

На правах рукописи

Бугебрин Шуаиб



**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО
ЭКСКАВАТОРА НА СЛАБОУСТОЙЧИВЫХ УСТУПАХ
КАРЬЕРОВ НЕРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

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

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Михайлов Александр Викторович

Официальные оппоненты:

Рахутин Максим Григорьевич

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

Хорошавин Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра горных машин и комплексов, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет», г. Тверь.

Защита диссертации состоится **18 сентября 2026 г. в 12:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д.2, аудитория № 1171.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современное развитие горнодобывающей отрасли характеризуется устойчивым ростом объёмов добычи нерудных полезных ископаемых, в частности, широко распространённых песка и торфа, что обусловлено их применением в строительной отрасли и также агропромышленным и природоохранным применением. Так, по данным 2022 года, объём добычи песка в Алжире составил более 3 млн т; в Российской Федерации объёмы добычи торфа и песка достигли порядка 1,3 млн т и 45 млн т соответственно.

Выемка нерудных материалов представляет собой процесс открытой разработки полезного ископаемого путём формирования карьера, отрабатываемого, как правило, одним выемочным уступом.

При применении комплекта оборудования «экскаватор-самосвал» следует отметить важность рационального позиционирования оборудования на уступе карьера с учётом ряда факторов: номинального давления на грунт, угла откоса, бермы, параметров оборудования и соблюдения зон безопасности при эксплуатации.

В этих условиях применения система искусственного интеллекта (ИИ) в алгоритме управления позиционированием на уступе карьера может существенно повысить производительность комплекта оборудования, безопасности при выполнении работ с адаптацией технологических режимов к изменяющимся условиям и минимизацией рисков потери устойчивости.

Таким образом, обоснование рационального позиционирования экскаватора на уступе нерудных материалов является актуальной задачей, направленной на разработку методов согласования действий оператора с функциональными возможностями машины.

Степень разработанности темы исследования

Решением задач организации производства на карьерах нерудных материалов и повышения эффективности использования карьерного оборудования занимались такие ученые, как: Андреева Л.И., Буянов Ю.Д., Великанов В.С., Гавришев С.Е., Зюзин Б.Ф., Иванов С.Л., Капустин Ю.Е., Коваленко В.С., Комиссаров А.И., Лагу-

нова Ю.А., Миронов В.А., Михайлов А.В, Подэрни Р.Ю., Рахутин М.Г., Ржевский В.В., Репин С.В., Трубецкой К.Н., Фомин С.И., Холодняков Г.А., Шпанский О.В. и ряд других.

Ими предложены оценочные методы позиционирования экскаватора на карьерном уступе. Ряд авторов предложил определять расстояние до бермы на уступах карьеров нерудных материалов на основе коэффициента запаса устойчивости. Требуется дальнейшее развитие исследований по позиционированию экскаватора на уступе карьера нерудных материалов с учетом факторов, которые могут влиять на позиционирование и процесс экскавации.

Объект исследования – процесс функционирования карьерного гидравлического экскаватора при добыче нерудных материалов (песок, торф).

Предмет исследования – закономерности и параметры рационального позиционирования гидравлического экскаватора на уступе карьера при добыче нерудных материалов на слабых грунтах применением элементов искусственного интеллекта, системы поддержки и принятия решений.

Цель работы – повышение производительности гидравлического экскаватора при отработке нерудных материалов на слабых грунтах.

Идея заключается в том, что для достижения поставленной цели позиционирование гидравлического экскаватора на уступах карьера со слабыми и неустойчивыми грунтами необходимо производить с использованием алгоритма управления функционированием экскаватора в рабочей зоне, учитывающего физико-механические свойства грунта и взаимодействие с самосвалом.

Задачи исследования:

1. Провести анализ условий функционирования одноковшового гидравлического экскаватора при разработке залежей нерудных материалов на слабых грунтах с выявлением факторов, ограничивающих его функциональность.

2. Провести экспериментальные исследования в лабораторных условиях на моделях уступов карьеров нерудных материалов под

воздействием нагрузок от модели экскаватора при различных значениях основных факторов: номинального давления на грунт и различных углах откоса и ширины бермы.

3. Разработать математическую модель устойчивости гидравлического экскаватора на уступе карьера нерудных материалов на основе определения коэффициента запаса устойчивости в зависимости от основных факторов.

4. Разработать алгоритм управления позиционированием экскаватора с элементами искусственного интеллекта в рамках системы поддержки и принятия решений для формирования рационального позиционирования и управления рабочим циклом экскаватора.

5. Разработать практические рекомендации по рациональному позиционированию и управлению рабочим циклом гидравлического экскаватора при добыче нерудных материалов на слабоустойчивых уступах карьеров.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель рационального позиционирования гидравлического экскаватора на слабоустойчивых уступах карьеров при добыче нерудных материалов, учитывающая номинальное давление на грунт, угол откоса уступа, ширину бермы для выполнения условия устойчивости экскаватора на уступе.

2. Разработан алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений по выбору рационального позиционирования гидравлического экскаватора на уступе карьера, основанный на интеграции данных о геометрии уступа, физико-механических характеристик грунта и номинальном давлении на грунт, обеспечивающий автоматизированный контроль допустимых режимов функционирования машин.

Соответствие паспорту научной специальности. Полученные научные результаты соответствует паспорту специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по 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».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны математические модели, учитывающие номинальное давление на грунт, угол откоса и пространственное позиционирование гидравлического экскаватора. Получены расчётные зависимости (отдельно для условий добычи песка, торфа), позволяющие прогнозировать устойчивость гидравлического экскаватора на уступах при заданных параметрах.

2. Разработан алгоритм управления позиционированием гидравлического экскаватора на слабоустойчивых уступах карьеров при добыче нерудных материалов, обеспечивающий автоматическую корректировку в зависимости от геометрии уступа и параметров грунта.

3. Разработано техническое решение на устройство для контроля рабочей зоны экскаватора (патент на изобретение № 2855340), разработан комплект программ для ЭВМ: программа помощи оператору при позиционировании экскаватора на уступе нерудных карьеров; программа контроля рабочей зоны экскаватора при позиционировании на уступе нерудных карьеров; программа контроля осадки ходовой части экскаватора при работе на уступах нерудных карьеров (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №№ 2025615460, 2025664988, 2025666286).

4. Результаты работы использованы в производственной деятельности компании ООО «Мелиоратор» путем применения рекомендаций по внедрению системы управления позиционированием экскаватора на песчаном карьере с применением сенсоров наклона типа LiDAR (акт внедрения от 14.01.2026 г.).

5. Результаты работы использованы в производственной деятельности компании ООО «БХЗ» при разработке проекта организации ведения горных работ на торфяном месторождении «Ларьянское» путем применения рекомендаций по внедрению системы контроля осадки ходовой части экскаватора на слабом торфяном основании и увеличению устойчивости гидравлического экскаватора на водонасыщенных и слабонесущих уступах торфяных карьеров (акт внедрения от 16.12.2025 г.).

