

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

На правах рукописи

Бугебрин Шуаиб



ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА НА СЛАБОУСТОЙЧИВЫХ УСТУПАХ
КАРЬЕРОВ НЕРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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 – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Анализ особенностей добычи нерудных материалов.....	12
1.1.1 Актуальность добычи нерудных материалов	13
1.1.2 Характеристика залежей нерудных материалов (песок, торф).....	18
1.2 Анализ карьерной добычи нерудных материалов.....	22
1.3 Анализ комплекта оборудования при добыче нерудных материалов	25
1.3.1 Анализ применения гидравлических экскаваторов	28
1.3.2 Анализ применения самосвалов в составе комплекта машин.....	31
1.3.3 Анализ применения тракторных транспортных агрегатов	33
1.4 Управление комплектом оборудования	37
1.5 Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования	41
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРА.....	45
2.1 Обоснование позиционирования гидравлического экскаватора на уступе карьера	45
2.1.1 Анализ условий позиционирования экскаватора на уступе карьера	46
2.1.2 Анализ условий позиционирования экскаватора в зоне погрузки	49
2.1.3 Анализ условий позиционирования «экскаватор–персонал»	52
2.2 Анализ условий позиционирования экскаватора на слабых грунтах	54
2.3 Анализ методов предельного равновесия машин на уступе карьера.....	57
2.4 Анализ кинематики движения ковша экскаватора при разгрузке	70
2.5 Обоснование необходимости использования LiDAR-сенсора на гидравлическом экскаваторе	75
2.6 Анализ производительности комплекта экскаватор-самосвал	78
2.7 Выводы по главе 2	82

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	85
3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований	85
3.2 Методика проведения экспериментальных исследований.....	86
3.2.1 Методика проведения исследований в полевых условиях.....	86
3.2.2 Методика проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях	93
3.3 Методика планирования многофакторного эксперимента.....	96
3.4 Методика размещения LiDAR-сенсора на экскаваторе.....	98
3.5 Методика обработки результатов экспериментов	99
3.6 Выводы по главе 3	100
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	101
4.1 Результаты определения прочностных свойств песчаной и торфяной залежи....	101
4.2 Результаты определения осадки машин на уступах карьеров	103
4.3 Результаты многофакторного эксперимента по определению устойчивости экскаватора на уступе.....	110
4.4 Результаты определения рабочей зоны экскаватора	115
4.5 Алгоритм управления позиционированием экскаватора на уступах нерудных залежей	117
4.6 Анализ продолжительности рабочего цикла и производительности экскаватора	120
4.7 Выводы по главе 4	122
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	125
5.1 Рекомендации по функционированию машин в условиях карьера нерудных материалов	125
5.2 Рекомендации по применению сенсоров на экскаваторе	129

5.3 Выводы по главе 5	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технические характеристики полевого оборудования	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты анализа залежи.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ В План полного факторного эксперимента 2³	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Технические характеристики электронного оборудования	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патент и свидетельства на объекты интеллектуальной собственности.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акты внедрения.....	176

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современное развитие горнодобывающей отрасли характеризуется устойчивым ростом объемов добычи нерудных полезных ископаемых, в частности широко распространенных песка и торфа, что обусловлено их применением в строительной отрасли и также агропромышленным и природоохранным применением. Так, по данным 2022 года, объем добычи песка в Алжире составил более 3 млн т; в Российской Федерации объемы 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.,

Капутин Ю.Е., Коваленко В.С., Комиссаров А.И., Лагунова 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 соответствуют 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, Приложение Д), 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, Приложение Д).

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., Приложение Е).

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., Приложение Е).

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.

Положения, выносимые на защиту:

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:

1. XXI Международная научно-техническая конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности (06-07 апреля 2023 г., г. Екатеринбург);

2. Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (17-21 апреля 2023 г., г. Санкт-Петербург)

3. XXII Международная научно-техническая конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности (02-05 апреля 2024 г., г. Екатеринбург);

4. 82-я Международная научно-техническая конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (17-21 апреля 2024 г., г. Магнитогорск);

5. Научная конференция студентов и аспирантов «Полезные ископаемые России и их освоение» (21-25 октября 2024 г., г. Санкт-Петербург);

6. XXIII Международная научно-техническая конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности (03-04 апреля 2025 г., г. Екатеринбург);

7. 83-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (21-25 апреля 2025 г., г. Магнитогорск).

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 (пункты списка литературы № 11-17, 155, 156), 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, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (пункты списка литературы № 65, Приложение Д) и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункты списка литературы № 80-82, Приложение Д).

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

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ особенностей добычи нерудных материалов

Освоение сырьевой базы нерудных ресурсов целесообразно начинать с геологического понятия нерудной залежи — природного геологического тела (пласт, линза, слой, толща), сложенного полезным нерудным сырьём и характеризующегося определёнными мощностью, качеством и условиями залегания. В прикладном отношении залежь выступает первичным носителем запасов: её строение, гранулометрический состав, влажность и инженерно-геологические свойства определяют применяемые технологии добычи и транспортирования, а также требования к устойчивости рабочей площадки и прибортовой зоны карьера [26, 40, 134].

Для задач, связанных с эксплуатацией карьерных гидравлических экскаваторов, принципиально важны залежи, формирующие слабые основания, поскольку они непосредственно влияют на несущую способность, осадки, перераспределение контактных давлений и устойчивость машины в рабочей зоне [77, 113, 192]. В этом контексте водонасыщенные пески и торфяные месторождения рассматриваются не только как объект добычи, но и как инженерная среда, определяющая эксплуатационные ограничения техники и требования к безопасному позиционированию на уступах карьеров [31, 151].

В технической литературе употребляется ряд близких терминов: «нерудные материалы», «нерудные полезные ископаемые». В обобщённом виде под нерудным сырьём понимают условно выделяемую группу горных пород, используемых в промышленности в естественном виде либо после минимальной переработки, а также как сырьё для последующей переработки [40, 50].

Нерудное сырьё отличается значительным разнообразием по составу, генезису, физико-механическим свойствам и направлениям использования. Это предопределяет множественность подходов к систематизации [10]. Наиболее практико-ориентированной является классификация по промышленному назначению,

позволяющая соотносить свойства сырья с технологиями его добычи/переработки и рынками потребления [40, 44].

С точки зрения добычи и последующего применения, наиболее значимыми характеристиками нерудного сырья являются: зернистость, влажность и водонасыщение, плотность сложения, прочность/связность, содержание примесей (глинистых, пылеватых, органических), неоднородность строения залежи и условия залегания. Для песка эти признаки напрямую нормируются в стандартах (крупность зерен до 5 мм, содержание глинистых/пылеватых частиц, модуль крупности и др.) [27]. Для торфа как грунта ключевым идентификатором служит массовая доля органического вещества (50% и более) и генезис [31].

1.1.1 Актуальность добычи нерудных материалов

Нерудные материалы формируют материальную основу строительства и инфраструктуры: песок, гравий и щебень используются как заполнители для бетонов и растворов, в дорожных основаниях, насыпях и гидротехнических сооружениях [150, 157].

Геологически строительные нерудные материалы распространены повсеместно. Так, пески наиболее типичны для аллювиальных (русловых и пойменных), озёрных, прибрежно-морских и эоловых (дюнных) отложений [40, 109]. Торфяные залежи формируются в условиях избыточного увлажнения и замедленного разложения органического вещества (болотные массивы), при этом торфяники встречаются во всех климатических зонах, но доминируют в бореальных и умеренных регионах Северного полушария [181].

Мировая динамика добычи минерального сырья в целом демонстрирует долгосрочный рост, отражающий влияние урбанизации, расширения инфраструктуры и промышленного производства [178, 192].

Однако именно строительные нерудные материалы (песок, гравий, щебень) дают крупнейшие абсолютные объёмы. По данным ООН/ЮНЕП глобальное

потребление песка и гравия оценивается порядка 40–50 млрд т в год, причём основная часть приходится на бетонно-цементные нужды и инфраструктуру [170, 188].

Значимость нерудных ресурсов определяется тем, что они являются «материальным фундаментом» инфраструктурного и промышленного развития: без заполнителей невозможны бетон, дороги, инженерные сооружения, а без почвоулучшителей поддержание плодородия почв [150, 157]. При этом рост потребления нерудных материалов связан с урбанизацией и капитальным строительством, что делает их добычу фактором национальной экономической безопасности [121, 188].

Одновременно добыча нерудных материалов относится к наиболее «пространственно чувствительным» видам недропользования: карьеры песка из русловых систем влияют на ландшафты, гидрологический режим, устойчивость берегов и качество водных экосистем; требуются меры рекультивации, ограничения по режимам работ и учёт кумулятивных эффектов [165, 166, 170].

Карьерный способ добычи торфяного сырья в настоящее время осуществляется выемкой со всей глубины торфяной залежи при помощи одноковшового гидравлического экскаватора [154].

Выбор песка и торфа как объектов фокусного рассмотрения в работе обусловлен сочетанием трёх факторов.

Во-первых, песок – базовый строительный материал массового потребления, формирующий сырьевую основу строительного комплекса; его добыча коррелирует с инфраструктурными циклами и урбанизацией [22; 157, 186].

Во-вторых, кварцевые пески имеют высокую технологическую значимость для стекольной и литейной промышленности, а также для фильтрации и ряда высокотехнологичных направлений, что подтверждается устойчивым ростом мирового спроса на промышленный кварцевый песок [1, 126].

В-третьих, и пески (особенно водонасыщенные рыхлые), и торфяные залежи являются типичными слабыми деформируемыми основаниями, что делает их

принципиальными для инженерной постановки задачи безопасной эксплуатации карьерного оборудования [31, 113, 152].

Песчаные и торфяные залежи выступают одновременно:

- объектами добычи;
- средой формирования рисков: они задают параметры осадки, перераспределение давления под гусеницами экскаваторов, требования к ширине рабочей площадки и устойчивости прибортовой зоны, а также ограничения по режимам работы экскаватора [134, 151, 192].

Следовательно, инженерная задача позиционирования карьерного гидравлического экскаватора на уступах карьеров должна рассматриваться с учётом деформируемости основания и изменчивости его состояния по влажности/структуре [31, 113].

Рост промышленного спроса на кварцевый песок показан на рисунке 1 с увеличением оценки глобального спроса с 2008 по 2025 гг. [124].

В России, согласно USGS, добыча строительного песка в 2022 г. составила 521 млн т; приведённая динамика 2018–2022 гг. (рисунок 2) отражает общий тренд роста, согласующийся с инфраструктурной и жилищной активностью [186]. В Алжире масштабы добычи заполнителей ниже: по данным USGS за 2019 г. строительный песок – 3,0 млн т, что указывает на меньшую «материалоёмкость» внутреннего строительства при сопоставлении с крупными рынками заполнителей [197].

Торф представляет собой органогенное образование, используемое главным образом как агропромышленное сырьё (субстраты, почвоулучшители), а также ограничено как топливо и сорбционный материал [185]. Его формирование связано с болотными экосистемами, накоплением органического вещества и специфическими гидрологическими режимами; распространённость торфяников глобальна, но наибольшие площади характерны для бореальной зоны и крупных влажных регионов [181].

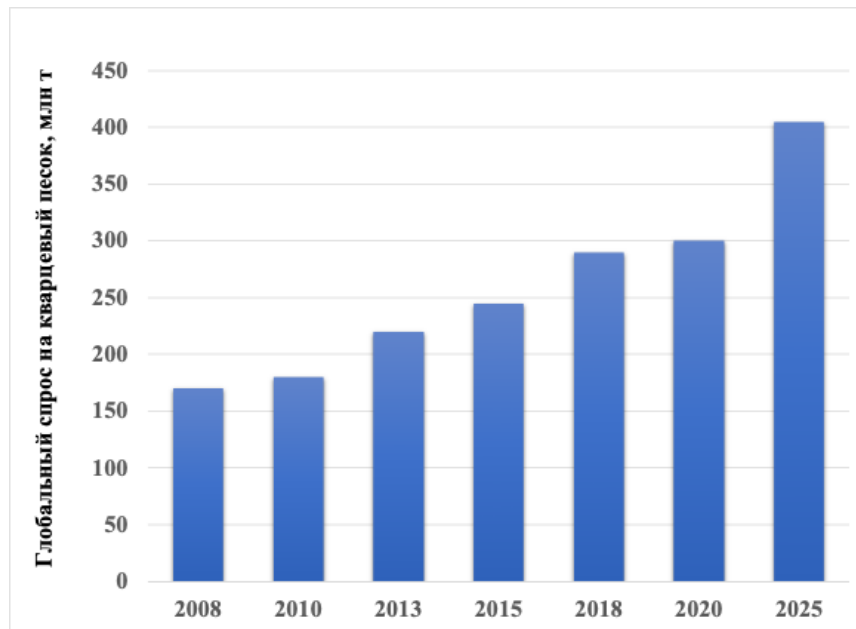


Рисунок 1 – Оценка глобального спроса на кварцевый песок для промышленности в 2008–2025 гг., млн т [124]

