.В. Разработка математической модели рабочего процесса карьерного экскаватора / Н.В. Капанин, В.С. Шестаков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2010. – № 24. – С. 71-76.

41. Кольга, А.Д. Влияние изменения скорости подъема ковша на надежность рукояти карьерных экскаваторов / А.Д. Кольга, Р.Х. Шарипов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. науч. тр. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГГУ», 2010. – С. 370-374.

42. Кольга, А.Д. Обоснование рациональных режимов эксплуатации выемочно-погрузочных машин / А.Д. Кольга, Р.Х. Шарипов // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. – Магнитогорск, 2010. – С. 181–184.

43. Комиссаров, А.П. Инновационные технические решения в экскаваторостроении / А.П. Комиссаров, О.А. Маслеников, Р.Ш. Набиуллин // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 6 (164). – С. 3-9.

44. Комиссаров, А.П. Особенности кинематики совместного функционирования главных механизмов и рабочего оборудования карьерного экскаватора при экскавации горных пород / А.П. Комиссаров, О.А. Лукашук, Р.Ш. Набиуллин, К.Ю. Летнев // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 1 (171). – С. 31-39.

45. Комиссаров, А.П. Оценка степени противодействия двигателей приводов главных механизмов карьерного экскаватора / А.П. Комиссаров, О.А. Маслеников, Р.Ш. Набиуллин, С.А. Хорошавин // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 6 (164). – С. 10-16.

46. Комиссаров, А.П. Математическая модель механизма рабочего оборудования карьерного экскаватора "Горный" / А.П. Комиссаров, Н.С. Плотников // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – 2019. – С. 271-275.

47. Комиссаров, А.П. Разработка имитационной модели процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора / А.П. Комиссаров, К.Ю. Летнев // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – 2019. – С. 267-270.

48. Комиссаров, А.П. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора / А.П. Комиссаров и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 156-168.

49. Костыгова, Д.М. Имитационное моделирование карьерного экскаватора ЭКГ-18Р производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС» в тренажёре подготовки машинистов / Д.М. Костыгова, А.А. Емельянов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S23. – С. 177-184.

50. Костыгова, Д. М. Курс оператора тренажёра экскаватора ЭКГ-18Р: метод. пособие / Д. М. Костыгова, В. Г. Резник; Учеб. центр ООО «ИЗ-КАРТЭКС». – Колпино: ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П. Г. Коробкова», 2018. – 60 с.

51. Кубачек, В.Р. Основы надежности горных машин / В.Р. Кубачек, Л.Г. Куклин. – Свердловск: СГИ, 1982. – 78с.

52. Лель, Ю.И. Физические принципы оценки и оптимизации параметров эксплуатации карьерного транспорта / Ю.И. Лель, И.А. Глебов, С.В. Исаков, Р.С. Ганиев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2024. – № 6. – С. 10-21.

53. Макаров, А.М. К обоснованию критерия "эталонное время" при учете труда машинистов экскаваторов / А.М. Макаров, Ю.П. Рогалис, А.В. Соколовский // Известия Уральского государственного горного университета. – 1998. – № 7. – С. 123-126.

54. Махно, Д.Е. Надежность карьерных экскаваторов, работающих в суровых климатических условиях / Д.Е. Махно, А.И. Шадрин, А.И. Анисимов, Н.Г. Карачабан // Колыма. – 1977. – № 12. – С. 23-25.

55. Махно, Д.Е. Хладноломкость и хладостойкость металлоконструкций горных машин в условиях Севера / Д.Е. Махно [и др.]. – Иркутск: ИрГТУ, 2010. – 232 с.

56. Махно, Д.Е. Эксплуатация и ремонт механических лопат в условиях Севера: Справочное пособ. / Д.Е. Махно, А.И. Шадрин. – М.: Недра, 1992. – 127 с.

57. Махно, Д.Е. К методике оценки уровня квалификации машиниста экскаватора / Д.Е. Махно, П.Я. Зельцер // iPolytech Journal. – 2011. – № 12 (59). – С. 105-107.

58. 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.