Методология и методы исследования. В ходе выполнения работы применялся комплексный метод исследований, включающий

анализ и обобщение научно-технической и патентной информации, проведение экспериментальных исследований на образцах натурального материала, а также использование методов планирования эксперимента, математической статистики и регрессионного анализа на основе стандартного программного обеспечения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель устойчивости гидравлического экскаватора на уступе карьера устанавливает зависимость коэффициента запаса устойчивости от номинального давления на грунт (NGP), угла откоса (α) и ширины бермы (B) с коэффициентами весомости факторов: $NGP - 0,3-0,7$; $\alpha - 0,2-0,5$; $B -$ до $0,1$.

2. Использование разработанного алгоритма управления позиционированием машин на карьерах нерудных материалов позволяет сократить продолжительность рабочего цикла на 13% и снизить продолжительность простоев оборудования на 25–50%.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность положений, выносимых на защиту, выводов и результатов подтверждается корректностью постановки задач исследований; непротиворечивостью их фундаментальным законам и зависимостям; применением лицензионного программного обеспечения на всех этапах исследования; качественным и количественным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований; удовлетворительными результатами сопоставления авторских разработок с данными независимых исследователей; апробированных научных методов экспериментальных исследований; достаточным объемом экспериментальных данных и стандартными методами обработки полученных результатов.

Апробация результатов диссертации проведена на 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных; за последние 3 года принято участие в 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: XXI, XII, XXIII Международные научно-технические конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности (Екатеринбург, 2023–2025 гг.); Научная конференция студентов и молодых

ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (Санкт-Петербург, 2023 г., 2024 г.); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (Санкт-Петербург, 2024 г.); 82-я, 83-я Международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2024-25 гг.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования, разработке программы и методики полевых и лабораторных исследований, организации и проведении исследований, в анализе полученных результатов и разработке алгоритма управления и коррекции позиционирования экскаватора в рабочей зоне, подготовке публикаций по теме исследования.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 209 наименований, и 6 приложений. Диссертация изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 38 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведен обзор состояния изученности темы исследования. Проведен анализ условий эксплуатации экскаватора при добыче нерудных материалов на слабых грунтах (песок, торф), а также проведен анализ размерно-массовых характеристик и физико-механических свойств песчаных и торфяных залежей. Рассмотрена

структура комплекта машин, применяемых при разработке слабых грунтов. Рассмотрены особенности эксплуатации комплекта машин «гидравлический экскаватор – самосвал» в процессе разработки. По результатам проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе приведены результаты анализа функционирования гидравлического экскаватора в условиях карьера при добыче нерудных материалов (песок, торф). Выполнено обоснование принципов рационального позиционирования экскаватора на уступе с учётом геометрии уступа, ширины бермы, номинального давления машины на грунт. Проведён анализ условий позиционирования экскаватора на слабых грунтах на основе методов предельного равновесия (по методу Спенсера) машин на уступе карьера. Выполнен кинематический анализ движения ковша с использованием метода координат Денавита–Хартенберга в рамках решения обратной задачи кинематики. Выполнен анализ возможного применения элементов искусственного интеллекта (сенсоров) на экскаваторе при добыче нерудных материалов. Проведён анализ производительности комплекта машин «экскаватор – самосвал».

В третьей главе для подтверждения теоретических положений по позиционированию экскаватора приведена разработанная программа и методика проведения экспериментальных исследований в полевых и лабораторных условиях по анализу физико-механических свойств песчаной и торфяной залежи, выполнению экспериментов на физических моделях, выполнению многофакторного эксперимента и исследований по установке сенсоров на экскаваторе.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, характеризующих взаимодействие гидравлического экскаватора с опорным основанием на уступах песчаных и торфяных карьеров. Результаты анализа кинематики ковша экскаватора с использованием метода Денавита–Хартенберга. Приведены результаты анализа положения LiDAR-сенсора на экскаваторе. Представлены результаты оценки продолжительности рабочего цикла и производительности экскаватора с алгоритма управления с элементами искусственного интеллекта.

В пятой главе по результатам диссертационного исследования приведены практические рекомендации по организации позиционирования экскаватора на уступе карьеров нерудных материалов.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Математическая модель устойчивости гидравлического экскаватора на уступе карьера устанавливает зависимость коэффициента запаса устойчивости от номинального давления на грунт (NGP), угла откоса (α) и ширины бермы (B) с коэффициентами весомости факторов: $NGP - 0,3-0,7$; $\alpha - 0,2-0,5$; $B -$ до $0,1$.

Выемка нерудных материалов (песок, торф) представляет собой процесс открытой разработки путём формирования карьера, как правило, обрабатываемого одним выемочным уступом.

На основе проведённого анализа установлено, что позиционирование на уступе и организация погрузочно-транспортной схемы является одним из основных условий функционирования гидравлического экскаватора в карьере нерудных материалов.

При работе гидравлического экскаватора на уступе карьера нерудных материалов основными факторами являются номинальное давление на грунт (NGP), угол откоса (α), расстояние до бровки (B) и состояние залежи (несущая способность, водонасыщенность), поскольку они влияют на устойчивость гидравлического экскаватора и необходимость перепозиционирования. В составе комплекта «экскаватор–самосвал» эффективность процесса задаётся взаимным позиционированием машин и углом поворота при разгрузке ковша (90° ; 180°), которые определяют продолжительность рабочего цикла и, следовательно, эксплуатационную производительность.

На основе метода предельного равновесия Спенсера выполнено моделирование устойчивости системы «экскаватор–уступ» в программном обеспечении *Slide2D* (рисунок 1). Получены значения коэффициента запаса устойчивости уступа (FoS) для песчаного и торфяного карьеров. Песчаная залежь сложена среднезернистыми песками плотностью 1700 кг/м^3 , с углом внутреннего трения $\varphi = 25^\circ$ и сцеплением $c = 15 \text{ кПа}$, а торфяная залежь сложена *Sphagnum*

magellanicum торфом степенью разложения $R = 22\%$, плотностью 840 кг/м^3 , с углом внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$, сцеплением $c = 25 \text{ кПа}$. По результатам моделирования установлено, что определяющими факторами устойчивости являются номинальное давление на грунт (NGP), угол откоса (α) и ширина бермы (B). Коэффициент запаса устойчивости при увеличении α уменьшается: на песке от 1,94 до 1,58; торфе от 2,00 до 1,84; NGP на песке от 1,68 до 1,26; на торфе от 1,57 до 1,15. Увеличение B приводит к увеличению коэффициента запаса устойчивости.

В ходе лабораторных экспериментов исследовалась осадка модели гидравлического экскаватора на уступе нерудных материалов. Лабораторные эксперименты проводились в емкости размерами $1,0 \times 0,5 \times 0,5 \text{ м}$ с использованием образцов натурального грунта (песок, торф), отобранных из залежей месторождений Ленинградской области, Ломоносовского района (песок – месторождение «Глобицы-западный»; торф – месторождение «Заозерское»). Нагрузка на грунт осуществлялась моделью экскаватора с коэффициентом подобия $K_3=0,05$. Формировались уступы без воды и с водой (уровень воды снизу: $0,145 \text{ м}$ и $0,08 \text{ м}$), а также при разных углах откоса (38° , 45°). Результаты экспериментов представлены на рисунках 2–4.