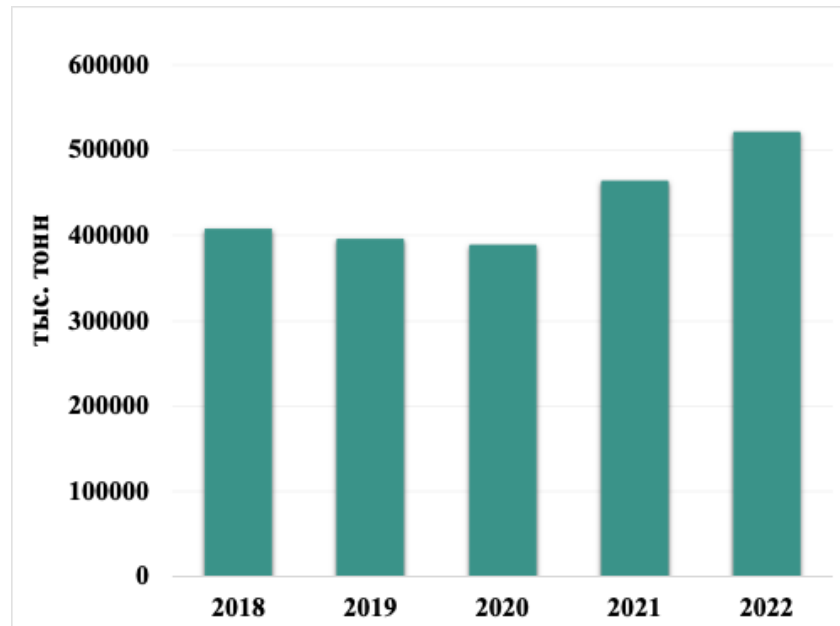


Рисунок 2 – Производство строительного песка в России в 2018–2022 гг., тыс. т [157, 186]

Мировая добыча торфа, по USGS, стабилизируется на уровне десятков млн т в год (оценка порядка 23 млн т в год в последние годы), при снижении доли энергетического использования и росте внимания к агрохимическим и ландшафтным применениям [157]. Для России, по данным USGS, производство торфа и

торфопродуктов в 2021 г. достигало 2,1 млн т, причём основная часть продукции ориентирована на агропромышленный сектор экономики [186]. Оценка 1,82 млн т в 2024 г., приводится в отраслевом обзоре и может отражать отличие методик учёта/каналов реализации (внутренний рынок –экспорт, торф-торфопродукты) [19]. Для Алжира добыча торфа статистически не фиксируется как значимая величина, что объясняется природно-климатическими ограничениями формирования торфяников [157, 197].

Совокупный мировой спрос на торфяное сырьё для функциональных удобрений составляет приблизительно 72,4 млн м³ в год [63].

Таким образом, песок и торф в совокупности представляют два разных «полюса» нерудного сектора: песок – материал сверхмассового инфраструктурного потребления, а торф – ресурс с высокой агропромышленной и природоохранной значимостью.

Для удобства сопоставления данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Объёмы добычи песка и торфа [157, 186, 197]

Регион /Материал	Год	Добыча, млн т
Мир (агрегаты)	2019	= 40 000 – 50 000
Россия (песок)	2022	521,00
Алжир (песок)	2019	3,00
Россия (торф)	2021	2,10
Россия (торф)	2024	1,82
Алжир (торф)	—	= 0 (не отмечается)

Залежи песка и торфяные месторождения являются слабыми основаниями, при этом ключевой инженерной задачей становится обеспечение устойчивости и эффективности работы карьерных машин. В этой связи разработка песчаных и торфяных залежей требует не только рациональных технологических схем добычи, но и инструментов управления рисками, что логически подводит к постановке задач настоящего исследования.

1.1.2 Характеристика залежей нерудных материалов (песок, торф)

Песчаные и торфяные залежи относятся к широко распространённым объектам открытой разработки, формирующимся преимущественно в приповерхностной зоне и отличающимся высокой пространственной изменчивостью строения и качества. При инженерно-геологической и технологической характеристике таких объектов принципиально важно разделять: условия формирования и строение залежи (генезис, мощность, стратификация, гидрогеологический режим), которые определяют неоднородность по площади и глубине, и свойства извлекаемого материала (гранулометрия, влажность, зольность, степень разложения и др.).

Для песчаных залежей ключевым параметром выступает их роль как базового сырья в строительной индустрии и инфраструктурном развитии: в глобальном масштабе наибольший спрос на песок связан именно со строительным сектором [186]. Песчаные залежи целесообразно типизировать по генетическим подтипам осадочных несвязных грунтов, поскольку генезис задаёт ожидаемую сортировку, слоистость, содержание пылевато-глинистых примесей и водонасыщение, а значит – требования к схеме опробования и технологическим решениям.

В качестве нормативной основы для терминов генетической принадлежности применим перечень подтипов осадочных несвязных грунтов, приведённый в [25, 31]. Обобщение основных генетических подтипов, используемых при типизации песчаных залежей, приведено в таблице 2.

Разработка песчаных залежей чаще всего ведётся открытым способом (рисунок 3), что обусловлено приповерхностным залеганием и относительно небольшими вскрышными мощностями в типичных условиях [74, 75]. В более широком контексте разработки неметаллического сырья подчёркивается доминирование открытого способа: по обобщённой оценке, открытым способом добывается 97% нерудных материалов [126]. В инженерном проектировании это повышает значимость вопросов устойчивости откосов, водоотлива и несущей

способности рабочих площадок, особенно при эксплуатации техники на слабых и переувлажнённых основаниях.

Таблица 2 – Генетические подтипы осадочных несвязных грунтов (песков), используемые при типизации песчаных залежей (термины подтипов: [31])

Подтипы осадочных песчаных грунтов	Практическое значение для характеристики залежи
Морские	Слоистость и водонасыщение часто являются определяющими факторами для качества и водоотлива; возможны специфические примеси (по фациям).
Аллювиальные	Линзовидно-слоистое строение и изменчивость грансостава по фациям повышают требования к сетке опробования и селективности выемки.
Флювиальные	Русловые/пойменные тела характеризуются значимой изменчивостью мощности и качества по площади, что влияет на планирование фронта работ.
Ледниковые	Возможна перемежаемость фракций и повышенная неоднородность по включениям, что требует усиленной классификации и подготовки сырья.
Эоловые и др.	Относительно однородные по гранулометрии толщи возможны, но для оценки пригодности важны форма и поверхность зёрен (строительные требования).



Рисунок 3 – Добыча песка открытым способом [91]

Торфяная залежь представляет собой свиту нескольких горизонтально наложенных пластов, разнородных по своему составу. Верхние торфяные слои имеют преимущественно макроструктуру с растениями торфообразователей со степенью

разложения до 15%, составляющих сложно переплетенный пространственный каркас и придающих системе заметную связность с высокой степенью волокнистости [49].

В нормативной трактовке [31] грунт рассматривается как однородная по составу, строению и свойствам часть грунтового массива, являющаяся многокомпонентной динамичной системой и частью геологической среды, изучаемой в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью. В рамках указанного стандарта вводятся определения, принципиальные для дальнейшей классификации песка и торфа [4, 31]:

- дисперсный грунт – грунт, в котором преобладают механические, физические и физико-химические структурные связи;

- минеральный грунт – грунт, состоящий из неорганических веществ или содержащий менее 3% органического вещества;

- несвязный грунт – дисперсный грунт с преобладанием механических структурных связей и сыпучий в сухом состоянии;

- песчаный грунт (песок) – минеральный несвязный грунт, содержащий по массе более 50% частиц размером от 0,05 до 2,0 мм;

- торф (торфяной грунт) – органический грунт болотного, озёрного или аллювиально-болотного генезиса, содержащий по массе 50% и более органического вещества, представленного преимущественно растительными остатками.

К классу дисперсных грунтов относят грунты, у которых преобладают физические, физико-химические и механические структурные связи; при этом дисперсные грунты подразделяют на два подкласса (таблица 3): несвязные и связные [31]. Такое разграничение методологически важно, поскольку песок относится к несвязным минеральным дисперсным грунтам, тогда как торф – к органическим (связным) осадочным грунтам болотного ряда.

Для песчаных материалов базовой классификационной осью является размер частиц, определяющий водопроницаемость, уплотняемость, деформируемость и технологические свойства (включая возможности переработки и требования к

промывке/классификации). В ГОСТ 25100–2020 разновидности дисперсных песчаных грунтов выделяются по размерам слагающих элементов (таблица. 4).

Таблица 3 – Класс осадочных дисперсных грунтов и положение песка и торфа в классификации [5, 31]

Подкласс	Подтип	Вид	Подвид	Разновидности
Несвязные	Морские, аллювиальные, флювиальные, ледниковые, эоловые и др.	Минеральные	Крупнообломочные пески	По фракциям По модулю деформации
		Органо-минеральные	Пески заторфованны	
Связные	Озерно-болотные, болотные, аллювиально-болотные	Органические	Торфы, сапропели	

Таблица 4 – Разновидности дисперсных песчаных грунтов по размерам слагающих элементов [31]

Фракции	Размер фракций, мм
Грубые	$1,0 < d \leq 2,0$
Крупные	$0,5 < d \leq 1,0$
Средние	$0,25 < d \leq 0,5$
Мелкие	$0,10 < d \leq 0,25$
Тонкие	$0,05 < d \leq 0,10$

Существенным интегральным параметром для оценки пригодности грунтов как основания для тяжёлых машин является деформируемость. В ГОСТ 25100–2020 дисперсные грунты подразделяют по модулю деформации E (таблица 5) на разновидности.

Таблица 5 – Разновидности дисперсных грунтов по модулю деформации E [31]

Разновидность грунтов	Модуль деформации E , МПа
Очень сильно деформируемые	$E \leq 5$
Сильнодеформируемые	$5 < E \leq 10$
Среднедеформируемые	$10 < E \leq 50$
Слабдеформируемые	$E > 50$

В залежах верхового типа в верхних генетических горизонтах, залегает слаборазложившийся торф вида *Sphagnum*, который представлен, в основном, *Sphagnum magellanicum* и *Sphagnum fuscum* (рисунок 4).

Торф как материал отличается от песка органическим происхождением, высокой влажностью и выраженной структурной неоднородностью «волокно–гумус»,

поэтому его классификация опирается прежде всего на относительное содержание органического вещества и степень разложения. По относительному содержанию органического вещества торф относится к органическим грунтам при $I_r \geq 0,50$ [31, 200].



Рисунок 4 – Торфяная залежь малой степени разложения в естественном залегании (фото автора)

По степени разложения по ГОСТ 10650 торфы подразделяют на три разновидности (таблица 6).

Таблица 6 – Разновидности торфа по степени разложения [28]

Разновидность торфа	Степень разложения $D_{др}$, %
Слаборазложившийся	$D_{др} \leq 20$
Среднеразложившийся	$20 < D_{др} \leq 45$
Сильноразложившийся	$D_{др} > 45$

Структура торфа зависит от разнообразия форм и размеров элементов – от крупных волокон растений, корней, остатков древесины до тонкодисперсных разложившихся частиц [3, 58].

1.2 Анализ карьерной добычи нерудных материалов

Мягкими грунтами в горном деле принято называть несвязные и слабосвязные образования, не требующие взрывного рыхления: рыхлые пески, песчано-гравийные смеси, суглинки, а также биогенные отложения, в том числе торф [62, 134]. Их разработка ведётся, как правило, открытым способом – в карьере. Для горизонтальных

залежей песка и торфа, отличающихся значительной горизонтальной протяжённостью и относительно небольшой глубиной, наиболее типична схема карьера с одним откосом (рисунок 5), при которой борт формируется как единая наклонная плоскость без разбивки на уступы [101, 191].

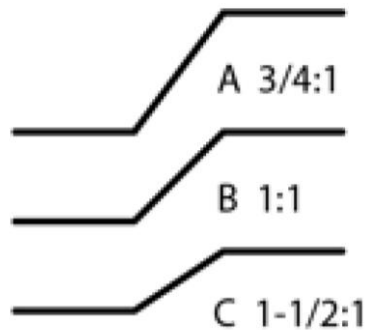


Рисунок 5 – Схематическое изображение допустимых уклонов откосов в зависимости от типа грунта [191]: А – грунт типа А (высокой прочности), допустимый уклон 3/4:1; В – грунт типа В (средней прочности), допустимый уклон 1:1; С – грунт типа С (слабые и водонасыщенные грунты), допустимый уклон 1½:1

В зависимости от физического состояния залежи и гидрогеологических условий участка метод разработки для мягких грунтов сводится к двум базовым вариантам [206].

Применяется при залегании полезной толщи выше уровня грунтовых вод либо при условии надёжного водоотлива. Материал разрабатывается послойно, экскавируется с погрузкой в транспортное средство и вывозится к месту складирования [23].

Для мягких и аллювиальных отложений устойчивость борта карьера является критически важным проектным параметром. Вертикальная высота разработки для незакреплённых песчаных грунтов, как правило, не превышает 3-5 м в одном уступе (рисунок 6), а общий угол откоса борта карьера обычно принимается в диапазоне 30-45° в зависимости от геотехнических свойств грунта, уровня грунтовых вод и наличия технологических дорог на борту [48, 147].