59. Набиуллин, Р.Ш. Оценка НДС и механических свойств металлоконструкции головной части стрелы экскаватора ЭКГ-20 / Р.Ш. Набиуллин // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 4 (174). – С. 46-53.

60. Олизаренко, В.В. Определение производительности одноковшового гусеничного экскаватора с учетом профессиональных навыков машиниста / В.В. Олизаренко, В.С. Великанов // Добыча, обработка и применение природного камня. – 2009. – С. 85-91.

61. Осипов, П.А. Обзор технических решений измерения массы породы в ковше электрических одноковшовых экскаваторов / П.А. Осипов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 11-1. – С. 229-238.

62. Подчасов, Е.О. Анализ точности работ, производимых рабочим механизмом одноковшового экскаватора / Е.О. Подчасов, А.Д. Терентьева // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 8 (68). – С. 4.

63. Саитов, В.И. Влияние грансостава забоя на количество отказов механизма напора экскаватора цикличного действия / В.И. Саитов, Л.И. Андреева, Т.И. Красникова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 1-9.

64. Самойлович, П.А. Техническая эксплуатация и монтаж подъемно-транспортных машин / П.А. Самойлович. – М.: Изд-во «Морской транспорт», 1955. – 348 с.

65. 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.

66. Учебная программа дополнительной профессиональной подготовки и повышения квалификации машинистов для допуска к управлению карьерными гусеничными экскаваторами: учеб. программа / ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П. Г. Коробкова». – Колпино: ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П. Г. Коробкова», 2016. – 26 с.

67. Фауль, А.А. Повышение эффективности работы комплексов карьерного оборудования / А.А. Фауль // Записки Горного института. – 2010. – Т. 186. – С. 86-89.

68. Чооду, О.А. Влияние климатических факторов на эксплуатационные показатели дорожно-строительных машин / О.А. Чооду, Э.С. Монгуш // Вестник Технические и физико-математические науки. – 2013. – №3. – С. 107-116.

69. Шадрин, А.И. Оценка живучести элементов металлоконструкций карьерных экскаваторов в условиях холодного климата / А.И. Шадрин, В.А. Храмовских // Горные машины и автоматика. – 2003. – №10. – С. 34-38.

70. Шарипов, Р.Х. Исследование влияния скорости подъема ковша на долговечность рукояти экскаваторов типа ЭКГ-5: дис. ... канд. тех. наук: / Шарипов Р.Х.; – Екатеринбург, 2011. – 85 с.

71. Шестаков В.С. Исследование нагруженности рабочего оборудования гидравлического экскаватора / В.С. Шестаков, И.В. Телиман, П.Г. Безкоровайный // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 1 (171). – С. 18-23.

72. Шибанов, Д.А. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ новой продуктовой линейки производства ИЗ-КАРТЭКС / Д.А. Шибанов, Д.И. Шишлянников, П.В. Иванова, С.Л. Иванов // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 9. – С. 3-9.

73. Шибанов, Д.А. Повышение эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов в условиях Крайнего Севера / Д.А. Шибанов, А.В. Панкратов // Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона – взгляд в будущее: III Международная конференция горнопромышленного комплекса, г. Кировск: сб. докл. – Мурманск: Северная ТПП, 2014. – С. 54.

74. Шибанов, Д.А. Эффективность функционирования карьерного экскаватора, как эргатической системы / Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, Е.И. Шешукова, Е.С. Недашковская // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 11-1. – С. 144–158.

75. Экскаватор карьерный гусеничный ЭКГ-18Р. Руководство по эксплуатации. 3550.00.00.000 РЭ. Том 1/ В.М. Донской [и др.]. – Колпино: ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова», 2010. – 122 с. Инв.№ 81625.

76. Экскаватор карьерный гусеничный ЭКГ-18Р. Руководство по эксплуатации. 3550.00.00.000 РЭ. Том 2/ В.М. Донской [и др.]. – Колпино: ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова», 2010 г. - 97 с. Инв.№ 81525.

77. Adebayo, B. Effect of rock properties on excavation-loading operation in selected quarries / B. Adebayo, A.E. Aladejare // *Advanced Materials Research*. – 2013. – V. 824. – pp. 86-90.