По результатам экспериментов установлено, что для песчаного уступа первые признаки нарушения фиксировались при нагрузках $160\text{--}560 \text{ Н}$, а выраженная деформация и развитие разрушения начинались около 560 Н и усиливались при нагрузках $\geq 700 \text{ Н}$; для торфа первичные деформации наблюдались уже при $160\text{--}240 \text{ Н}$, а растрескивание и нарушение структуры — при $240\text{--}320 \text{ Н}$. Полученные результаты подтверждают, что уступы на песчаных карьерах под действием веса модели экскаватора выдерживают нагрузку в два раза большую, чем торфяные. Проведение экспериментов было направлено на обоснование влияния факторов (NGP , угла откоса α и ширины бермы B) на устойчивость гидравлического экскаватора, принятых в численном моделировании по методу Спенсера.

При выполнении полного факторного эксперимента типа 2^3 в программном комплексе *Design-Expert 13* на основе полученных результатов определено, что при оценке коэффициента запаса устойчивости (FoS) для песчаной залежи является статистически значимыми

$F = 471,22$ и $P = 0,002$, а для торфяной залежи $F = 66,46$ и $P = 0,094$. В результате получены функции отклика коэффициента запаса устойчивости при натуральных значениях факторов (1,2):

$$FoS_{\Pi} = 2,8 - 0,02 NGP - 0,03 \alpha + 0,04 B + 0,0001 NGP \cdot \alpha + 0,001 NGP \cdot B, \quad (1)$$

$$FoS_{\tau} = 2,5 - 0,02 NGP - 0,02 \alpha - 0,1 B + 0,0001 NGP \cdot \alpha - 0,0001 NGP \cdot B + 0,003 \alpha \cdot B. \quad (2)$$

По результатам анализа функций отклика (рисунок 5, 6) установлено, что для песчаных уступов доминирующим фактором является угол откоса α (75,5%), далее следует NGP (18,1%) и B (6,5%); для торфяных уступов доминирующим фактором выступает NGP (70,7%), далее α (21,3%) и B (8,0%).

2. Использование разработанного алгоритма управления позиционированием машин на карьерах нерудных материалов позволяет сократить продолжительность рабочего цикла на 13% и снизить продолжительность простоев оборудования на 25–50%.

Началом процесса позиционирования ковша является момент подъема полного ковша, затем следует поворот в сторону самосвала для разгрузки ковша, поскольку на данном этапе необходимо задать безопасную траекторию и требуемую высоту подъема ковша, чтобы исключить его удар о борт кузова самосвала и обеспечить точную разгрузку в заданную точку.

В рамках анализа вводится понятие критической точки N – нижней точки ковша (рисунок 7).

Для составления уравнений, основанных на контроле координат точки N в рамках отслеживания её положения, выполняется регулирование высоты и угла поворота ковша экскаватора при его повороте и разгрузке.

По результатам анализа обратной задачи кинематики на основе системы координат Денавита–Хартенберга можно контролировать и управлять разгрузкой ковша экскаватора.

В таблице 1 указаны параметры Денавита-Хартенберга для звеньев гидроманипулятора.

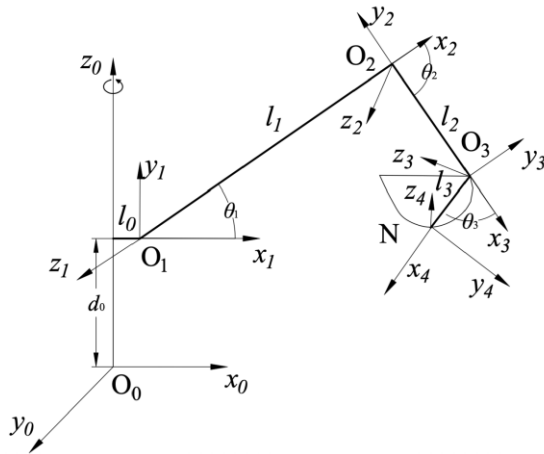


Рисунок 7 – Кинематическая схема движения рабочего органа гидравлического экскаватора по методу Денавита–Хартенберга
 Таблица 1 - Параметры Денавита-Хартенберга для звеньев гидроманипулятора экскаватора

Звено, i	Длина i -го звена, l_i	Угол вокруг оси x_i от z_{i-1} до z_i , α_i	Расстояние вдоль оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i , d_i	Угол вокруг оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i , φ_i
1- база	l_0	$-\pi/2$	0	φ_0
2- стрела	l_1	0	0	φ_1
3- рукоять	l_2	0	0	φ_2
4- ковш	l_3	0	0	φ_3

Для отслеживания координат точки N при перемещении ковша проводится преобразование $(i-1)$ -й системы координат в i -ю систему координат по матрице однородного преобразования для каждого i -го звена (3):

$$T_i = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -c_{\alpha_i} s_{\theta_i} & s_{\alpha_i} s_{\theta_i} & l_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\alpha_i} c_{\theta_i} & -s_{\alpha_i} c_{\theta_i} & l_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матрица однородного преобразования T_i позволяет связать однородные координаты точки N с однородными координатами этой

точки относительно $(i-1)$ -й системы координат, связанных с $(i-1)$ -м звеном гидроманипулятора (4):

$$K_0 = T_i^{i-1} K_i, \quad (4)$$

где $K_i = [x_i \ y_i \ z_i \ 1]^T$.

K_i соотносит координаты нижней части ковша с базовой системой координат K_0 и приводит матрицу к единому виду. Для связи системы координат точки O_3 с началом базовой системой координат в точке O_0 производится построение соответствующей матрицы (5):

$$K_0 = T_4^0 K_4, \quad (5)$$

где $T_4^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3$, а $K_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$

Выражение координаты нижней части ковша относительно базовой системы координат K_0 после перемножения матриц (6):

$$K_0 = \begin{bmatrix} l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} + l_2 c_{\theta_{123}} + l_3 c_{\theta_{1234}} \\ l_1 s_{\theta_1} + l_1 s_{\theta_{12}} + l_2 s_{\theta_{123}} + l_3 s_{\theta_{1234}} \\ l_2 s_{\theta_2} + l_2 s_{\theta_{23}} + l_3 s_{\theta_{234}} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Кинематический анализ отслеживания точки N в принятой системе координат с использованием метода Денавита–Хартенберга положен в основу следующей системы уравнений (7):

$$\begin{cases} X_N = l_1 c_{\theta_1} + l_2 c_{\theta_{12}} + l_2 c_{\theta_{123}} + l_3 c_{\theta_{1234}}, \\ Y_N = l_1 s_{\theta_1} + l_1 s_{\theta_{12}} + l_2 s_{\theta_{123}} + l_3 s_{\theta_{1234}}, \\ Z_N = H_i + l_2 s_{\theta_2} + l_2 s_{\theta_{23}} + l_3 s_{\theta_{234}}. \end{cases} \quad (7)$$

где $c_{\theta_1} = \cos(\varphi_1)$; $c_{\theta_{12}} = \cos(\varphi_1 + \varphi_2)$; $c_{\theta_{123}} = \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$; $s_{\theta_1} = \sin(\varphi_1)$; $s_{\theta_{12}} = \sin(\varphi_1 + \varphi_2)$; $s_{\theta_{123}} = \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$.