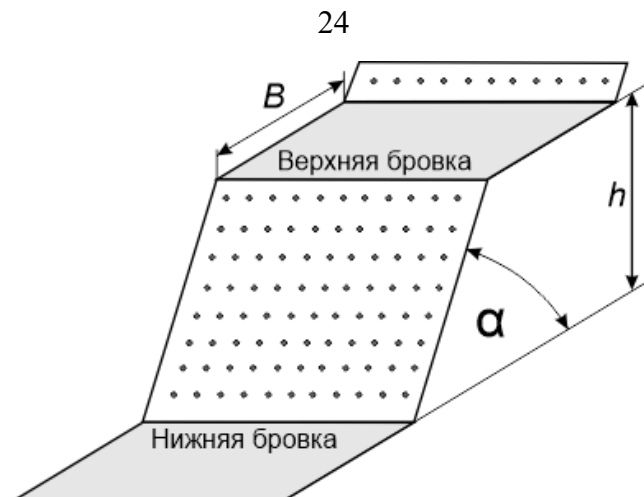


Рисунок 6 – Схема конструкции уступа карьера: h – высота уступа; α – угол откоса уступа; B – ширина предохранительной и транспортной бермы (составлено автором)

В работах по устойчивости откосов карьеров показано, что угол 35° является рациональным компромиссом между структурной безопасностью и экономически приемлемым объёмом вскрышных работ. Схема одного уступа без промежуточных берм применима при малой мощности залежи (до 8–12 м) [76, 179].

Выбор комплекта оборудования для разработки слабых грунтов решается как задача подбора погрузочно-транспортного парка: необходимо подобрать совместимый парк погрузочных и транспортных машин. При этом основным технологическим звеном считается пара, формирующая цикличную схему экскавации и транспортирования [111].

Для эффективного подбора оборудования необходимо учитывать:

- физико-механические свойства разрабатываемого грунта (категория грунта, плотность, влажность, сцепление);
- высоту уступа и геометрию забоя (ограничивает тип и размер экскаватора);
- состояние карьерных дорог: мягкий и обводнённый грунт повышает коэффициент сопротивления качению и снижает производительность автосамосвалов;
- совместимость погрузочного и транспортного оборудования по вместимости ковша/кузова (соотношение 1:4–1:6 ковшей на заполнение кузова).

1.3 Анализ комплекта оборудования при добыче нерудных материалов

Комплект машин (экскаватор-самосвал) находит широкое применение в открытых горных работах при добыче нерудных материалов, а также при строительстве и земляных работах [52]. Выемка и погрузка горной массы осуществляются во всех природно-климатических зонах страны, в том числе на участках со слабыми водонасыщенными грунтами и ограниченной несущей способностью основания. При этом наиболее широкое применение в технологических схемах добычи находят одноковшовые экскаваторы 2-3-й размерных групп по ГОСТ 17343-83 и автосамосвалы со сдвоенной задней тележкой по ГОСТ 7132-2017 [34].

Специфика горно-геологических условий эксплуатации комплекта машин «экскаватор-самосвал» определяет ряд характерных требований к его структуре и параметрам в рамках применяемых технологий разработки [18, 57, 69, 73]:

- экскаватор является базовым звеном технологического потока и задаёт ритм работ;
- для автосамосвалов типичны малые транспортные плечи, что усиливает влияние организации подъездов и времени маневрирования на производительность комплекта машин;
- движение автосамосвалов по слабым грунтам требует ограничений по полезной нагрузке и скорости;
- для снижения удельного давления на грунт и уменьшения колееобразования применяются технологические и конструктивные меры.

Ограничения по параметрам проходимости автосамосвалов и несущей способности основания в составе комплекта «экскаватор-самосвал» не позволяют применять на стадии проектирования характерные для горной промышленности принципы интенсификации, основанные на увеличении грузоподъёмности автосамосвалов.

Концепция комплекта «экскаватор-самосвал» позволяет обосновать тип и вид автотранспортных средств для перемещения горной массы (песка, торфа) в пределах

разрабатываемого карьера. Принципы, заложенные при формировании транспортной концепции, учитывают использование серийных автосамосвалов и (при необходимости) машин повышенной проходимости, их адаптацию к слабым грунтам, согласование характеристик транспорта с режимами работы экскаватора, а также требования унификации парка применяемого оборудования в различных горно-геологических и природно-климатических условиях эксплуатации.

Эффективность применения внутрикарьерного автотранспорта в составе комплекта «экскаватор-самосвал» обуславливается его основными достоинствами:

- высокая мобильность на рабочей площадке и возможность оперативного изменения положения относительно забоя и фронта работ;
- манёвренность и способность выполнять выемку, погрузку материала в пределах рабочей зоны;
- автономность и технологическая гибкость, позволяющие быстро адаптировать схему работы к изменениям горно-геологических условий.

К особенностям эксплуатации экскаватора при добыче песка и торфа следует отнести:

- ограниченную несущую способность основания и риск повышенной осадки ходовой части, что требует контроля удельного давления на грунт, выбора рационального положения и поддержания устойчивости площадки;
- выраженную зависимость производительности от состояния забоя и свойств материала (влажность);
- необходимость обеспечения безопасных параметров откосов и площадок стояния при работе на слабых грунтах.

На производительность карьерного комплекта машин влияет ряд факторов:

- горно-геологические условия и физико-механические свойства материалов, определяющие сопротивление копанию и условия формирования забоя;
- климатические факторы, влияющие на водонасыщение массива, несущую способность основания и устойчивость рабочих площадок;

- техническое состояние оборудования и его соответствие условиям эксплуатации;
- организация погрузочного процесса, которая задаётся прежде всего режимом работы экскаватора.

Для выполнения земляных работ на слабых грунтах предпочтительным является применение экскаватора с широким гусеничным ходом, обеспечивающим пониженное удельное давление на грунт. При увеличении ширины гусеничного хода на 20% удельное давление на грунт снижается примерно на 16,7%, а при одновременном увеличении ширины гусеничного хода на 20% и длины опорной поверхности гусениц на 10% давления на грунт снижается на 24,2% [138, 145, 148].

Технологическая связь автосамосвала с экскаватором служит не только для приёма и вывоза экскавированного материала, включая в организацию подачи под погрузку, допустимые простои и ритм циклов ведущей машины, определяет согласование параметров выемочно-погрузочного и транспортного процессов. В практике подбора состава комплекта широко применяется принцип согласования вместимости кузова с параметрами экскаватора через количество загружаемых ковшей [139], примерно за 4...6 ковшей [161].

Оптимизация согласования снижает потери времени на ожидание погрузки и простои экскаватора из-за отсутствия транспорта, что прямо отражается на технико-экономических показателях процесса. При этом выемочно-погрузочные операции относятся к наиболее затратным при открытых работах и в публикациях указывается уровень порядка 50–60% в структуре прямых эксплуатационных затрат карьера, что дополнительно усиливает требование к минимизации простоев экскаватора и рациональной организации подачи самосвалов [158]. В частности, в исследовании по коэффициенту согласования для карьерных парков показано, что применение процедуры согласования позволяет повысить производительность на 10,6% [162].

1.3.1 Анализ применения гидравлических экскаваторов

Одной из задач исследования является повышение эффективности экскавации и погрузки нерудных материалов (песка и торфа) за счёт подбора рациональных параметров карьерного экскаватора и его рабочего оборудования в составе комплекта «экскаватор-самосвал». Принимая во внимание особенности работы на слабых грунтах, а также требования к устойчивости и проходимости машины, за основу для комплектования парка машин в работе принят одноковшовый гусеничный гидравлический экскаватор SANY SY135C третьей размерной группы (Приложение А).

Важным конструктивным преимуществом при работе на слабых грунтах является возможность выбора ходовой части и ширины гусениц, что позволяет снизить удельное давление на основание. По данным технической документации для SANY SY135C (рисунок 7) увеличение ширины гусениц приводит к снижению давления, например: для варианта SANY SY135C при переходе с 500 мм (44,1 кПа) на 750 мм (29,8 кПа) давление уменьшается примерно на 32,4%; для варианта SANY SY135C при переходе с 600 мм (36,3 кПа) на 900 мм (25,3 кПа) – примерно на 30,3% [83].



Рисунок 7 – Гидравлический экскаватор SANY SY135C (фото автора)

К особенностям гидравлического экскаватора следует отнести следующие возможности дополнительной комплектации [32, 97]:

- гусеницы увеличенной ширины (болотное исполнение);
- удлинённая ходовая часть (увеличение длины опорной поверхности).

Это повышает проходимость и уменьшает потери энергии на деформацию слабого основания.

Размеры, масса, мощность двигателя и конструктивные особенности экскаватора в соответствии с заданной целью функционирования определяются исходя из условий его эксплуатации и назначения, включая требования к устойчивости, проходимости и эффективности выемочно-погрузочных операций [6, 97]. Элементы системы «грунт–машина» приведены на рисунке 8.

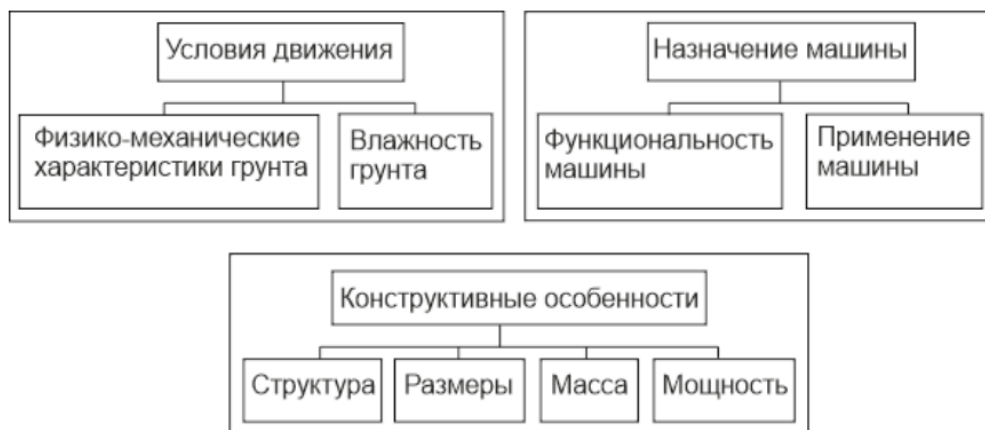


Рисунок 8 – Элементы системы «грунт–экскаватор» [45]

Гусеничный ход экскаватора определяет условия взаимодействия машины с грунтовым основанием. За счёт увеличенной площади опоры гусеничный движитель обеспечивает снижение удельного давления на грунт, повышение устойчивости экскаватора и расширение области его применения на слабых и водонасыщенных грунтах. Методика определения среднего давления гусеничного хода регламентируется международным стандартом ISO 16754 и его национальным аналогом ГОСТ 16754–2013 [24, 36, 136].

Рациональные диапазоны ширины гусениц экскаватора и соответствующие значения среднего давления на грунт для различных типов оснований приведены в

таблице 7. Представленная классификация отражает обобщённые инженерные рекомендации и соответствует требованиям нормативных документов и эксплуатационной практике [35].

Таблица 7 – Рекомендуемые размеры гусениц экскаватора в зависимости от типа грунта [35]

Тип грунта	Несущая способность основания	Ширина гусениц, мм	Среднее давление на грунт, кПа
Суглинки, супеси средней плотности	средняя	600–800	60–90
Пески средней плотности	пониженная	700–900	40–70
Слабые водонасыщенные пески	низкая	800–1000	30–50
Торф, органогенные грунты	очень низкая	900–1200 и более	< 20–30

В связи с этим в практике машиностроения и эксплуатации экскаваторов применяется классификация гусеничного хода по уровню удельного давления на грунт, которая позволяет выделить варианты ходовой части (таблица 8) [33].

Таблица 8 – Классификация гусеничного хода экскаватора по уровню давления на грунт [33]

Тип гусеничного хода	Удельное давление на грунт, кПа	Конструктивные особенности	Область применения
Стандартный	70–120	Стандартная ширина гусениц	Плотные и средние грунты
Пониженного давления	40–70	Уширенные гусеницы	Песчаные и слабые грунты
Низкого давления (LGP)	20–40	Широкие гусеницы, удлиненная база	Водонасыщенные пески
Сверхнизкого давления	< 20	Суперширокие гусеницы, специальные конструкции	Торф, болота

Таким образом, размеры гусеничного хода экскаватора должны назначаться на основе оценки несущей способности грунта и расчёта среднего давления на основание.

Для песчаных и особенно торфяных грунтов рациональный выбор ширины гусениц является критическим фактором обеспечения устойчивости экскаватора и

безопасности ведения горных работ, что подтверждается требованиями нормативных документов и практикой эксплуатации карьерных машин [33].

1.3.2 Анализ применения самосвалов в составе комплекта машин

Для разработки песчаных месторождений при наличии временных технологических дорог рациональным является применение самосвалов повышенной проходимости, обеспечивающих устойчивую реализацию тягового усилия на слабом основании. Общие технические требования к карьерным самосвалам регламентируются ГОСТ 30537–97.

При формировании транспортного звена для песчаных карьеров ключевым является обеспечение устойчивой работы самосвалов на временных технологических проездах, которые в период переувлажнения характеризуются снижением несущей способности и ростом деформируемости основания [204]. В этих условиях выбор типа самосвала определяется компромиссом между грузоподъемностью и проходимостью: дорожные карьерные самосвалы рациональны при наличии сформированных дорог, тогда как на слабых участках предпочтение получают машины повышенной проходимости (полный привод, улучшенная тяга) (таблица 9).