78. Akyeampong, J. A hydraulic excavator augmented reality simulator for operator training / J. Akyeampong, E. Daniel, R. Adjei et al. // *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. – 2012. – pp. 1511-1518.

79. Babaei Khorzoughi, M. A study of digging productivity of an electric rope shovel for different operators / M. Babaei Khorzoughi, R. Hall // *Minerals*. – 2016. – V. 6. – No. 2. – P. 48.

80. Bernold, L.E. Quantitative assessment of backhoe operator skill / L.E. Bernold // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2007. – V. 133. – No. 11. – pp. 889-899.

81. Beyglou, A. Target fragmentation for efficient loading and crushing – the Aitik case / A. Beyglou, D. Johansson, H. Schunnesson // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2017. – V. 117. – No. 11. – pp. 1053-1062.

82. Bhalerao, B.N. Use of PC-based simulators to train basic control functions of a hydraulic excavator: audiovisual instruction contrasted with hands-on exploration / B.N. Bhalerao, P.S. Dunston, R.W. Proctor // *International Journal of Human-Computer Interaction*. – 2017. – V. 33. – No. 1. – pp. 66-74.

83. Bucket Fill Factors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/bucket-fill-factors.html (дата обращения: 20.06.2025).

84. Burt, C.N. Equipment selection for surface mining: a review / C.N. Burt, L. Caccetta // *Interfaces*. – 2014. – V. 44. – No. 2. – pp. 143-162.

85. Choudhary, B. Influence of front row burden on fragmentation, muckpile shape, excavator cycle time, and back break in surface limestone mines / B. Choudhary, R. Arora // *Iranian Journal of Earth Sciences*. – 2018. – V. 10. – No. 2. – pp. 1-10.

86. Choudhary, B. S. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines // *Mining of Mineral Deposits*. – 2019. – V. 13. – No. 3. – pp. 119-126.

87. Cirolia, F. The effects of airborne contaminants on electronic power supplies / F. Cirolia, C. Finan // *IEEE APEC 2001*, V. 1, 4–8 March 2001. – pp. 238-242.

88. Couceiro, P. The influence of blasting energy factor on the loading performance / P. Couceiro, B. Santos // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. – 2019. – V. 8. – No. 6. – pp. 731-735.

89. Dayo-Olupona, O. et al. Adoptable approaches to predictive maintenance in mining industry: An overview // *Resources Policy*. – 2023. – V. 86. – P. 104291.

90. Dubinkin, D.M. Influence of geotechnical factors on the output of quarry haul trucks / D.M. Dubinkin, N.A. Krasnoschekova, S.V. Petrov, M.S. Smirnova // *AIP Conference Proceedings*. – 2022. – V. 2486. – No. 1. – P. 040009.

91. Dunston, P.S. Challenges in evaluating skill transfer from construction equipment simulators / P.S. Dunston, R.W. Proctor, X. Wang // *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. – 2014. – V. 15. – No. 4. – pp. 354-375.

92. Dunston, P.S. Principles for utilization of construction equipment operator training simulators / P.S. Dunston, X. Wang, R. Slocum // *Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice*. – 2010. – pp. 1039-1046.

93. Hemami, A. Resistance of particulate media to excavation: Application to bucket loading / A. Hemami, S. Goulet, M. Aubertin // *International Journal of Surface Mining and Reclamation*. – 1994. – V. 8. – No. 3. – pp. 125-129.

94. Ivanov, S. L. Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators / S. L. Ivanov, P. V. Ivanova, S. U. Kuvshinkin

//Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – V. 1399. – No. 4. – P. 044070.

95. Ivanov, S.L. Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation / S.L. Ivanov, P.V. Shishkin P.V. //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – V. 87. – No. 2. – P. 022009.

96. Kujundžić, T. Influence of crushed rock properties on the productivity of a hydraulic excavator / T. Kujundžić, M. Malbašić, S. Trivunić, D. Nikolić, V. Milisavljević // Applied Sciences. – 2021. – V. 11. – No. 5. – P. 2345.

97. Kurganov, V.M. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes / V.M. Kurganov, M.V. Gryaznov, S.V. Kolobanov // Journal of Mining Institute. – 2020. – V. 241. – pp. 10-21.