Полученные уравнения позволяют отслеживать координаты точки N ковша экскаватора после выемки грунта при движении к месту разгрузки (кузов самосвала).

Система уравнений является основой для контроля положения ковша экскаватора и возможного перепозиционирования относительно самосвала.

В работе предложено осуществлять контроль текущего положения ковша экскаватора с использованием *LiDAR*-сенсора и бортовой системы камер, расположенных на корпусе экскаватора.

При этом анализ применения *LiDAR*-сенсоров на экскаваторе показывает, что в рамках сканирования рабочей зоны используются два варианта размещения сенсоров: верхнее или боковое. Контроль выполняется по зонам риска вокруг экскаватора: высокий риск с радиусом – до 5 м, средний риск – 5-10 м, низкий риск – 10-20 м.

В результате сравнительного анализа двух вариантов размещения сенсоров установлено, что приоритетным является размещение сенсора *LiDAR* на 4-х боковых поверхностях экскаватора (*RPLIDAR A1M8*) (рисунок 8). Это обеспечивает максимальную точность обнаружения объектов с перекрытием круговых зон сканирования в ближней зоне — до 95%, что на 22% выше по сравнению с верхним размещением одного сенсора (73%).

По результатам кинематического анализа и способов размещения сенсоров разработаны программы для ЭВМ в рамках реализации алгоритма управления для обеспечения контроля и управления позиционированием критической точки *N* ковша при разгрузке в самосвал, а также контроля рабочей зоны вокруг экскаватора:

- для контроля рабочей зоны экскаватора при позиционировании на уступе карьера;
- программа помощи оператору при позиционировании экскаватора на уступе карьера.

Итогом выполнения проведённого исследования является разработанный алгоритм (рисунок 9) для комплексного контроля устойчивости экскаватора на уступе, согласованного выполнения технологических операций разгрузки в едином рабочем ритме, позиционирования ковша экскаватора, а также повышения эффективности функционирования.

Исходя из полученных результатов анализа и экспериментальных исследований, разработано техническое решение, защищённое патентом на изобретение «Устройство для контроля рабочей зоны экскаватора», включающее элементы искусственного интеллекта с использованием сенсоров.

В результате использования алгоритма осуществляется:

- контроль рационального позиционирования экскаватора на уступе карьера на первом иерархическом уровне системы управления на основе элементов искусственного интеллекта;

- поступление предупреждающего сигнала в кабину оператора с коррекцией управления движением ковша в режиме ассистирования;
- управление позиционированием ковша при погрузке самосвала.

Рациональным позиционированием экскаватора считается размещение машины на уступе относительно откоса карьера и транспортных средств, обеспечивающее безопасность работ, снижение риска обрушения уступа и максимальную производительность комплекта машин.

В качестве критериев рационального позиционирования можно считать:

- эффективность погрузки самосвала: снижение угла поворота платформы при загрузке самосвала ($60\text{--}90^\circ$) для снижения продолжительности рабочего цикла;
- использование систем контроля: применение датчиков и систем 3D-позиционирования для точного взаимодействия с самосвалом;
- устойчивость: правильное размещение на уступе для предотвращения опрокидывания;
- безопасность: исключение риска обрушения уступа карьера, контактов с самосвалом и персоналом в зонах риска.

Процесс контроля рационального позиционирования экскаватора на уступе карьера нерудных материалов и положения ковша при погрузке самосвала с применением элементов искусственного интеллекта ориентирован на снижение продолжительности рабочего цикла.

В ходе проведённого эксперимента по оценке рабочего цикла экскаватора для вариантов без совмещения и с совмещением операций, а также с применением алгоритма и без него, при фиксированных условиях работы и углах поворота 90° и 180° , были получены значения продолжительности рабочего цикла $t_{ц}$. Циклограмма рабочего процесса приведена на рисунке 10.

Установлено, что применение алгоритма с элементами искусственного интеллекта позволяет сократить продолжительность цикла при повороте на 90° до 13% (с совмещением операций) и до 5% (без

совмещения), а при повороте на 180° до 4% (с совмещением) и до 3% (без совмещения).

На основании изменения продолжительности рабочего цикла (рисунок 11, 12) при анализе результатов установлено, что при выполнении алгоритма прогнозируется увеличение производительности:

- при угле поворота 90° : до 11% при совмещении операций и до 23% без совмещения операций,

- при угле поворота 180° : до 10% при совмещении операций и до 18% без совмещения операций.

Дополнительно использование алгоритма способствует снижению времени простоев до 25-50% по организационно-технологическим причинам (ожидание самосвала, маневрирование и перепозиционирование в рабочей зоне; без учёта простоев на техническое обслуживание и ремонт) за счёт контроля устойчивости и предварительного согласования взаимного положения экскаватора и самосвала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе результатов проведённых исследований изложено научно обоснованное техническое решение актуальной задачи по обоснованию структуры и параметров системы позиционирования гидравлического экскаватора в условиях добычи нерудных материалов (песка, торфа).

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. В результате анализа условий функционирования одноковшового гидравлического экскаватора на карьерах нерудных материалов определены основные факторы, ограничивающие его функциональность: номинальное давление на грунт, угол откоса карьера, ширина бермы.

2. Экспериментально установлено, что песчаный уступ выдерживает нагрузку в 2 раза большую, чем торфяной уступ, при тех же значениях основных факторов.

3. В результате многофакторного эксперимента получены математические модели коэффициента запаса устойчивости, в которых показано, что для песчаных грунтов величина угла откоса уступа яв-

ляется определяющим фактором (значимость 75,5%), а в случае торфяных грунтов доминирующее влияние (значимость 70,7%) оказывает номинальное давление экскаватора на грунт.

4. Соблюдение разработанного алгоритма управления позиционированием гидравлического экскаватора на уступе карьера нерудных материалов с использованием элементов искусственного интеллекта обеспечивает снижение продолжительности рабочего цикла на 13%, что приводит к соответствующему росту производительности: при угле поворота на разгрузку 90 ° – до 11% при совмещении операций и до 23% без совмещения операций, при угле поворота на разгрузку 180 ° – до 10% при совмещении операций и до 18% без совмещения операций, а также позволяет снизить продолжительность простоев оборудования на 25-50%.

5. В рамках практических рекомендаций для производственно-технических отделов предприятий показаны условия рационального позиционирования экскаватора на уступе карьера нерудных материалов, даны предложения по выбору машин и комплектов электронного оборудования.

6. Разработано устройство для контроля рабочей зоны экскаватора, включающее LiDAR-датчики, установленные на поворотной платформе экскаватора, блок отображения информации и систему обработки сигналов (патент на изобретение № 2855340).

7. Разработан комплекс программ для ЭВМ: программа помощи оператору при позиционировании экскаватора на уступе нерудных карьеров (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025615460); программа контроля рабочей зоны экскаватора при позиционировании на уступе нерудных карьеров (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664988); программа контроля осадки ходовой части экскаватора при работе на уступах нерудных карьеров (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025666286).

8. Результаты работы использованы в производственной деятельности компании ООО «Мелиоратор» путем применения рекомендаций по внедрению системы управления позиционированием экскаватора на песчаном карьере с применением сенсоров наклона типа *LiDAR* (акт внедрения от 14.01.2026 г.).