Таблица 9 – Категории самосвалов, пригодных для песчаных карьеров [204]

Категория	Грузоподъемность, т	Проходимость	Типичная колёсная формула	Где рационально применять
Дорожный/ карьерный самосвал	~10–25	По сформированным дорогам; вне дорог ограничено	6×4, 6×6, 8×4	Коротко-средняя откатка, подъездные дороги, устойчивые песчаные уступы
Тяжёлый внедорожный самосвал	~20–40	Проходимость выше, чем у дорожных	6×6, 8×8	Разрыхлённый песок, временные дороги, переменная погода

На основании сравнительного анализа (таблица 9) следует отметить, что для песчаных карьеров с участками сезонного переувлажнения наиболее устойчивым решением является применение самосвалов повышенной проходимости (6×6), а при выраженной неоднородности трассы – сочленённых самосвалов (ADT), поскольку

именно они сохраняют работоспособность при локальных «пятнах слабости грунта» и обеспечивают минимальные потери времени на маневрирование в зоне погрузки.

Анализ условий эксплуатации показывает, что при работе на слабых грунтах критическим параметром является полная масса гружёной машины, определяющая величину контактных напряжений и интенсивность колееобразования. При превышении несущей способности основания наблюдается резкое увеличение глубины колеи и сопротивления качению, что приводит к снижению фактической производительности независимо от паспортной грузоподъёмности [106].

В связи с этим в составе комплекта целесообразно применять самосвалы:

- с колёсной формулой 6×6;
- с блокировками дифференциалов;
- с широкопрофильными флотационными шинами, допускающими эксплуатацию при пониженном давлении воздуха в шинах;
- обладающие повышенной маневренностью в зоне погрузки.

На рисунке 9 представлен общий вид самосвала повышенной проходимости, применяемого в составе комплекса «экскаватор–транспорт».



Рисунок 9 – Самосвал КАМАЗ 45141-011-50 [77]

Основные параметры и технические характеристики самосвала КАМАЗ 45141-011-50 приведены в Приложении А. Базовое шасси укомплектовано системами МОБ

и МКБ, которые помогают во время езды по бездорожью и труднопроходимым отрезкам дорог. Имея кузов вместимостью 6,6 м³, самосвал может перевозить до 9,5 т груза. Такие характеристики указывают на отношение машины к типу строительных самосвалов, основным предназначением которых является транспортировка сыпучих грузов плотностью до 1,5 т/м³. Во время маневров машина защищена от опрокидывания равномерным распределением груза и соблюдением параметров масс.

Шины типоразмера 425/85 R21 имеют радиальную конструкцию, которая обеспечивает прочность, устойчивость к высоким нагрузкам и долговечность при эксплуатации по бездорожью полноприводных грузовых автомобилей.

Вездеходное шасси самосвала КАМАЗ 45141-011-50 предназначено для любого типа дорог. Таким образом, для песчаных карьеров с временными дорогами и сезонным переувлажнением рационально применять самосвалы повышенной проходимости с колесной формулой 6×6, поскольку они устойчиво работают на слабых основаниях. Ключевыми факторами являются: ограничение полной массы, блокировки дифференциалов, широкопрофильные шины и возможность работы при пониженном давлении, воздуха в них при соблюдении требований стандарта.

1.3.3 Анализ применения тракторных транспортных агрегатов

Исследованиями установлено, что наилучшие технико-экономические показатели в торфяной отрасли могут быть получены при использовании колесных тракторов с двигателем мощностью 90-110 и 130-150 кВт. На основе многолетнего опыта эксплуатации тракторов тягового класса 3,0, а также с учетом особенностей эксплуатации на слабых грунтах и необходимости обеспечения требуемой силы тяги в работе за основу комплектования транспортного агрегата принят трактор BELARUS-1523.4 [9]. Трактор предназначен для выполнения транспортных работ с полуприцепами. Конструкция трактора выполнена по схеме 4К4а и имеет два ведущих моста. На рисунке 10 представлен общий вид трактора BELARUS-1523.4 на

сдвоенных колесах [9]. Основные параметры и технические характеристики трактора BELARUS-1523.4 приведены в Приложении А.



Рисунок 10 – Трактор BELARUS-1523.4 на сдвоенных колесах [9]

Посредством сдваивания колес трактора можно добиться увеличения его опорной поверхности и, как следствие, повышения проходимости и тягово-сцепных свойств [84].

Транспортирование экскавированного торфяного сырья должно обеспечивать перевозку сырья насыпной плотностью $750-950 \text{ кг/м}^3$ при максимальном использовании грузоподъемности транспортного средства.

Мероприятия для совершенствования конструкций полуприцепов можно обобщить рядом признаков [65, 66]:

- повышение единичной грузоподъемности до допустимых пределов;
- снижение собственной массы для увеличения номинальной грузоподъемности или снижения удельного давления на грунт;
- применение флотационных шин.

Весь диапазон дорожных условий, в которых эксплуатируются горнотранспортные агрегаты, предлагается разделить на четыре категории (таблица 12) [67]. IV категория условий эксплуатации соответствует слабым грунтам, на которых действует ограничение на полную массу прицепного звена по условиям сцепления ведущих колес трактора (таблица 10).

Таблица 10 – Классификации условий эксплуатации по типу ограничений на эксплуатационные показатели горнотранспортного агрегата [45]

Категории условий эксплуатации	Полная масса прицепного состава	Скорость движения
I	$m_n = m_{n\max}$	$v = v_{\max}$
II	$m_n = m_{n\max}$	$v < v_{\max}$
III	$m_{n\text{пред}} < m_n < m_{n\max}$	$v < v_{\max}$
IV	$m_n \leq m_{n\text{пред}}$	$v \leq v_{\max}$

Тракторные транспортные средства по конструкции подразделяются на прицепы и полуприцепы. В прицепе общий вес распределяется между передней и задней осями. В полуприцепе общий вес распределяется на гидрокрюк тягача и оси полуприцепа. В функциональном отношении полуприцеп обладает хорошей маневренностью, особенно при движении задним ходом, его конструкция проста, а масса на 20-30% меньше, чем у прицепа. В тяжелых дорожных условиях тягачи с полуприцепами обладают более высокой эксплуатационной надежностью, чем тягачи с прицепами. Часть веса полуприцепа распределяется на его раму, другая часть нагрузки посредством дышла передается на тягач, повышая тягово-сцепные характеристики на слабом грунте. В результате полуприцеп имеет на 30% большую грузоподъемность, чем у прицепной версии транспортного средства [45].

Таким образом, в результате анализа конструктивных особенностей и функциональности транспортных средств в работе выбран полуприцеп для агрегатирования с колесным трактором тягового класса 3,0.

В рамках анализа известных конструкций полуприцепов с учетом минимума по массе и габаритам определен полуприцеп ПСТ-7-1Б производителя «Бобруйскагромаш», предназначенный для транспортирования различных строительных и сельскохозяйственных сыпучих грузов плотностью до 1,15 т/м³ (органических удобрений и др.) с разгрузкой назад (рисунок 11) [70]. Кузов типа «монокок» имеет высокие борта. Задний борт снимается, что упрощает разгрузку кузова на торфяных площадках.



Рисунок 11 – Полуприцеп тракторный самосвальный ПСТ-7-1Б [71]

Для перевозки влажного торфяного грунта кузов полуприцепа следует оснащать вкладышем из полиуретана, что в результате:

- снижает адгезию: перевозимый материал не налипает к стенкам кузова даже в зимнее время;
- существенно уменьшает коэффициент трения грунта по кузову при выгрузке;
- полностью отсутствует коррозия металла кузова;
- значительно продлевается срок эксплуатации полуприцепа.

Для применения на слабых грунтах при карьерной добыче торфяного сырья полуприцеп тракторный самосвальный ПСТ-7-1Б оснащается шинами низкого давления Бел-91 24.0/50-22,5 4-хслойная 1150х620-22,5" (рисунок 12), сочетающими в себе проходимость и экологичность тонкостенных и высокий ресурс классических многослойных шин [7]:

- возможность передвижения по слабому грунту, адаптация к рельефу грунта, оригинальный самоочищающийся рисунок протектора, исключая буксование на слабонесущих грунтах;
- меньшая масса (по сравнению с многослойными шинами);
- низкое давление на грунт за счет снижения внутреннего давления воздуха в шине от 30 до 130 кПа, широкий профиль, что дает большую площадь контакта;
- высокая несущая способность – до 3,5 т.



Рисунок 12 – Шина повышенной проходимости «LS-2» Бел-91 [7]

Установка этих шин не требует конструктивной переделки и «лифта» полуприцепа.

1.4 Управление комплектом оборудования

Рациональным позиционированием экскаватора можно считать 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 принять:

- эффективность погрузки самосвала: снижение угла поворота платформы при погрузке самосвала ($60-90^\circ$) 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.

Рациональное взаимное позиционирование гидравлического экскаватора и карьерного самосвала является одним из определяющих условий эффективной и безопасной работы экскаваторно-автомобильного комплекса при добыче нерудных материалов [85, 207]. При управлении комплектом машин «экскаватор–самосвал»

решаются вопросы выбора точки стоянки самосвала, угла его установки относительно экскаватора, а также схемы подъезда и выезда с учётом геометрии рабочей площадки, конфигурации забоя, радиуса поворота платформы, условий видимости и требований промышленной безопасности. Следовательно, задача взаимного позиционирования должна рассматриваться как составная часть общей задачи рациональной организации работы комплекта машин «экскаватор–самосвал» в процессе погрузки горной массы [168].

Типовой вариант взаимного позиционирования «экскаватор–самосвал» в различных условиях рабочей площадки приведен на рисунке 13.

Схема отражает позиционирование экскаватора и самосвала, с учетом сектора поворота платформы при разгрузке ковша в кузов. Расстояние между кузовом экскаватора и транспортным средством должно быть не менее 1 м.

Основным принципом рационального позиционирования является минимизация угла поворота поворотной платформы при разгрузке ковша в кузов самосвала при обязательном соблюдении требований безопасности, устойчивости и технологичности манёвра [39].

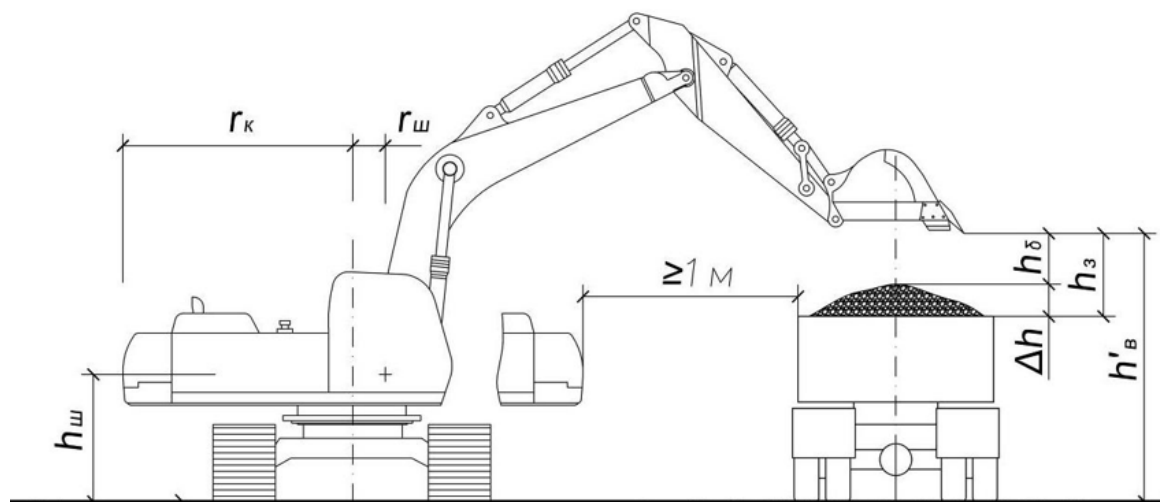


Рисунок 13 – Схема взаимного позиционирования комплекта машин «экскаватор–самосвал» на рабочей площадке: Δh – превышение призмы грунта в кузове над его бортом, $\Delta h=0,3$ м; h_{δ} – запас высоты режущей кромки ковша над призмой грунта; для гидравлических экскаваторов $h_{\delta}=0,1-0,3$ м (составлено автором)

Уменьшение угла поворота снижает продолжительность рабочего цикла, непроизводительные затраты времени на разворот платформы и наведение ковша, уменьшает динамическую нагруженность рабочего оборудования. По этой причине наиболее предпочтительными являются схемы, при которых разгрузка выполняется в секторе порядка $45\text{--}90^\circ$, тогда как поворот около 180° следует рассматривать как вынужденный и наименее эффективный вариант. Не менее важным условием является обеспечение устойчиво достижимого рабочего сектора экскаватора. Самосвал должен располагаться таким образом, чтобы загрузка кузова осуществлялась без работы на предельных вылетах и высотах разгрузки ковша, поскольку такие режимы увеличивают время позиционирования ковша, снижают точность разгрузки и ухудшают управляемость рабочих движений. Положение транспортного средства должно обеспечивать безопасный проход ковша над кузовом при минимально необходимом подъёме стрелы, а также исключать пересечение габаритов самосвала с противовесом поворотной платформы во всём диапазоне рабочих движений экскаватора.