98. Mammen, J. A study on the effect of moisture content on rock cutting performance. / J. Mammen, S. Saydam, P.A Hagan // Underground Coal Operators' Conference – 2009. – pp. 340-347.

99. Manyele, S.V. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time / S.V. Manyele, F. Mtalo, J. Makole, J. Msofe // Engineering. – 2017. – V. 9. – No. 7. – P. 599.

100. 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.

101. Mikhailov, A.V. Impact Evaluation of Excavator Positioning on Open Pit Slope Stability / A.V. Mikhailov, C. Bouguebrine, D.A. Shibarov, A.E. Bessonov // International Journal of Engineering – Transactions A: Basics. – 2025. – V. 38. – No. 1. – pp. 99-107.

102. Mining for efficiency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pwc.com.au/industry/energy-utilities-mining/assets/mining-efficiency-aug14.pdf?utm_source (дата обращения: 20.06.2025).

103. Nasonov, M.Y. Effects of working conditions on excavator performance-longevity of metal structures / M.Y. Nasonov, Y.V. Lykov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 194. – No. 4. – P. 042017.

104. Özdoğan, M. Cycle time segments and cycle time distribution curves of mining size wheel loaders – a case study / M. Özdoğan, H. Özdoğan // Scientific Mining Journal. – 2017. – V. 56. – No. 1. – pp. 13-21.

105. Özdoğan, M. Cycle time segments of electric rope shovels – a case study / M. Özdoğan, H. Özdoğan // Bilimsel Madencilik Dergisi. – 2019. – V. 58. – No. 1. – pp. 73-79.

106. Peak performance excavator selection. Practices. Harnischfeger Corporation. – 2003. – p. 76.

107. Pasamehmetoğlu, A.G. Performance assessment of hydraulic and cable shovels / A.G. Pasamehmetoğlu, C. Karpuz, Y. Muftiioglu // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 1992. – V. 6. – No. 2. – pp. 73-80.

108. Proctor, R.W. Human interactions with an excavator simulator: Assessing two patterns of joystick control mappings / R.W. Proctor, B.S. Thomas, P.S. Dunston // Human-Automation Interaction: Manufacturing, Services and User Experience. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – pp. 579-596.

109. Repin, S. Automotive shock absorbers applicability for damping resonant oscillations in construction machines / S. Repin, R. Litvin, V. Kuzmichev, I. Vorontsov // Architecture and Engineering. – 2021. – V. 6. – No. 1. – pp. 81-87.

110. Rybak, J. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing / J. Rybak, M.M. Khayrutdinov, D.A. Kuziev, C.B. Kongar-Syuryun, N.V. Babyr // Journal of Mining Institute. – 2022. – V. 253. – pp. 61-70.

111. Qian, Q. Dynamic strength of rocks and physical nature of rock strength / Q. Qian, C. Qi, M. Wang // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2009. – V. 1. – No. 1. – pp. 1-10.

112. Sekizuka, R. Evaluation system for hydraulic excavator operation skill using remote controlled excavator and virtual reality / R. Sekizuka, Y. Sugimoto, M. Kase, T.

Ogasawara // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2019. – pp. 3229-3234.

113. Sekizuka, R. System to evaluate the skill of operating hydraulic excavators using a remote controlled excavator and virtual reality / R. Sekizuka, Y. Sugimoto, M. Kase, T. Ogasawara // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2020. – V. 6. – P. 142.

114. Shibarov, D.A. Adapting standard maintenance approaches for mining excavators to actual operating condition / D.A. Shibarov, S.L. Ivanov, K.A. Safronchuk, V.I. Knyazkina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2020. – V. 966. – No. 1. – P. 012138.

115. So, J.C.Y. Better retention of skill operating a simulated hydraulic excavator after part-task than after whole-task training / J.C.Y. So, A. Abdullah, M. Wang et al. // *Human Factors*. – 2013. – V. 55. – No. 2. – pp. 449-460.

116. So, J.C.Y. Impact of interrupting simulated hydraulic excavator training with simulated loader training / J.C.Y. So, R.W. Proctor, P.S. Dunston // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. – Sage CA: Los Angeles, CA : SAGE Publications, 2012. – V. 56. – No. 1. – pp. 2482-2486.