9. Результаты работы использованы в производственной деятельности компании ООО «БХЗ» при разработке проекта организации ведения горных работ на торфяном месторождении «Ларьянское» путем применения рекомендаций по внедрению системы контроля осадки ходовой части экскаватора на слабом торфяном основании и увеличению устойчивости гидравлического экскаватора на водонасыщенных и слабонесущих уступах торфяных карьеров (акт внедрения от 16.12.2025 г.).

10. Перспективным направлением дальнейшей разработки темы исследования является развитие системы позиционирования и контроля рабочей зоны экскаватора с интеграцией дополнительных сенсорных и интеллектуальных элементов и формирования адаптивных решений по управлению режимами работы и сокращению продолжительности рабочего цикла.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Бугебрин, Ш.** Анализ рисков при позиционировании экскаватора на карьере нерудных материалов / **Ш. Бугебрин, И. В. Соловьев, А. В. Михайлов** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 20. – С. 183-189. DOI 10.26160/2658-3305-2023-20-183-189.

2. **Бугебрин, Ш.** Контроль позиционирования ковша экскаватора с применением датчиков / **Ш. Бугебрин, А. В. Михайлов, Ю. А. Казаков** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 25. – С. 169-175. DOI 10.26160/2658-3305-2024-25-169-175.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и систему цитирования Scopus:

3. Mikhailov, A. V. Impact Evaluation of Excavator Positioning on Open Pit Slope Stability / A. V. Mikhailov, **C. Bouguebrine**, D. A. Shibanov, A. E. Bessonov // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. - 2025. - Vol. 38, Issue 1. – PP. 99-107. DOI: 10.5829/ije.2025.38.01a.10.

4. Mikhailov, A. V. Analysis of Excavator Equipping with Lidar Sensors for Functionality Improving / A. V. Mikhailov, **C. Bouguebrine**

// International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects. - 2026. – Vol. 39, Issue 6. – PP. 1414-1421. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.10

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025615460 Российская Федерация. Программа для помощи оператору при позиционировании экскаватора на уступе нерудных карьеров. Заявка № 2025612868: заявл. 19.02.2025 : опубл. 05.03.2025 / А.В. Михайлов, **Ш. Бугебрин**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 17 КБ.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664988 Российская Федерация. Программа контроля рабочей зоны экскаватора при позиционировании на уступе нерудных карьеров. Заявка № 2025663725: заявл. 29.05.2025: опубл. 09.06.2025 / А.В. Михайлов, **Ш. Бугебрин**, К.К. Акинола; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 20 КБ.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025666286 Российская Федерация. Программа контроля осадки ходовой части экскаватора при работе на уступах нерудных карьеров. Заявка № 2025664510: заявл. 03.06.2025: опубл. 24.06.2025 / А.В. Михайлов, **Ш. Бугебрин**, Ю.А. Казаков; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 15 КБ.

8. Патент на изобретение № 2855340 Российская Федерация МПК E02F 9/26 (2006.01). Устройство для контроля рабочей зоны экскаватора. Заявка № 2025117318: заявл. 24.06.2025: опубл. 20.01.2026 / А.В. Михайлов, Ю.А. Казаков, **Ш. Бугебрин**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 11 с. : ил.

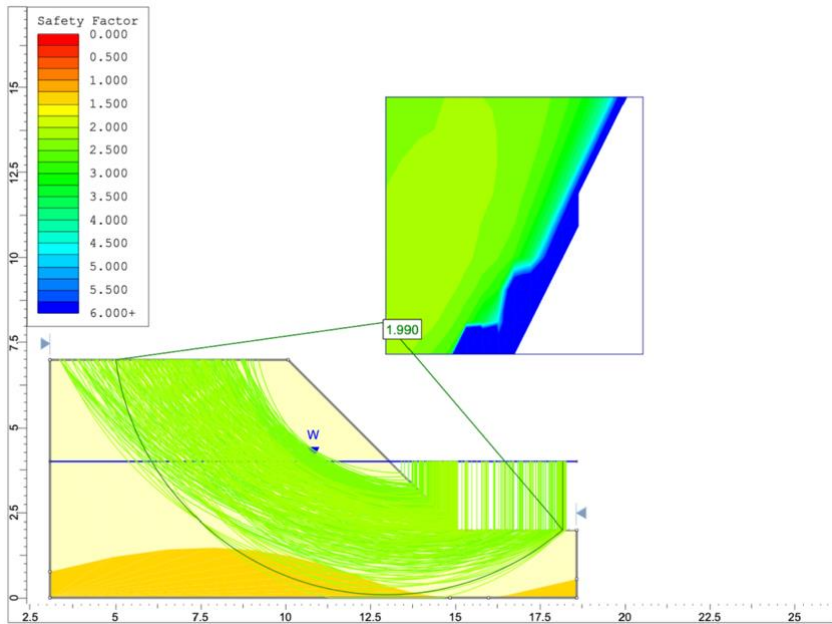


Рисунок 1 – Оценка коэффициента запаса устойчивости (FoS) уступа по методу Спенсера

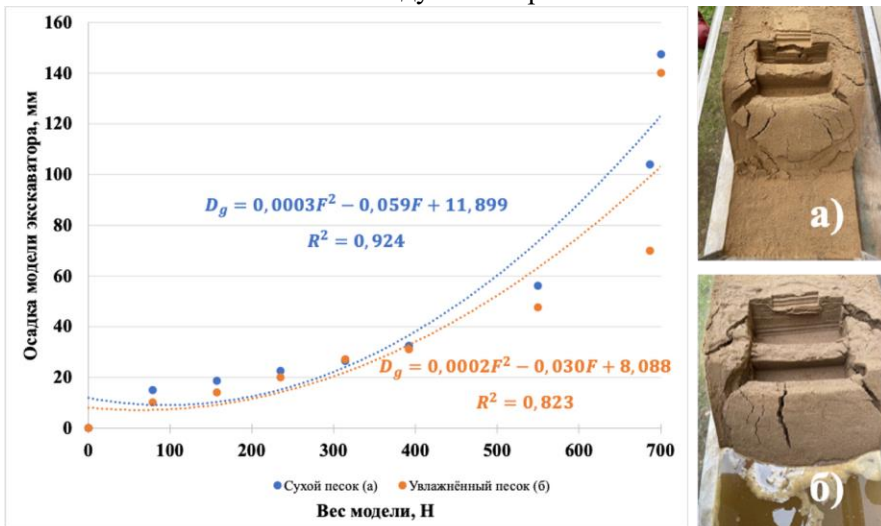


Рисунок 2 – Зависимости осадки модели экскаватора на модели песчаного уступа с углом откоса 45 ° от веса на грунт:
а) сухой песок; б) увлажнённый песок