Дополнительным принципом рационального взаимного позиционирования является минимизация вспомогательных движений рабочего оборудования экскаватора, включая избыточный подъём стрелы, дополнительные перемещения рукояти и корректирующие движения ковша при разгрузке. Сокращение продолжительности указанных движений способствует уменьшению продолжительности цикла, повышению точности загрузки кузова [21].

Существенное значение имеет фактор видимости. Наличие слепых зон у экскаватора и самосвала повышает вероятность конфликтов при маневрировании, подъезде и постановке под погрузку. В связи с этим рациональная схема позиционирования должна обеспечивать максимально предсказуемое расположение транспортного средства в поле зрения оператора экскаватора и минимизировать пребывание техники и персонала в зонах ограниченного обзора. Особенно это важно в стеснённых условиях рабочей площадки, когда пространство для манёвра

ограничено, а ошибки позиционирования могут привести к нарушению безопасных промежутков между машинами [59, 159].

Организация движения технологического транспорта должна рассматриваться как неотъемлемая часть позиционирования комплекта машин «экскаватор–самосвал». Предпочтение следует отдавать схемам, обеспечивающим прямолинейный подъезд самосвала к месту погрузки и последующий выезд без пересечения траекторий движения с рабочей зоной экскаватора. Особенно важно ограничивать продолжительное движение задним ходом, поскольку оно увеличивает требования к координации, снижает безопасность манёвра и повышает риск аварийных ситуаций. Для повышения пропускной способности фронта работ целесообразно предусматривать зону ожидания следующего самосвала вне сектора поворота платформы, что позволяет сократить простои при смене транспортных средств и уменьшить вероятность конфликтных ситуаций [114, 120].

Отдельным принципом является формирование запретных зон в рабочей области экскаватора. К таким зонам относятся сектор поворота платформы, область возможного удара противовесом, траектория движения ковша и участки с ограниченной видимостью [104]. В пределах указанных зон должны быть исключены остановка транспорта, нахождение персонала и любые несанкционированные манёвры [193]. Реализация данных требований обеспечивается как инженерными решениями, связанными с выбором точки стоянки и маршрутов движения, так и организационными мерами, включающими регламент подъезда, правила сигнализации и порядок взаимодействия машиниста экскаватора и водителя самосвала [90].

Для условий разработки слабых грунтов, в частности песка и торфа, принципы рационального позиционирования должны применяться с приоритетом устойчивости и несущей способности рабочей площадки [123]. Даже в тех случаях, когда определённая схема обеспечивает уменьшение угла поворота платформы, она не может быть принята, если приводит к размещению техники в зоне риска просадки,

сдвига или опасного приближения к бровке уступа [51]. Следовательно, при выборе схемы позиционирования приоритет должен отдаваться не только минимизации продолжительности цикла, но и обеспечению безопасных условий работы на уступе [105].

Следует отметить, что схема взаимного позиционирования комплекта машин «экскаватор–самосвал» не является универсальной и должна адаптироваться к конкретным условиям забоя, параметрам рабочей площадки, свойствам разрабатываемого грунта и организации движения технологического транспорта [209]. Такой подход обеспечивает возможность выбора рационального варианта постановки самосвала в зависимости от производственных и горнотехнических условий [146].

Таким образом, рациональное взаимное позиционирование комплекта машин «экскаватор–самосвал» следует рассматривать как многокритериальную задачу, в которой целевыми функциями являются минимизация продолжительности цикла погрузки и минимизация риска аварийных ситуаций, а ограничения – геометрические параметры машин, размеры рабочей площадки, условия устойчивости основания, параметры забоя и требования безопасности. При наличии достаточного пространства наиболее эффективной является схема с установкой самосвала в секторе $45\text{--}60^\circ$, в стеснённых условиях целесообразно применение схемы около 90° , тогда как схема с поворотом около 180° должна рассматриваться как вынужденное решение, указывающее на необходимость совершенствования организации работ на уступе, изменения схемы подъезда или корректировки расположения экскаватора в пределах рабочей площадки.

1.5 Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования

Анализ особенностей технологии карьерного способа добычи нерудных материалов показал, что обоснование структуры комплекта технологического оборудования определяется как характеристиками залежей нерудных материалов, так

и техническими параметрами комплекта экскаватор-самосвал, а также условиями их взаимодействия в процессе добычи.

В работе обосновано направление исследования с упором на широко распространенные виды нерудных материалов: песчаная залежь – слабый несвязный грунт; торфяная залежь – слабый связный грунт.

Добыча этих нерудных материалов карьерным способом – это процесс разработки месторождения в основном в карьере с одним выемочным уступом.

Песчаная и торфяная залежи относятся к I группе грунтов по трудности копания – малопрочное и легкодеформируемое основание, на котором происходит выемка грунта, и по которому перемещаются машины комплекта. В связи с этим, выбор типа и необходимых размеров опорных поверхностей ходового устройства машин комплекта производится с учетом деформационных и прочностных свойств залежи, характеризующих ее поведение при воздействии внешних нагрузок.

В результате анализа условий функционирования одноковшового гидравлического экскаватора на карьерах нерудных материалов установлено, что на эффективность и безопасность его работы оказывают влияние горно-геометрические, геотехнические и эксплуатационные факторы.

Для выполнения выемки грунта с откоса карьера нерудных материалов в работе обоснован одноковшовый гидравлический экскаватор 3-й размерной группы SANY SY135C с шириной гусениц 1500 мм.

Для выполнения транспортных задач на песчаных карьерах с временными дорогами и сезонным переувлажнением рационально применять легкие самосвалы КАМАЗ 45141-011-50 с вездеходным шасси повышенной проходимости, с колесной формулой 6×6 и вместимостью кузова 6,6 м³.

На торфяных карьерах рационально применять горнотранспортные агрегаты в составе: колесный трактор БЕЛАРУС-1523.4-10/99 тягового класса 3 т со сдвоенными колесами и колесный двухосный полуприцеп самосвальный ПСТ-7-1Б с герметичным

кузовом, со сдвоенными колесами и шинами низкого давления Бел-91 24.0/50-22,5, вместимостью кузова 6,0 м³.

Эти машины обладают высокой маневренностью, циклично совершают транспортировку экскавированного сырья от забоя до отвала.

Продолжительность рабочего цикла выемка-погрузка сырья в самосвал определяется кроме физико-механических свойств залежи и вынуженого сырья правильностью позиционирования экскаватора на уступе карьера и взаимным позиционированием комплекта экскаватор-самосвал.

Рациональное позиционирование машин на уступе карьера определяет в целом производительность комплекта машин. что требует проведения дополнительных научных исследований.

По результатам проведенного анализа сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

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

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.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРА

2.1 Обоснование позиционирования гидравлического экскаватора на уступе карьера

Позиционирование экскаватора на уступе карьера представляет собой инженерно-технологическую задачу, в которой должны быть одновременно учтены геометрические параметры уступа и рабочей площадки, геотехническая устойчивость уступа карьера, а также эксплуатационные взаимодействия комплекта машин. Геометрия уступов (высота, бермы, ширина рабочих площадок), конфигурация транспортных коммуникаций и планировка зон погрузки назначаются таким образом, чтобы принятая технологическая схема обеспечивала требуемую производительность при соблюдении требований устойчивости и безопасной эксплуатации [46, 88].

Неправильное позиционирование оборудования ведет к потерям времени при выемке, погрузке, вынужденным маневрам и неполному использованию энергии двигателя машин, вследствие чего фактическая производительность часто существенно ниже паспортной [55, 115]. Поэтому необходимо научно обосновать рациональную схему позиционирования экскаватора на уступе и согласованного взаимодействия с самосвалами, а также определить безопасные зоны работы машин и персонала. Ниже изложены ключевые аспекты [127, 147, 184]:

- рациональное позиционирование экскаватора на рабочем уступе для эффективной выемки слабых грунтов;
- скоординированное позиционирование экскаватора и самосвалов для минимизации холостых проходов и расстояний маневрирования;
- обоснование безопасной зоны взаимодействия машин и людей, для снижения рисков и повышения организационной эффективности.

Для карьеров нерудных материалов, разрабатываемых в условиях слабых и водонасыщенных грунтов (характерных для песчаных и торфяных залежей), обоснование позиционирования приобретает повышенную значимость, поскольку

система «рабочая площадка – машина – грунтовое основание» может ограничивать допустимые нагрузки, предельные уклоны и безопасные режимы маневрирования оборудования [142].

Даже при корректно принятых параметрах уступа эксплуатационная работоспособность комплекта нередко определяется несущей способностью и деформационными свойствами грунтового основания, а также устойчивостью машины при выполнении операций выемки и поворотов платформы для разгрузки ковша. В связи с этим задача позиционирования структурируется на три взаимосвязанных направления [14, 180]:

- позиционирование экскаватора на уступе карьера;
- позиционирование пары «экскаватор–самосвал» в зоне погрузки;
- позиционирование «экскаватор–персонал» с исключением нахождения людей в опасных зонах.

2.1.1 Анализ условий позиционирования экскаватора на уступе карьера

При разработке залежей нерудных материалов (песок, торф) гидравлический экскаватор часто эксплуатируется в зоне, где геометрия откоса и состояние приповерхностного массива определяют предельные условия безопасного размещения машины. В этой связи ключевым параметром позиционирования выступает расстояние B – отступ от бровки уступа до ближайшей кромки опорного контура (края гусеницы) (рисунок 14). Инженерный смысл B заключается в исключении попадания области повышенных напряжений, создаваемых экскаватором, в зону потенциального сдвига и/или локального разрушения кромки откоса, поскольку нагрузка от экскаватора у бровки способна изменять положение критической поверхности скольжения и снижать устойчивость машины [127, 147].

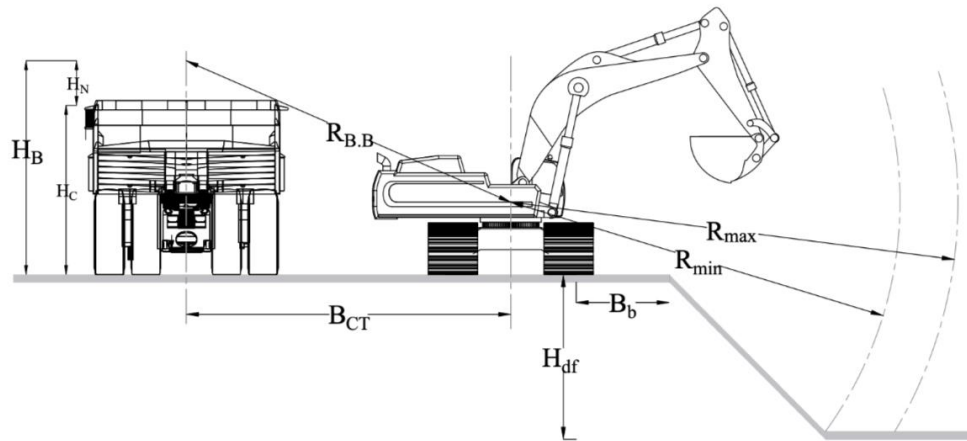


Рисунок 14 – Схема взаимодействия экскаватора и самосвала на уступе карьера
(составлено автором)

Опасность размещения экскаватора вблизи бровки уступа обусловлена двумя взаимосвязанными предельными состояниями [13].

Во-первых, возможно развитие глобальной неустойчивости откоса, когда формируется поверхность скольжения, захватывающая часть уступа/бермы и область приложения нагрузки; количественной мерой служит коэффициент запаса устойчивости FoS , определяемый методами предельного равновесия методами предельного равновесия устойчивости уступа.

Классические и широко применяемые варианты определения коэффициента запаса устойчивости уступов включают метод Бишопа для круглоцилиндрических поверхностей, а также более общие постановки Morgenштерна-Прайса и Спенсера, обеспечивающие выполнение условий равновесия при произвольной форме поверхности скольжения [107, 160, 194].

Во-вторых, при малой ширине бермы возрастает вероятность местной потери несущей способности основания и разрушения кромки уступа, поскольку близость откоса приводит к снижению предельной несущей способности и изменению схемы пластических зон под экскаватором (эффект «свободной границы») [153].

Для корректного обоснования ширины бермы, нагрузку от веса экскаватора целесообразно представлять в виде распределённого давления на пятно контакта

гусениц. При расчётной вертикальной нагрузке и суммарной площади контакта среднее давление определяется как (1):

$$q_{\text{avg}} = W/A. \quad (1)$$

где q_{avg} – среднее распределённое давление экскаватора на грунтовое основание, кПа; W – расчётная вертикальная нагрузка от эксплуатационной массы экскаватора, кН; A – суммарная площадь пятна контакта гусеничного движителя с поверхностью бермы, м².

Однако при выемке грунта и вылете рабочего оборудования в сторону откоса возникает эксцентриситет результирующей нагрузки относительно центра опорного контура, вследствие чего давление под ближней к бровке гусеницей превышает среднее. Для аппроксимации распределения контактных напряжений по ширине гусеницы экскаватора используется классическая зависимость [198] для прямоугольного основания при эксцентриситете e (2, 3):

$$q_{\text{max}} = q_{\text{avg}} \left(1 + \frac{6e}{B} \right), \quad (2)$$

$$q_{\text{min}} = q_{\text{avg}} \left(1 - \frac{6e}{B} \right). \quad (3)$$

где $e=M/W$, M – опрокидывающий момент от положения рабочего оборудования и перемещаемой массы.