117. So, J.C.Y. Training on perceptual-motor tasks using simulated construction equipment / J.C.Y. So, R.W. Proctor, P.S. Dunston // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. – Sage CA: Los Angeles, CA : SAGE Publications, 2014. – V. 58. – No. 1. – pp. 2360-2364.

118. So, J.C.Y. Transfer of operator training from simulated to real hydraulic excavators / J.C.Y. So, A. Abdullah, M. Wang et al. // *Construction Research Congress 2016*. – 2016. – pp. 1968-1977.

119. Su, X. Influence of training schedule on development of perceptual–motor control skills for construction equipment operators in a virtual training system / X. Su, L. Wang, P.S. Dunston, X. Fang // *Automation in Construction*. – 2013. – V. 35. – pp. 439-447.

120. Ta, C.H. A linear model for surface mining haul truck allocation incorporating shovel idle probabilities / C.H. Ta, A. Ingolfsson, J. Doucette // *European Journal of Operational Research*. – 2013. – V. 231. – No. 3. – pp. 770-778.

121. Tosun, A. Determination of excavator type according to rock and excavator characteristics in soft formations that can be excavated directly // *Journal of Mining Science*. – 2014. – V. 50. – pp. 349-361.

122. Vahdatikhaki, F. Feedback support system for training of excavator operators / F. Vahdatikhaki, A. Hammad, S. Abdirad, L. olde Scholtenhuis // *Automation in Construction*. – 2022. – V. 136. – pp. 104188.

123. Vahdatikhaki, F. Digital Twin-based Instructor Support System for Excavator Training / F. Vahdatikhaki, L. olde Scholtenhuis, A. Doree // *41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2024*. – International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2024. – pp. 521-528.

124. Wang, X. Heavy equipment operator training via virtual modeling technologies / X. Wang, P.S. Dunston // *Construction Research Congress 2005: Broadening Perspectives*. – 2005. – pp. 1-10.

125. Warren, A.D. Effect of Motion Feedback on Skill Acquisition: Training Performance using an Excavator Simulator / A.D. Warren, R.W. Proctor, P.S. Dunston // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. – Sage CA: Los Angeles, CA : SAGE Publications, 2023. – V. 67. – No. 1. – pp. 1329-1330.

126. Woodard, P. Construction knowledge transfer through interactive visualization / P. Woodard, T. Bohn, C. Clark et al. // *Learning by Playing. Game-based Education System Design and Development: 4th International Conference on E-Learning and Games, Edutainment 2009, Banff, Canada, August 9–11, 2009. Proceedings 4*. – Springer Berlin Heidelberg, 2009. – pp. 339-350.

127. Zenkov, S.A. Improving the efficiency of excavators at low temperatures / S.A. Zenkov, D. Lkhanag // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – V. 786. – No. 1. – P. 012062.

128. Zenkov, S.A. Defining parameters of thermal exposure equipment for buckets of mine excavators / S.A. Zenkov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 272. – No. 2. – P. 022147.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

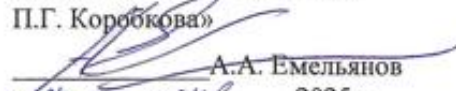
Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

 ИЗ-КАРТЭКС ИМЕНИ П.Г.КОРОБКОВА	Общество с ограниченной ответственностью "ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова"	
	Ижорский завод, д. б/н, г. Санкт-Петербург, Колпино, 196650, тел.:(812) 647-06-09, факс: (812) 647-74-10	
	iz-kartex@iz-kartex.com	www.uralmash-kartex.ru
	ОКПО 74816237 / ОГРН 1047855158780	ИНН 7817301375 / КПП 781701001

01121/25-9273
от 04.06.2025

УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор
ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени
П.Г. Коробкова»


А.А. Емельянов
« 04 » июня 2025 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации
Бессонова Александра Евгеньевича
по научной специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Настоящим составлен акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование рациональных режимов работы карьерного электрического экскаватора как эргатической системы», представленной на соискание учёной степени кандидата наук, будут использованы для совершенствования методов контроля ресурса карьерных электрических экскаваторов ЭКГ-18Р и ЭКГ-20К в виде экспериментальных данных по исследованию эргатической системы в процессе их эксплуатации.