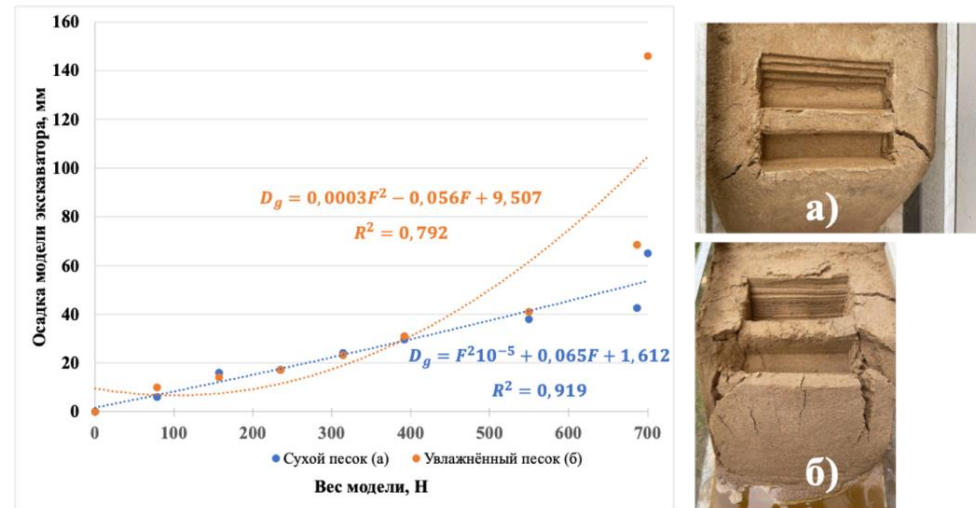


Рисунок 3 – Зависимости осадки модели экскаватора на модели песчаного уступа с углом откоса 38 ° от веса на грунт: а) сухой песок; б) увлажнённый песок

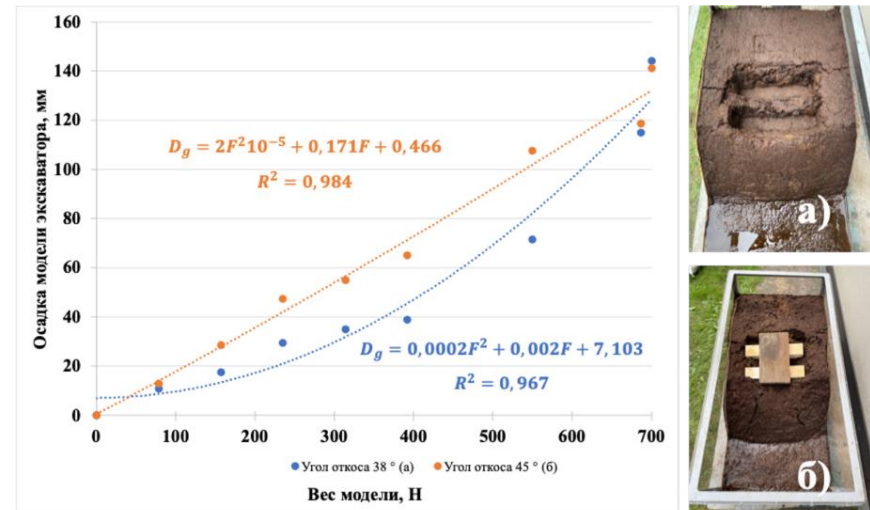


Рисунок 4 – Зависимости осадки модели экскаватора на модели торфяного уступа: а) угол откоса 38 °; угол откоса 45 °

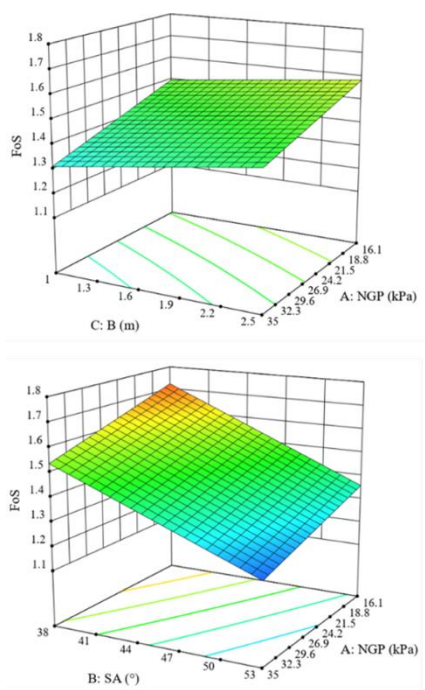


Рисунок 5 – Трёхмерные графики функции отклика FoS в натуральном виде для экскаватора на песчаном основании

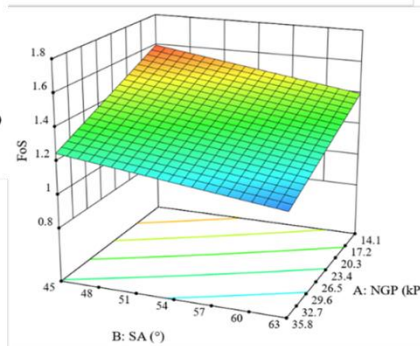
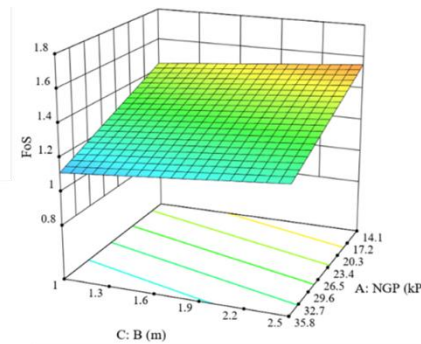
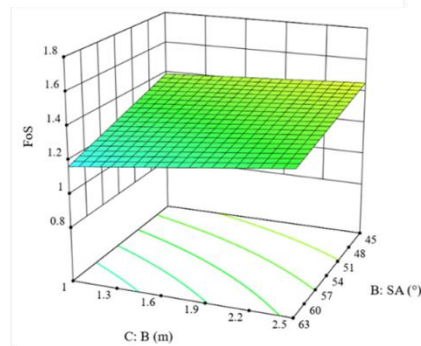
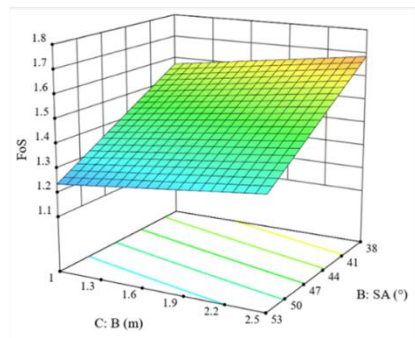


Рисунок 6 – Трёхмерные графики функции отклика FoS для экскаватора на торфяном основании

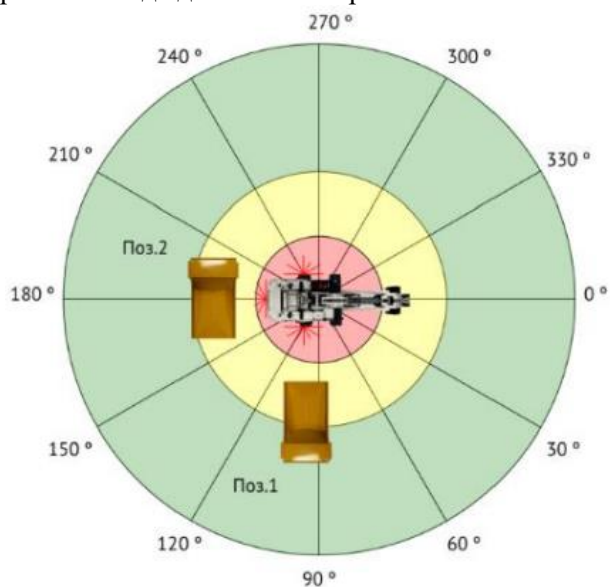


Рисунок 8 – Секторная схема зоны сканирования LiDAR-сенсора в рабочем пространстве гидравлического экскаватора (поз. 1 – 90°, поз. 2 – 180°)