Следовательно, при назначении безопасной ширины бермы расчёт должен выполняться по наихудшему сценарию нагружения, принимая $q \approx q_{\text{max}}$ для зоны ближней гусеницы, что соответствует общим положениям механики грунтов и расчёта оснований по предельным состояниям грунта [198].

Определение минимальной ширины бермы целесообразно формулировать как задачу подбора положения экскаватора у бровки, при котором одновременно выполняются условия глобальной и местной устойчивости. Практически это реализуется итерационным увеличением отступа: в расчётной модели откоса задаются геометрия уступа и бермы, выбирается прочностная схема грунта, после чего

номинальная нагрузка от экскаватора прикладывается на площадке контакта гусениц с грунтом таким образом, чтобы ближайшая к бровке кромка опорного контура находилась на расстоянии B .

Величина B считается обоснованной при выполнении требования $FoS(B) \geq FoS_{req}$ по выбранному методу предельного равновесия устойчивости уступа, а также при выполнении условия по местной устойчивости машин у бровки (4) [198]:

$$q_{\max} \leq q_{\text{allow}} \quad (4)$$

где q_{allow} – учитывает снижение несущей способности из-за близости откоса.

Таким образом, расчётное значение следует принимать как максимум из двух ограничений – по общей устойчивости откоса и по местной устойчивости кромки уступа [127, 147, 153].

Если позиционирования машины задаётся, то переход к искомому отступу от бровки до ближайшей кромки гусеницы выполняется геометрически (5):

$$B = x_c - \frac{B_c}{2} \quad (5)$$

где x_c – расстояние от бровки до продольной оси экскаватора; B_c – ширина опорного контура поперёк откоса.

В результате B становится формализованным параметром позиционирования, напрямую включаемым в расчёт устойчивости машин и обоснования безопасной дистанции позиционирования экскаватора у бровки на основе инженерных критериев и расчётных моделей, а не эмпирических оценок [160, 194].

2.1.2 Анализ условий позиционирования экскаватора в зоне погрузки

При позиционировании самосвала относительно экскаватора параметр $B_{\text{ст}}$ целесообразно задавать как расстояние в плане между осью поворота (центром вращения) экскаватора и продольной осью стоянки самосвала [16, 207].

Расстояние между задней частью поворотной платформы экскаватора и внешними объектами должно приниматься не менее 1 м; также указывается необходимость позиционирования ожидающего транспорта за пределами радиуса

действия ковша с дополнительным запасом [53]. Рассматриваемое условие представляется в виде неравенства, определяющего минимально допустимое расстояние $B_{ст}$ (6):

$$B_{ст} \geq R_{хв} + \left(\frac{B_c}{2} + \delta_c \right) + a_{\min}, \quad (6)$$

где $R_{хв}$ – радиус задней части от оси поворота, м; B_c – габаритная ширина самосвала, м; δ_c – добавка на выступающие элементы, м; a_{\min} – минимальный безопасный зазор (принимаемый по требованиям производственной безопасности; в практических схемах – не менее 1 м) [53].

При заданной высоте борта кузова $H_{тн}$ и технологическом запасе по высоте $h_з$ (7, 8):

$$H_{сам}(R) \geq H_{тн} + h_з, \quad (7)$$

$$R_{\min}(H) \leq B_{ст} \leq R_{\max}(H), \quad (8)$$

что соответствует практике взаимного позиционирования машин в рабочей зоне и согласованию параметров экскаватора и самосвала [171].

На предварительной стадии взаимного позиционирования машин расстояние между парковочными осями экскаватора и самосвала допускается оценивать по траектории разгрузки (9) через максимальную высоту разгрузки ковша H_B и максимальный радиус разгрузки при этой высоте $R_{В.В}$ (10) [16, 171]:

$$B_{ст} = \sqrt{H_B^2 + R_{В.В}^2}, \quad (9)$$

где H_B – максимальная высота разгрузки ковша, м; $R_{В.В}$ – максимальный радиус разгрузки, м.

Для укрупнённых оценок параметр $R_{В.В}$ может быть приближённо выражен через длины стрелы и рукояти (10) [16]:

$$R_{В.В} = 0,75(l_p + l_c), \quad (10)$$

где l_p – длина рукояти экскаватора, м; l_c – длина стрелы экскаватора, м.

При размещении экскаватора у бровки уступа дополнительно выполняется проверка взаимного позиционирования машин по ограничению рабочего положения относительно геометрии уступа, с учетом показателя (11) [16]:

$$H_k = H_{df} - H_{m.k} - B, \quad (11)$$

где H_{df} – высота уступа, м; $H_{m.k}$ – предельный параметр копания, м; B – минимальное расстояние от края откоса до гусениц экскаватора, м.

Завершающее уточнение $B_{ст}$ выполняется по критерию производительности, поскольку пространственная компоновка влияет на продолжительность цикла через угол поворота платформы и траекторию подачи ковша. Эмпирически определено, что параметры взаимного положения экскаватора и самосвал (включая расстояние и углы поворота) являются значимыми факторами погрузки и времени загрузки [207]; аналогичные выводы о зависимости производительности экскаваторно-автомобильных комплексов от организационно-пространственных параметров приводятся в методиках расчёта производительности гидравлических экскаваторов [85]. В этом смысле рациональное расстояние между гидравлическим экскаватором и самосвалом следует назначать как компромисс: минимально возможное по продолжительности цикла, но не нарушающее безопасность.

Таким образом, для проектного назначения расстояния между гидравлическим экскаватором и самосвалом целесообразно использовать принцип «максимума ограничений» с обязательной проверкой верхней границы по рабочей диаграмме (12, 13) [53, 171]:

$$B_{ст} = \max(B_{ст}^{Бз}, B_{ст}^{Гз}), \quad (12)$$

$$B_{ст} \leq R_{\max}(H). \quad (13)$$

где $B_{ст}^{Бз}$ – определяется условием безопасного зазора «противовес–самосвал»,
 $B_{ст}^{Гз}$ – условиями достижимости разгрузки в кузов при требуемой высоте $H_{ин}$.

Если $B_{ст}^{Бз} > R_{max}(H)$, взаимного позиционирования машин считается неработоспособной и требует изменения схемы постановки самосвала, типа техники или геометрии рабочей площадки [168].

2.1.3 Анализ условий позиционирования «экскаватор–персонал»

Наличие персонала в рабочей зоне гидравлического экскаватора относится к наиболее критичным факторам производственной безопасности, поскольку основная группа тяжёлых инцидентов при земляных и погрузочных работах связана с контактными столкновениями работника с машиной. Статистико-аналитические исследования несчастных случаев в зоне работы землеройной техники показывают, что наибольший риск формируется при совмещении в одном пространстве траекторий движения рабочего оборудования/поворотной платформы и маршрутов перемещения работников, особенно при ограниченной видимости и наличии «слепых зон» оператора [131, 132, 149]. Следовательно, для обоснования допуска персонала необходимо не просто описать «рабочую зону» как геометрический охват машины, а формализовать опасную рабочую зону (зону запрета пребывания), учитывающую кинематику экскаватора и неопределённости реального процесса.

С инженерной позиции целесообразно различать геометрическую рабочую область (пространство, потенциально достижимое рабочим оборудованием и поворотной платформой), и опасную зону как расширение этой области на величину защитного запаса. Такой подход согласуется с результатами исследований по оценке опасной близости «работник–машина», где подчёркивается, что риск задаётся не только расстоянием, но и состоянием движения (поворот, движение ходом, работа с грузом), направлением и скоростью [167, 202]. существенная доля смертельных происшествий обусловлена именно ограниченной видимостью оператора и «слепыми зонами» вокруг техники, из-за чего работник может находиться в опасной близости, оставаясь необнаруженным [132, 177, 198]. Поэтому границы зон допуска персонала должны задаваться консервативно и проверяться по худшим сценариям.

В плоскости рабочего горизонта (в плане) геометрическая рабочая область для экскаватора может быть задана относительно оси поворота платформы O . Пусть $R_{дост}$ – максимальный горизонтальный вылет режущей кромки ковша (по паспорту), а $R_{хв}$ – радиус заднего габарита поворотной части (радиус противовеса/заднего свеса). Тогда базовый радиус геометрической рабочей области (14):

$$R_{\text{раб}} = \max(R_{\text{дост}}, R_{\text{хв}}). \quad (14)$$

Однако для целей охраны труда и промышленной безопасности требуется переход к зоне запрета пребывания персонала (опасной рабочей зоне) (15), вводимой с запасом Δ :

$$R_{\text{запр}} = R_{\text{раб}} + \Delta. \quad (15)$$

Величина запаса безопасности отражает суммарное влияние динамических факторов и неопределённостей: возможный непреднамеренный поворот/смещение машины, колебания рабочего оборудования, ошибки восприятия расстояния, задержки реакции, а также неопределённость определения координат при инструментальном контроле (если применяется позиционирование работников/техники) [198, 202]. Практически важно, что чрезмерно малый запас безопасности приводит к систематическому недоучёту опасных сценариев, а чрезмерно большой – к остановке работ и росту ложных тревог в цифровых системах предупреждения [95, 167].

На основе $R_{\text{запр}}$ допускается формализовать регламент присутствия персонала как трёхзонную схему.

Первая зона (запретная): область, в которой пребывание работников при работе экскаватора не допускается, то есть $d(\text{работник}) \leq R_{\text{запр}}$, сюда входят как сектор работы ковшом, так и зона поворота противовеса, поскольку травмоопасность формируется обеими кинематическими подсистемами [149, 198].

Вторая зона (контролируемая): примыкающая область, в которой кратковременное пребывание возможно только по наряду/разрешению и при обеспечении устойчивой двусторонней коммуникации с оператором (визуальный контакт/радиосвязь) [132, 177].

Третья зона (безопасная): пространство вне контролируемой зоны, предназначенное для маршрутов движения работников и организации рабочих мест. В научной постановке такая градация обеспечивает связку геометрии (радиусы машины) и управленческих мер (процедуры допуска), что принципиально для корректного описания «наличия персонала» в опасной зоне.

Для повышения строгости обоснования целесообразно указывать, что статическая оценка $R_{занр}$ является консервативной аппроксимацией, тогда как современное направление исследований предлагает динамическую опасную зону, вычисляемую по текущей позиции и состоянию оборудования с применением систем мониторинга и предупреждения (радиочастотные/позиционирующие решения, системы контроля опасной близости, в том числе двунаправленные оповещения работника) [133, 199, 201]. В частности, показана реализуемость построения динамической рабочей области машин по данным систем реального времени и её использования для предупреждения столкновений при земляных работах [201], а также эффективность оповещения работников при опасном сближении на основе BLE (Bluetooth с пониженным энергопотреблением) позиционирования [133].

2.2 Анализ условий позиционирования экскаватора на слабых грунтах

Выбор характеристик гидравлического экскаватора напрямую определяется условиями его эксплуатации, которые ограничивают область применения машины и допустимые режимы работы. При карьерной добыче нерудных материалов лимитирующим фактором выступают прочностно-деформационные характеристики основания рабочей площадки и ширины бермы, воспринимающих нагрузки от опорно-ходовой системы экскаватора. Требуемая функциональность экскаватора обеспечивается, прежде всего, снижением среднего удельного давления на грунт за счёт увеличения площади контакта ходовой части и ограничения динамических воздействий при повороте платформы [61].

Подвижность гидравлического экскаватора на слабых грунтах можно описать двумя элементами: характеристиками песчаной и торфяной залежей как основания и характеристиками машины [182]. Взаимодействие между этими двумя элементами происходит через гусеницы. Пользователи системы задают следующие основные размеры гусеничного движителя: ширину гусениц, длину опорной поверхности и колею (расстояние между гусеницами) [183, 204].

Среднее удельное давление гусеничного экскаватора на опорную поверхность $P_{оп}$ определяют по ГОСТ 30067–93 (16) [33]:

$$P_{оп} = \frac{G_э g}{2 \cdot 10 B_r (l + 0,35d)}. \quad (16)$$

где $G_э$ – эксплуатационная масса экскаватора с рабочим оборудованием, кг; g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$); B_r – ширина гусеничной ленты, м; l – среднее расстояние между ведущим и натяжным колесами гусениц, рассчитанное исходя из шага гусеничной цепи и числа звеньев, м; d – диаметр окружности, описанный вокруг гусеницы, лежащей на ведущем колесе, м.

Осадка экскаватора в грунте является результатом динамической нагрузки, которая носит временный характер. Средняя начальная осадка прямоугольного штампа (17):

$$z = P_{оп} L_{г} / E. \quad (17)$$

где z – начальная осадка (проседание гусениц), м; $P_{оп}$ – давление на опорную поверхность (давление гусениц на грунт), кПа; $L_{г}$ – ширина основания (или гусеничной ленты), м; E – модуль деформации грунта, кПа [137].

Наиболее полно физико-механический анализ условий проходимости гидравлического экскаватора по песчаным и торфяным основаниям может быть представлен зависимостью, обоснованной С.С. Корчуновым (18) [49]:

$$P = A + B \left(\frac{\Pi}{F} \right). \quad (18)$$

где P – несущая способность основания, кПа; A – удельное сопротивление основания сжатию, кПа; B – удельное сопротивление основания срезу по периметру штампа, кН/м; L – периметр штампа, м; F – площадь основания штампа, м² (отпечаток опорной поверхности гусеничного движителя экскаватора, соприкасающейся с грунтом) [84].