Использование выявленных на основе проведённых в диссертации исследований позволило повысить точность оценки состояния оборудования, сократить затраты на техническое обслуживание, увеличить срок службы экскаваторов и повысить производительность труда при эксплуатации карьерной техники.

Председатель комиссии:

Главный конструктор
(должность)

Члены комиссии:

Главный конструктор проекта
(должность)

Главный конструктор проекта
(должность)

Зав. отделом рабочего оборудования
(должность)

		Емельянов А.А. (ФИО)
		Абрамов А.В. (ФИО)
		Ермаков А.В. (ФИО)
		Шефов Д.Ю. (ФИО)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025615717

**Программа определения комплексного показателя
производственной эффективности карьерных
электрических экскаваторов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Михайлов Александр Викторович (RU), Шибанов
Даниил Александрович (RU), Бессонов Александр Евгеньевич
(RU)*

Заявка № **2025612877**
Дата поступления **19 февраля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **07 марта 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Унифицированный экскаватор ЭКГ-18Р/20К

Экскаватор ЭКГ-18Р/20К - современный высокотехнологичный экскаватор новой продуктовой линейки производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П.Г. Коробкова», отвечающий современным требованиям эргономики и безопасности горного производства. Унифицированный экскаватор ЭКГ-18Р/20К – первый российский экскаватор, спроектированный полностью на базе новейших технологий 3D-проектирования. ЭКГ-18Р/20К предназначен для выемки и погрузки скальных, полускальных и рыхлых горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Экскаватор комплектуется электрическим приводом постоянного тока по схеме «ТП-Д» с силовыми статическими преобразователями и микропроцессорной системой управления.



Рисунок А.1 – Карьерные экскаваторы ЭКГ-18Р (слева) и ЭКГ-20К (справа)

Таблица В.1 – Основные технические характеристики экскаваторов производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова»

Параметры	ЭКГ-18Р	ЭКГ-20К
Типа напорного механизма	реечный	канатный
Вместимость основного ковша, м ³ (при насыпной плотности 2,0 т/м ³)	20	20
Диапазон вместимости сменных ковшей, м ³	16-26	18-28
Рекомендуемая грузоподъемность транспорта, т	120-180	120-180
Полезная нагрузка на ковш, т	40	40
Усилие на блоке ковша тах, т	170	170
Усилие напорное тах, т	75	75
Продолжительность рабочего цикла, с	27	27
Высота копания тах, м	16,0	17,3
Радиус копания тах, м	21,7	22,8
Радиус копания на уровне стоянки, м	15,5	16,0
Радиус разгрузки тах, м	18,7	19,4
Высота разгрузки тах, м	10,2	1,2
Масса эксплуатационная, т	740	770
в т.ч. масса противовеса, т	45	45
Удельное давление на грунт, кПа	245	240
Высота экскаватора, м:		
- по головным блокам	17,2	19,2
- по двуногой стойке	14	14
Габаритный радиус, м		
- по головным блокам	14,5	17,2
- по поворотной платформе	9,65	9,65
Габаритная ширина, м	10,0	10,0
Зазор под поворотной платформой, м	3,5	3,5
Уровень глаз оператора, м	9,75	9,75
Напряжение, кВ	6	6
Частота, Гц	50	50
Электродвигатели главных приводов	Мощность, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹
Привод подъема	2х560	540
Привод напора	220	600
Привод поворота	2х350	900
Привод хода	2х200	750

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Карьерный самосвал БелАЗ-75306

Карьерный самосвал БелАЗ-75306 грузоподъемностью 220 т предназначен для перевозки горной массы в сложных горнотехнических условиях глубоких карьеров, на открытых разработках месторождений полезных ископаемых по технологическим дорогам в различных климатических условиях эксплуатации (при температуре окружающего воздуха от -50 до +50 °С).