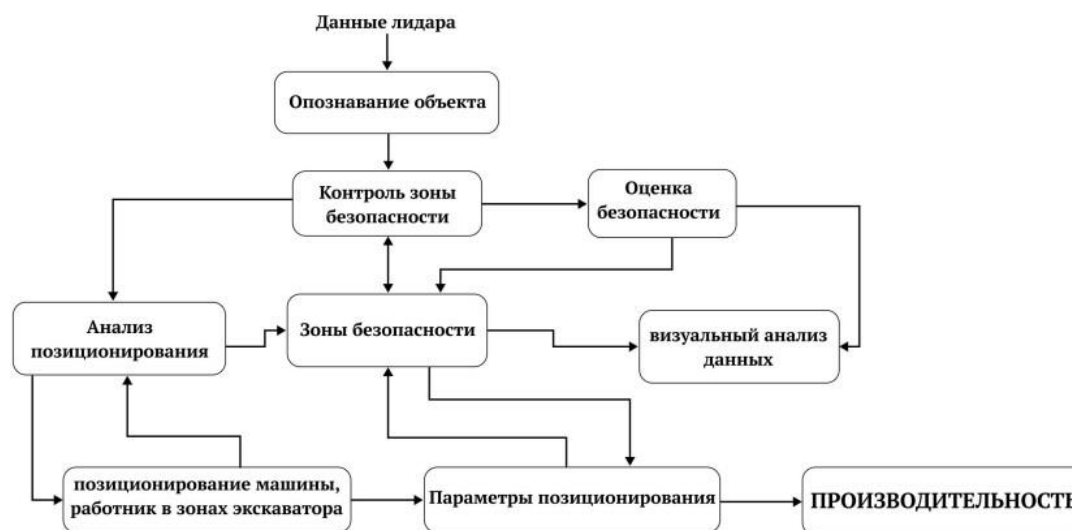


Рисунок 9 – Алгоритм управления позиционированием экскаватора в рабочей зоне

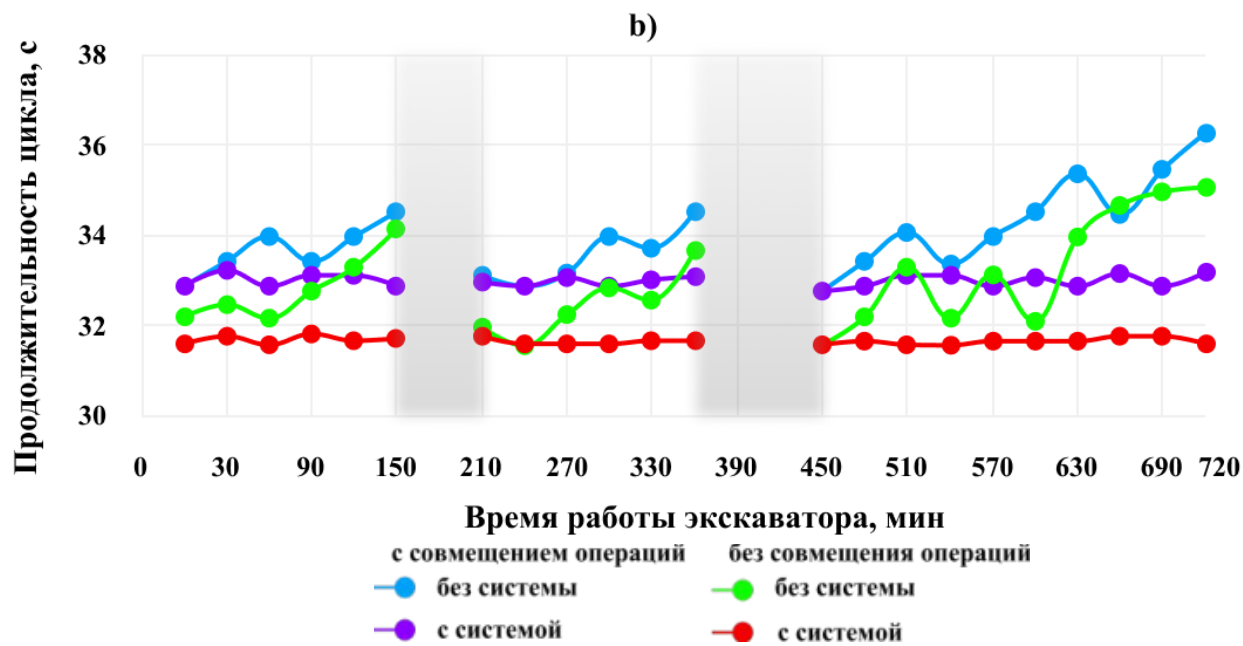
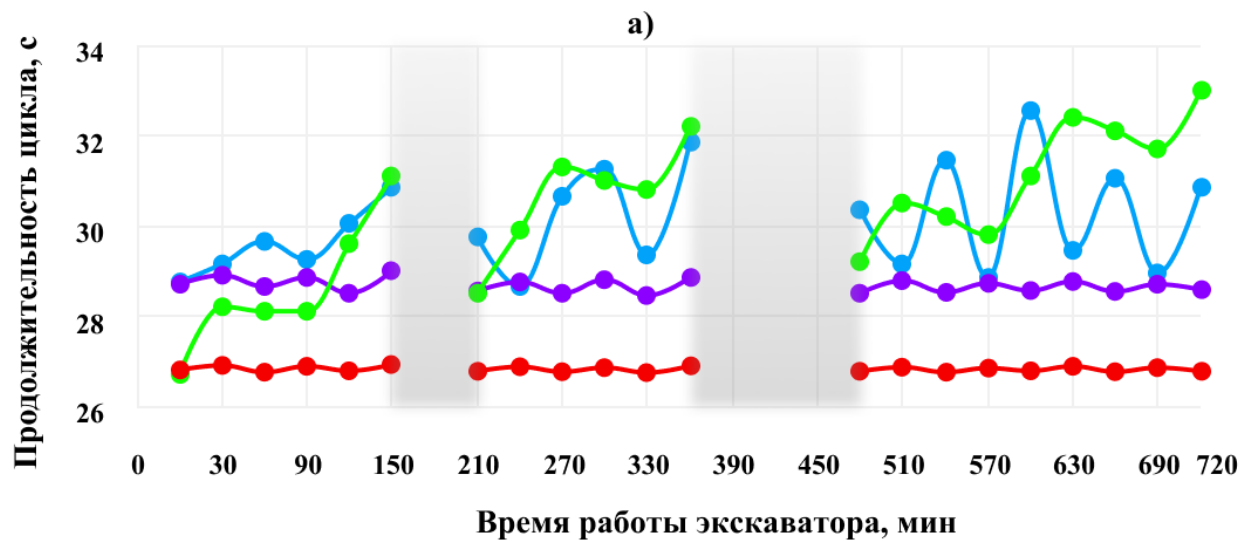