Номинальное давление на грунт (NGP) [35, 45] для гусеничного экскаватора рассматривает площадь контакта как произведение ширины гусеницы B_r на длину опорной поверхности гусеницы L_c .

1. Номинальное давление на грунт (NGP) рассматривает площадь контакта как произведение ширины гусеницы B_r на длину пятна контакта L одной гусеницы с учётом двух гусениц (19) [36, 148]:

$$NGP = \frac{G}{2B_r L_c}, \quad (19)$$

где G – нагрузка (вес экскаватора в рабочем состоянии), кН; B_r – ширина гусеницы, м; L_c – длина пятна контакта одной гусеницы, м.

2. Выражение для NGP соответствует среднему нормальному давлению гусеничного движителя на грунте q_k при задании через контурную (контактную) площадь $F_{кп}$ по ГОСТ Р 58656–2019 (20) [36, 176]:

$$q_k = G / F_{кп}, \quad (20)$$

где $F_{кп}$ – контурная площадь контакта гусеничного движителя с грунтом, м². При приближённой инженерной оценке $F_{кп} = 2BL$, и тогда $q_k = NGP$ [36].

3. Влияние нагрузки ковша на распределение давления под гусеницами. В процессе копания и погрузки вследствие бокового выноса рабочего оборудования и массы материала на ковше возникает опрокидывающий момент относительно продольной оси машины, что приводит к перераспределению нагрузки между гусеницами [148]. В этом случае целесообразно рассчитывать номинальное давление для каждой гусеницы отдельно (21):

$$NGP_1 = \frac{G_1}{B L_{rc}}, NGP_2 = \frac{G_2}{B L_{rc}}, \quad (21)$$

где $G_1 + G_2 = G$.

Для инженерной оценки перераспределения нагрузки можно использовать равновесие по моментам относительно продольной оси (22):

$$G_1 = \frac{G}{2} + \frac{M_y}{B_g}, G_2 = \frac{G}{2} - \frac{M_y}{B_g}, \quad (22)$$

где B_g – колея гусениц (расстояние между осями гусениц), м; M_y – момент, вызывающий перераспределение нагрузки, кН·м.

При предельной разгрузке одной гусеницы ($G_2 \rightarrow 0$) давление под нагруженной гусеницей возрастает до (23):

$$NGP_1 = \frac{G}{B L_{rc}} = 2NGP, \quad (23)$$

что объясняет наблюдаемое увеличение осадки под нагруженной гусеницей по сравнению со второй [148].

5. Контактное давление гусеницы на деформируемом грунте целесообразно определять с привлечением моделей террамеханики, связывающих давление p с осадкой z и параметрами грунта. В качестве базового соотношения широко используется модель Беккера (24) [106, 189]:

$$NGP = \left(\frac{k_c}{B_r} + k_\varphi \right) z^n. \quad (24)$$

где NGP – нормальное давление на грунт, кПа; B_r – ширина гусеницы, м; z – осадка гусениц в грунт, м; k_c, k_φ, n – параметры грунта, определяемые по данным испытаний.

2.3 Анализ методов предельного равновесия машин на уступе карьера

Устойчивость машины на карьерном уступе определяется двумя взаимосвязанными областями устойчивости: устойчивостью уступа относительно формирования и смещения по потенциальной поверхности скольжения; и

устойчивостью самой машины как жёсткого тела на поверхности уступа, включая дополнительную потерю устойчивости, вызванную локальной деформацией основания и дифференциальной осадкой гусениц (перекосом ходовой части). Первая область корректно оценивается методами предельного равновесия (Limit Equilibrium Methods, LEM), таким как метод Спенсера [98, 119, 160, 194], тогда как вторая область требует проверок устойчивости по силам и моментам, а для сильно деформируемых оснований – критериев с учётом упругой (или упруго-пластичной) реакции основания [79, 135].

Для определения устойчивости системы «карьерный уступ–основание–гидравлический экскаватор» в настоящей работе применен метод Спенсера (LEM). Расчёт выполняется по применяемой геометрии откоса и характеристиках грунта, при этом воздействие машины учитывается как внешняя нагрузка на бровке/берме. Потенциальный массив смещения разбивается на вертикальные отсеки, для которых формируются уравнения предельного равновесия, выполняется поиск критической поверхности скольжения и определяется коэффициент запаса устойчивости FoS как отношение удерживающих к сдвигающим воздействиям при предельном состоянии.

Преимущество метода Спенсера по сравнению с упрощёнными LEM-методами (*Bishop Simplified*, *Janbu Simplified* и др.) заключается в его строгости: он обеспечивает одновременное выполнение условий равновесия по силам и по моментам для всего массива, а также корректно учитывает межслойные взаимодействия при согласованной закономерности их направления/соотношения. Поэтому метод Спенсера обычно даёт более надёжные значения FoS для сложной геометрии откоса, неоднородных грунтов, порового давления и внешних нагрузок от техники, что критично при переходе от «устойчивости уступа» к «устойчивости машины на уступе» в инженерном обосновании безопасного позиционирования.

В любой точке потенциальной поверхности скольжения предельное касательное напряжение описывается критерием прочности Кулона–Мора в эффективных напряжениях (25) [2, 72]:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (25)$$

при эффективном нормальном напряжении (26):

$$\sigma' = \sigma - u. \quad (26)$$

где τ_f – предельное касательное напряжение на поверхности скольжения, Па; c' – сцепление, Па; φ' – эффективный угол внутреннего трения, рад (или °); σ' – нормальное напряжение, Па; σ – полное нормальное напряжение, Па; u – поровое давление воды на поверхности скольжения, Па.

Соотношения (25–26) обеспечивают физически корректный учёт снижения сдвиговой устойчивости из-за порового давления, что является критичным для слабых и водонасыщенных грунтов [98, 119].

В настоящей работе расчёты выполнены в программном комплексе *Rocscience Slide2D*, в котором реализован метод Спенсера и автоматический анализ критической поверхности скольжения.

Исходные условия моделирования включают геометрию уступа [47], обводнённость и внешнюю нагрузку от экскаватора в виде номинального удельного давления на грунт *NGP*, приложенного на расстоянии B от бровки. Геометрические и нагрузочные параметры расчётных серий приведены в таблице 11, а механические параметры материалов модели откоса – в таблице 12.

Во всех случаях высота уступа принималась $H=5$ м; для песка анализировались углы откоса 38°, 45°, 53°, а для торфа – комбинации углов надводной части (45°, 53°, 63°) и подводной части (38°, 45°, 53°).

Таблица 11 – Диапазон изменения угла откоса [156]

Песчаная залежь	Торфяная залежь	
	Над водой	Под водой
1,0:1,25 (38 °)	1:1 (45 °)	1:1,25 (38 °)
		1:1 (45 °)
		1:0,75 (53 °)
1,0:1 (45 °)	1:0,75 (53 °)	1:1,25 (38 °)
		1:1 (45 °)
		1:0,75 (53 °)

Продолжение таблицы 11

Песчаная залежь	Торфяная залежь	
	Над водой	Под водой
1,0:0,75 (53 °)	1:0,5 (63 °)	1:1,25 (38 °)
		1:1 (45 °)
		1:0,75 (53 °)

Таблица 12 – Механические параметры модели откоса *M-K* [156]

Показатель	Песок	Торф
Плотность, кг/м ³	1700	910
Коэффициент Пуассона	0,30	0,35
Угол внутреннего трения, °	25	20
Сцепление, кПа	15	25

Давление *NGP* задавалось в диапазоне, соответствующем эксплуатационным режимам, а положение нагрузки варьировалось в пределах $B=1,0 \dots 2,5$ м от бровки.

Результаты расчётов устойчивости откоса представлены в таблицах 13 и 14 и на рисунках 15 и 16.

Таблица 13 – Коэффициент запаса устойчивости (*FoS*) (песок) [156]

Угол откоса, °	38	45	53
<i>FoS</i>	1,940	1,735	1,576

Таблица 14 – Коэффициент запаса устойчивости (*FoS*) (торф) [156]

Угол откоса, °		<i>FoS</i>
Над водой	Под водой	
45	38	2,002
	45	1,990
53	38	2,032
	45	2,002
	53	1,927
63	38	2,005
	45	1,928
	53	1,839

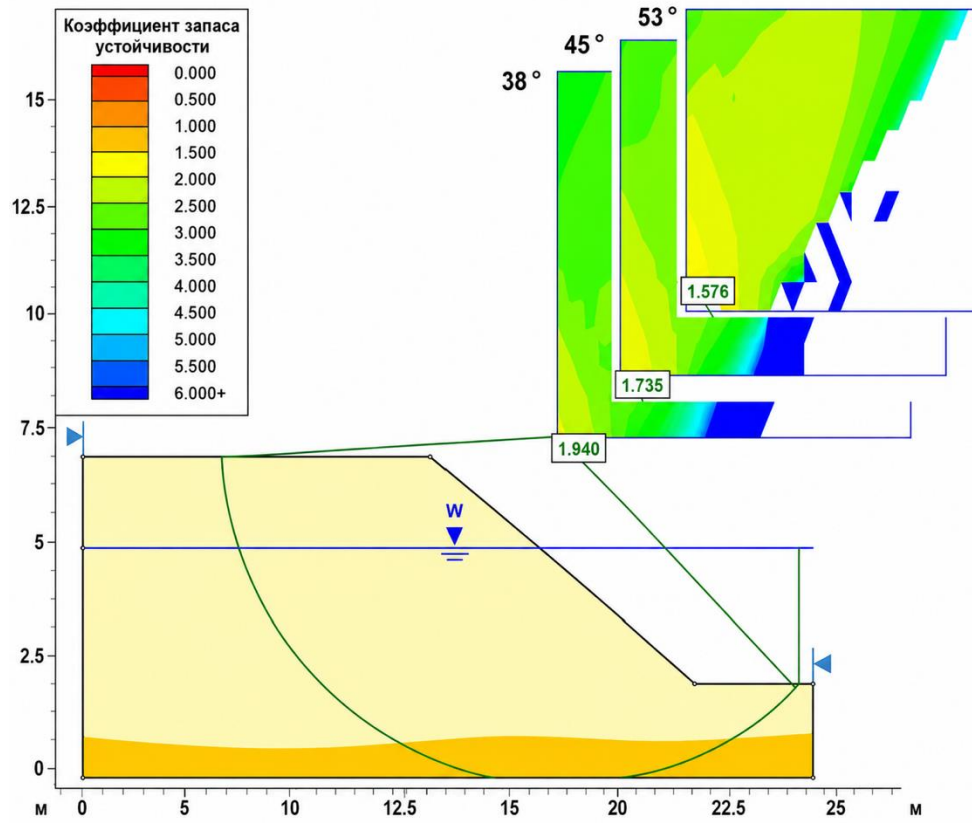


Рисунок 15 – Устойчивость откоса песчаного карьера (составлено автором)

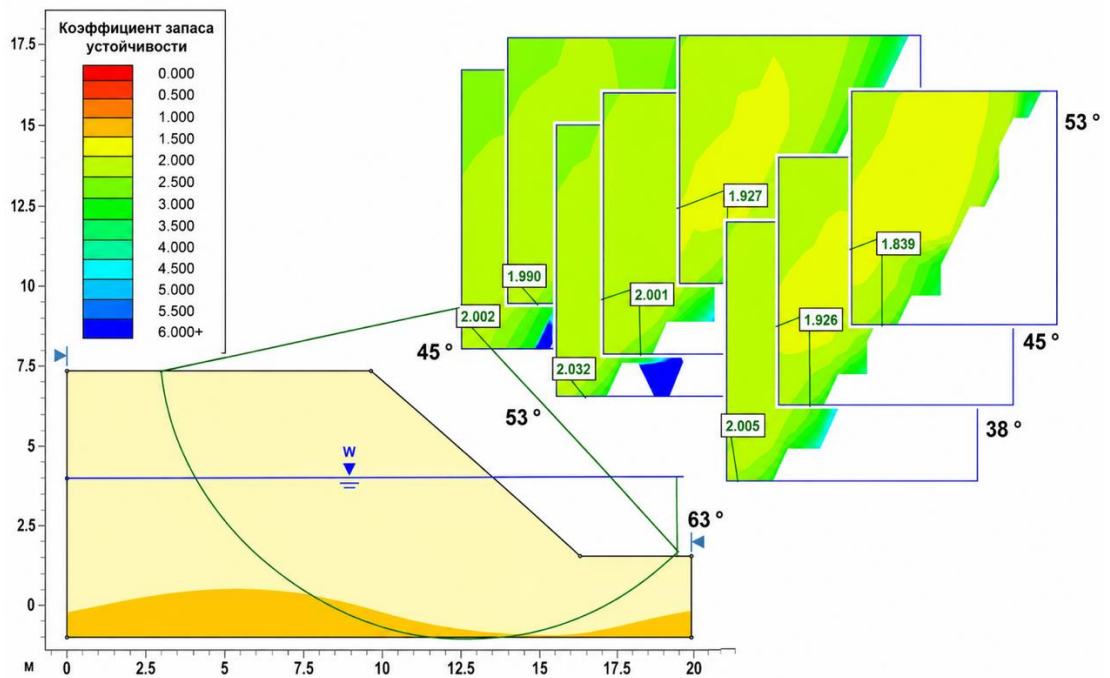


Рисунок 16 – Устойчивость откоса торфяного карьера (составлено автором)

Полученные результаты отражают значения коэффициента запаса устойчивости FoS для откоса в нормальных условиях. Уступ характеризуется устойчивым состоянием, что подтверждается рассчитанными значениями FoS и их интерпретацией в соответствии с классификацией Боулса (таблица 15).