Рисунок Г.1 – Карьерный самосвал БелАЗ-75306 грузоподъемностью 220 т

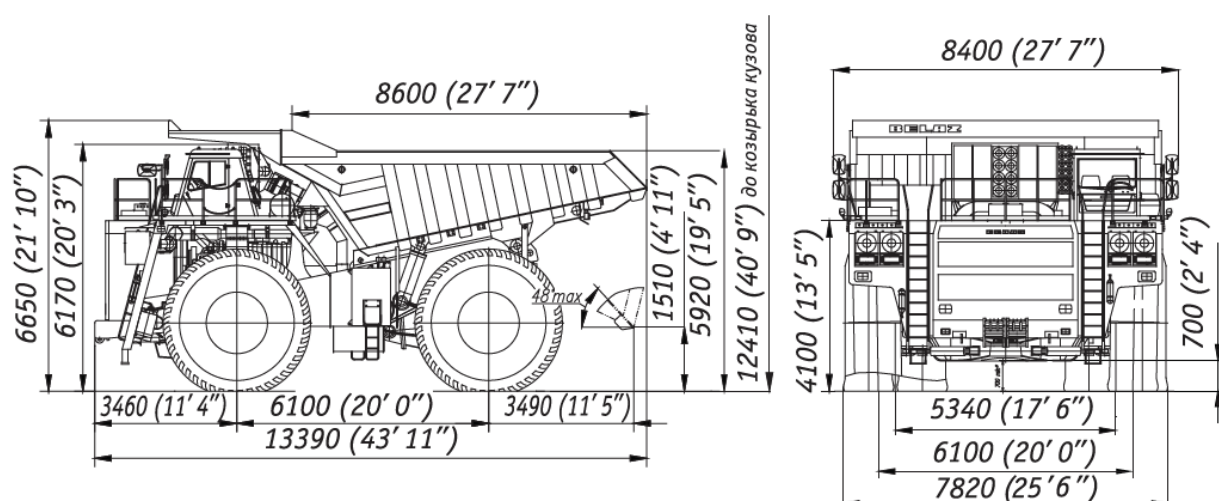


Рисунок Г2 – Габаритные размеры, мм

Таблица Г.1 – Основные технические характеристики карьерного самосвала БелАЗ-75306

Параметры	Величина
Мощность двигателя, кВт	1715; 1864
Трансмиссия	Электропривод переменного тока с тяговым генератором
Крутящий момент, Н·м / (мин ⁻¹)	9053; 9839/1500
Удельный расход топлива при номинальной мощности, г/ кВт·ч	202
Шины	40.00R57; 46/90-57
Подвеска	Зависимая для передних и задних колес
Максимальная скорость, км/ч	43
Угол поворота управляемых колес, град.	39
Радиус поворота, м	15
Габаритный диаметр поворота, м	24
Максимальное давление в гидросистеме, МПа	18
Цилиндры подъема кузова	Телескопические, трехступенчатые с одной ступенью двойного действия
Время подъема кузова, с	22
Время опускания кузова, с	33
Топливный бак, л	2900
Гидравлическая система, л	790
Система охлаждения двигателя, л	635
Система смазывания двигателя, л	290
Распределение массы самосвала по осям, %:	
без груза	
– передняя	45
– задняя	55
с грузом	
– передняя	33
– задняя	67
Кузов	Ковшового типа, с системой безопасности FOPS
Наибольшая масса груза (грузоподъемность) самосвала, кг	220000
Масса самосвала без груза, кг	156100
Полная масса, кг	376100

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Ведомость учета результатов заданий

ВЕДОМОСТЬ УЧЕТА РЕЗУЛЬТАТОВ ЗАДАНИЯ «07 разработка»

группа 1, Иван И.
(группа, фамилия, инициалы)
07:00. без осадков
(время суток, погодные условия)
07 разработка контр уг. белаз 220 лето. Работа с грунтом - 07 разработка
(упражнение, тип задания, задание)

Дата выполнения задания	Выполнение оценочных показателей		
	Объем выполненной работы, м³	Среднее время рабочего цикла, мин:с	Производительность, м³/час
1	2	3	4
13.05.2022 10:24-10:43	180,37	02:27	549,92

Допущенные ошибки:

№ п/п	Ошибка	Количество повторений,
1	Предупреждение: сработала защита от ударов рукояти при напоре и возврате	4
2	Запрещенное состояние: удар ковшом о грунт	2
3	Запрещено начало работы без подачи звукового сигнала	2
4	Запрещено перемещение экскаватора без подачи звукового сигнала	2
5	Запрещен поворот платформы, если ковш погружен в породу	1
6	Запрещенное состояние: стопор в приводе поворота	1
7	Запрещено перемещение экскаватора, если ковш погружен в породу	1

Рисунок Д.1 – Пример ведомости о выполнении упражнения на тренажерном комплексе ЭКГ-18/20К

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Перечень контролируемых ошибок оператора

Таблица Е.1 – Перечень контролируемых ошибок тренажерным комплексом ЭКГ-18/20К

№	Ошибка	Когда происходит
1	Начало работы без подачи звукового сигнала	При попытке начать экскавацию без подачи звукового сигнала
2	Перемещение экскаватора, если ковш погружен в породу	При включении режима "Ход", если ковш соприкасается с породой
3	Перемещение экскаватора без предварительной подачи звукового сигнала	Включен режим "Ход" и начато движение вперед или назад без предварительного звукового сигнала
4	Поворот платформы, если ковш погружен в породу	При попытке повернуть платформу, если ковш соприкасается с породой
5	Нерекомендованное состояние: стопор в приводе напора	Сопротивление породы напору ковша слишком велико и рукоять более 5 секунд не выдвигается, поскольку пребывает "в упертом положении". Возможно смещение стрелы и провисание вант.
6	Нерекомендованное состояние: стопор в приводе подъема	Сопротивление породы подъему ковша слишком велико и ковш более 5 с не поднимается; возможно поддомкрачивание (опрокидывание) экскаватора
7	Управление приводами при наложенных тормозах	При попытке работать приводами подъема, напора или поворота в состоянии "Наложены тормоза"
8	Запрещенное состояние: задевание ковшом экскаватора за технику	Задевание/удар ковшом за гусеницу и другие части экскаватора или самосвала
9	Запрещенное состояние: наезд на препятствие	При наезде гусеницей на непреодолимое препятствие
10	Запрещенное состояние: наезд на кабель	При наезде гусеницей на питающий кабель
11	Запрещенное состояние: падение экскаватора	При превышении допустимых углов крена
12	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Отключение питания"	Если время реакции до правильного ответного действия "Включение аварийного освещения" составило более 20 с

Продолжение таблицы Е.1

№	Ошибка	Когда происходит
13	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Срабатывание защиты"	Если время реакции до правильного ответного действия "Переключение страниц на ИДС" составило более 20 с
14	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Обрыв ванта"	Если время реакции до правильных ответных действий "Уложить ковш на землю, опустить лестницу и штатно выключить экскаватор" составило более 20 с
15	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Обрыв подъемного каната"	Если время реакции до правильных ответных действий "Уложить ковш на землю, опустить лестницу и штатно выключить экскаватор" составило более 20 с
16	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Потеря зуба ковша"	Если время реакции до правильных ответных действий "Уложить ковш на землю, опустить лестницу и штатно выключить экскаватор" составило более 20 с
17	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Падение давления в пневмосистеме"	Если с момента ввода нештатки до правильных ответных действий "Уложить ковш на землю, опустить лестницу и штатно выключить экскаватор" прошло более 20 с
18	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Перегрев подшипников"	Если время реакции более 3 мин до завершения ответных действий: догрузить самосвал; опустить ковш на землю; отключить питание главных приводов; переключить экраны ИДС до отображения причины нештатки.
19	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Перегрев электродвигателя"	Если время реакции более 3 мин до завершения ответных действий: догрузить самосвал или остановиться, если ход; опустить ковш на землю; отключить питание главных приводов; переключить экраны ИДС до отображения причины нештатки.
20	Превышено время реакции на нештатную ситуацию "Перегрев редуктора"	Если время реакции более 3 мин до завершения ответных действий: догрузить самосвал или остановиться, если ход; опустить ковш на землю; отключить питание главных приводов; переключить экраны ИДС до отображения причины нештатки.