Рисунок 10 – Сменные циклограммы рабочего процесса: а) при повороте на 90 °; б) при повороте на 180 °

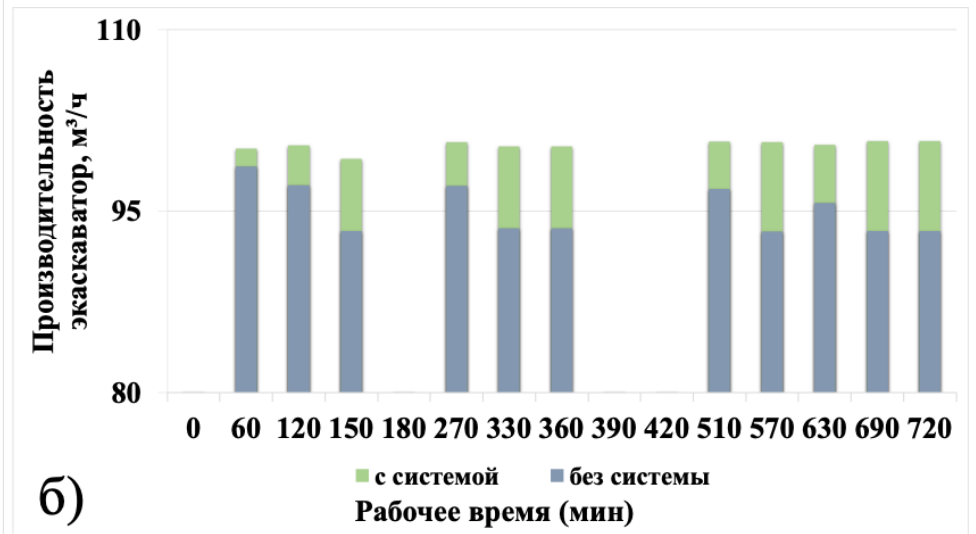
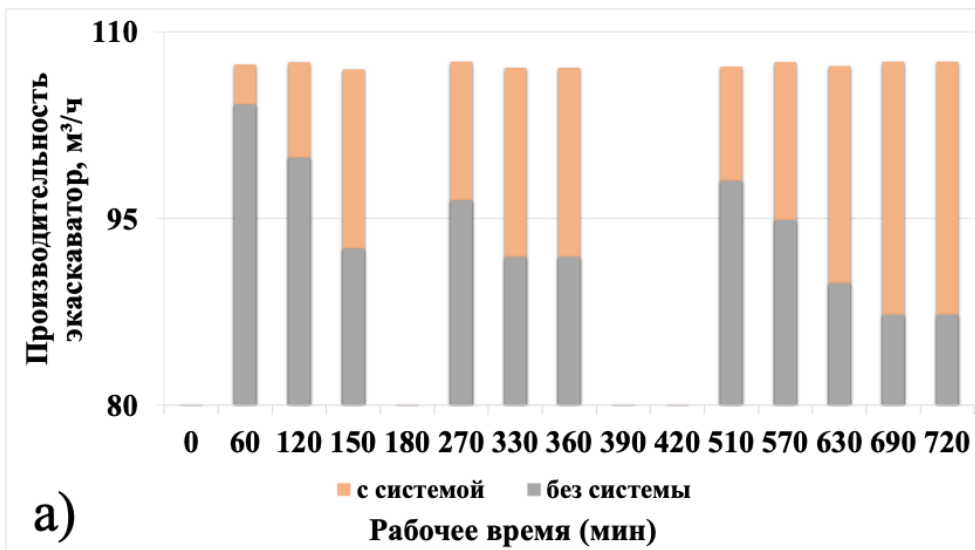


Рисунок 11 – Анализ сменной производительности экскаватора при повороте на 90°: а) с совмещением операций; б) без совмещения операций

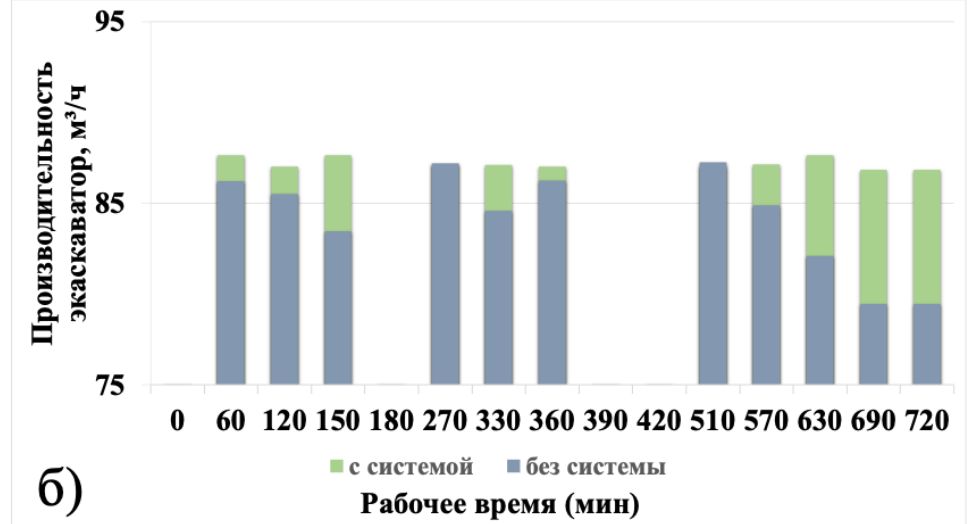
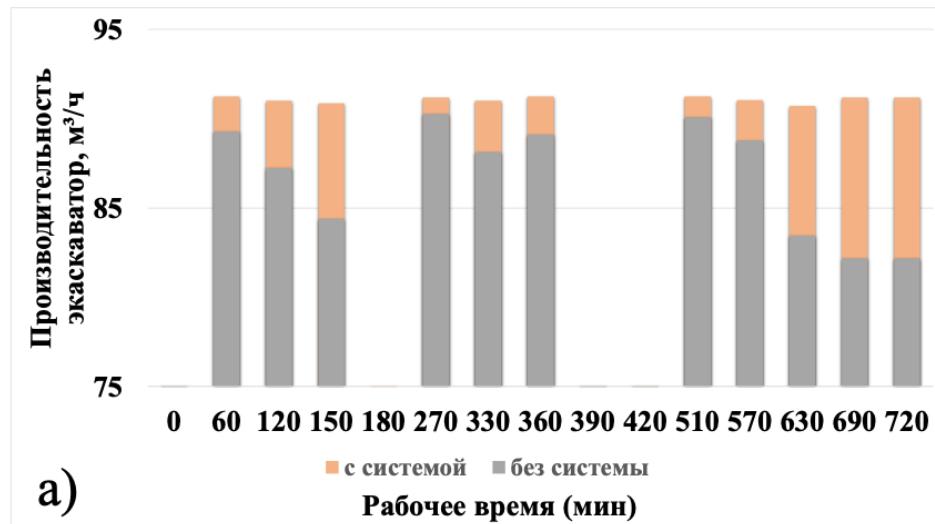


Рисунок 12 – Анализ сменной производительности экскаватора при повороте на 180°: а) с совмещением операций; б) без совмещения операций