Таблица 15 – Практическая интерпретация значений коэффициента запаса устойчивости по классификации Боулса [110]

Коэффициент запаса устойчивости (FoS)	Характеристика состояния откоса
$FoS > 1,500$	Устойчивое
$1,000 < Fos < 1,500$	Критическое (предельное)
$FoS < 1,000$	Неустойчивое

Действие на откос номинального удельного давления на грунт NGP (давления ходовой части экскаватора), обусловленного действием массы экскаватора, распределённой по площади контакта гусеничного движителя с основанием, наглядно демонстрирует прямое снижение значений коэффициента запаса устойчивости FoS . Наряду с величиной NGP , существенное влияние оказывает расстояние от бровки откоса до места установки экскаватора (ширина бермы), определяющее условия нагружения призмы возможного смещения. В практике открытых горных работ величина бермы, как правило, принимается в пределах 0,5–1,0 м исходя из требований безопасности при работе техники на уступах; при этом в зависимости от фактической устойчивости откоса указанное значение может быть увеличено (таблицы 16, 17).

Таблица 16 – Значения коэффициента запаса устойчивости (FoS) откоса песчаного карьера с учётом воздействия NGP [156]

Угол откоса, °		38	45	53
FoS	NGP, кПа	Берма 1,0 м ÷ 2,5 м		
	16,1	1,676 ÷ 1,770	1,505 ÷ 1,587	1,319 ÷ 1,399
	19,5	1,633 ÷ 1,739	1,467 ÷ 1,562	1,286 ÷ 1,373
	22,3	1,600 ÷ 1,714	1,438 ÷ 1,535	1,259 ÷ 1,352
	27,0	1,548 ÷ 1,674	1,390 ÷ 1,506	1,215 ÷ 1,315
	35,0	1,471 ÷ 1,603	1,326 ÷ 1,442	1,153 ÷ 1,255

Таблица 17 – Значения коэффициента запаса устойчивости (FoS) откоса торфяного карьера с учётом воздействия NGP [156]

Угол откоса, °		FoS					
Над водой	Под водой	NGP	14,1	17,8	21,5	26,8	35,8
45	38	Берма 1,0 ÷ 2,5 м	1,57-1,62	1,50-1,55	1,43 - 1,49	1,33 - 1,40	1,21 - 1,29
	45		1,56 - 1,63	1,47 - 1,55	1,39 - 1,48	1,30 - 1,39	1,18 - 1,28
53	38		1,53 - 1,64	1,45 - 1,56	1,37 - 1,49	1,28 - 1,40	1,15 - 1,27
	45		1,49 - 1,60	1,40 - 1,52	1,33 - 1,45	1,24 - 1,36	1,12 - 1,24
	53		1,44 - 1,57	1,36 - 1,49	1,29 - 1,42	1,20 - 1,34	1,09 - 1,22
63	38		1,47 - 1,58	1,39 - 1,50	1,31 - 1,43	1,22 - 1,34	1,10 - 1,22
	45		1,42 - 1,54	1,33 - 1,46	1,26 - 1,39	1,18 - 1,31	1,07 - 1,19
	53		1,31 - 1,49	1,28 - 1,41	1,21 - 1,35	1,13 - 1,27	1,02 - 1,15

В целом полученные результаты показывают закономерное снижение FoS при увеличении угла откоса и росте внешней нагрузки NGP , а также рост FoS при переносе нагрузки от бровки вглубь уступа (увеличение B). Для песчаного откоса без нагрузки (см. таблицу 13) увеличение угла α с 38° до 53° приводит к уменьшению FoS с 1,94 до 1,58, что соответствует ухудшению устойчивости. Для торфяного откоса (см. таблицу 14) устойчивость определяется сочетанием углов надводной и подводной частей, причём наиболее неблагоприятная комбинация в представленном диапазоне соответствует $63^\circ / 53^\circ$ с $FoS = 1,84$. При наличии нагрузки NGP (таблицы 16, 17) значения FoS снижаются для всех сценариев, что отражает увеличение «движущей» потребности массива, однако перенос нагрузки к $B = 2,5$ м, даёт устойчивый рост FoS по сравнению с положением у бровки $B = 1,0$ м, подтверждая необходимость рационального позиционирования экскаватора на уступе.

Полученное по методу Спенсера значение $FoS > 1$ подтверждает устойчивость массива уступа относительно глобального сдвига по критической поверхности скольжения при принятых нагрузках. Однако это условие не является достаточным для безопасной работы гусеничной машины на уступе: экскаватор может потерять устойчивость как жёсткое тело (опрокидывание/скольжение), либо утратить работоспособность вследствие локальной деформации основания (осадка/перекос гусениц) даже при отсутствии глобального разрушения откоса.

Анализ по методу Спенсера, дающий $FoS > 1$, показывает, что масса уступа устойчива относительно глобального сдвига по рассмотренной поверхности скольжения при принятых нагрузках. Однако устойчивость уступа не гарантирует автоматически устойчивость машины, поскольку машина может потерять устойчивость как жёсткое тело за счёт опрокидывания или скольжения по поверхности уступа, либо утратить устойчивость вследствие локальной деформации основания (осадки/перекоса) даже при отсутствии глобального разрушения откоса [79, 135].

Соответственно, полное обоснование устойчивости для карьерных уступов при работе гусеничной техники должно включать: проверку устойчивости уступа по методу Спенсера (LEM) и проверки устойчивости машины по опрокидыванию и скольжению, расширенные с учётом деформируемости основания при необходимости [79, 135, 204].

Для иллюстрации методики используются паспортные данные и габаритная схема экскаватора (SANY SY135C) из Приложения А.

Эксплуатационная масса машины $m=13500$ кг. Сила веса (27):

$$\begin{aligned} G &= mg, \\ G &= 13500 \cdot 9,81 = 132435 \text{ Н} = 132,4 \text{ кН}. \end{aligned} \quad (27)$$

Опорная длина гусеницы $L=2,93$ м, ширина гусеницы (стандарт) $b=0,50$ м, колея $G_{\text{дп}}=1,99$ м. Опорная площадь двух гусениц (28):

$$F = 2bL, \quad (28)$$

Для стандартных башмаков $b=0,50$ м:

$$F = 2 \cdot 0,50 \cdot 2,93 = 2,93 \text{ м}^2, \quad P_0 = \frac{G}{F} = \frac{132435}{2,93} = 45,2 \text{ кПа}.$$

Для расчётного варианта «торф» часто используют уменьшенное давление на грунт (например, паспортное $P_0=18$ кПа); тогда требуемая эквивалентная ширина гусеницы определяется из $P_0=G/F$ (29):

$$b = \frac{G}{2LP_0}, \quad (29)$$

$$b = \frac{132435}{2 \cdot 2,93 \cdot 18000} = 1,256 \text{ м.}$$

Ширина опорного контура (аппроксимация прямоугольником) (30):

$$\begin{aligned} B_{op} &\approx G_{дп} + b, \\ a_{\perp} &= \frac{B_{op}}{2}, \\ a_{\parallel} &= \frac{L}{2}. \end{aligned} \quad (30)$$

Для песка (стандарт $b=0,50$ м):

$$\begin{aligned} B_{op} &= 2,49 \text{ м,} \\ a_{\perp} &= 1,245 \text{ м,} \\ a_{\parallel} &= 1,465 \text{ м.} \end{aligned}$$

Для торфа ($P_0=18$ кПа):

$$\begin{aligned} B_{op} &= 3,246 \text{ м,} \\ a_{\perp} &= 1,623 \text{ м,} \\ a_{\parallel} &= 1,465 \text{ м.} \end{aligned}$$

Момент инерции опорной площади относительно оси опрокидывания (прямоугольник LB_{op}) (31):

$$J_{\parallel} = L^3 B_{op} / 3, J_{\perp} = L^3 B_{op} / 3, \quad (31)$$

Песок:

$$J_{\perp} = 15,08 \text{ м}^4, J_{\parallel} = 20,88 \text{ м}^4,$$

Торф (при $P_0=18$ кПа):

$$J_{\perp} = 33,40 \text{ м}^4, J_{\parallel} = 27,22 \text{ м}^4.$$

Устойчивость по опрокидыванию

Песок: $\rho_{bulk}=1800$ кг/м³, $\varphi=0,9$. Тогда:

$$m_{гр} = 1800 \cdot 1,0 \cdot 0,9 = 1620 \text{ кг, } Q = 1620 \cdot 9,81 = 15892 \text{ Н.}$$

Пусть ось опрокидывания является прямой в плоскости основания, соответствующей ребру (или направлению), вокруг которого машина может вращаться. Для любой внешней силы F_j , действующей на систему, момент относительно выбранной оси определяется как (32):

$$M_j = F_j a_j, \quad (32)$$

где a_j – перпендикулярное плечо от оси опрокидывания до линии действия силы F_j . Тогда суммарные моменты записываются как (33):

$$M_{\text{оп}} = \sum_{j \in \Omega_{\text{оп}}} F_j a_j, \quad M_{\text{ст}} = \sum_{j \in \Omega_{\text{ст}}} F_j a_j. \quad (33)$$

где $\Omega_{\text{оп}}$ – набор сил, создающих опрокидывающее действие; $\Omega_{\text{ст}}$ – набор сил, создающих удерживающее действие.

Плечо опрокидывающей силы принимается как сумма максимального радиуса копания и расстояния от оси опрокидывания до центра опоры (для бокового направления):

$$a_Q \approx e + a_{\perp} = 8,27 + 1,245 = 9,515 \text{ м.}$$

В первом приближении определяющий удерживающий момент обычно формируется весом машины G , тогда как основной опрокидывающий момент создаётся нагрузкой Q (равнодействующая от полезной нагрузки/рабочего оборудования). В этом случае (34):

$$M_{\text{ст}} = G a_G, \quad M_{\text{оп}} = Q a_Q. \quad (34)$$

где G – вес машины (системы), Н; Q – результирующая внешняя сила, вызывающая опрокидывание, Н; a_G, a_Q – соответствующие плечи, м.

$$M_{\text{оп}} = Q a_Q = 15892 \cdot 9,515 = 1,512 \cdot 10^5 \text{ Н м.} \quad (35)$$

$$M_{\text{ст}} = G a_G = 132435 \cdot 1,245 = 1,649 \cdot 10^5 \text{ Н м.} \quad (36)$$

Подстановка выражений (35)–(36) в (32) даёт компактную рабочую форму моментного критерия (37).

$$K = \frac{Ga_G}{Qa_Q}. \quad (37)$$

$$K = \frac{1,649 \cdot 10^5}{1,512 \cdot 10^5} = 1,09.$$

Получено $K > 1$, то есть равновесие формально устойчиво, однако запас малый; это означает чувствительность к динамическим воздействиям, смещению центра тяжести при повороте платформы/переносе груза, осадке и перекосу гусениц, которые уменьшают a_G и увеличивают эффективное a_Q . Следовательно, требуется переход к оценке деформируемого основания и смещения центра давления (37), а также к критерию критической высоты.

Торф (при $P_0 = 18$ кПа): примем $\rho_{\text{bulk}} = 800$ кг/м³, $\varphi = 0,9$.

Тогда:

$$m_{\text{гр}} = 800 \cdot 1,0 \cdot 0,9 = 720 \text{ кг}, \quad Q = 720 \cdot 9,81 = 7063 \text{ Н},$$

$$a_Q \approx e + a_{\perp} = 8,27 + 1,623 = 9,893 \text{ м},$$

$$M_{\text{оп}} = 7063 \cdot 9,893 = 6,99 \cdot 10^4 \text{ Н м}, \quad M_{\text{ст}} = 132435 \cdot 1,623 = 2,150 \cdot 10^5 \text{ Н м}.$$

$$K = \frac{2,150 \cdot 10^5}{6,99 \cdot 10^4} = 3,08.$$

Увеличение опорной площади (снижение P_0) резко повышает моментный запас устойчивости, что методически подтверждает необходимость “болотной” комплектации при работе на торфяных залежах. Для деформируемых оснований важна оценка “насколько близко” центр давления подошёл к кромке опоры. Запас устойчивости в резервном виде (38):

$$\rho = 1 - \frac{x}{a}. \quad (38)$$

Смещение центра давления x статическом приближении связано с опрокидывающим моментом (39):

$$x = M_{\text{оп}} / G. \quad (39)$$

Песок:

$$x = \frac{1,512 \cdot 10^5}{132435} = 1,142 \text{ м,}$$

$$a = a_{\perp} = 1,245 \text{ м,}$$

$$\rho = 1 - \frac{1,142}{1,245} = 0,083.$$

Торф:

$$x = \frac{6,99 \cdot 10^4}{132435} = 0,528 \text{ м,}$$

$$a = a_{\perp} = 1,623 \text{ м,}$$

$$\rho = 1 - \frac{0,528}{1,623} = 0,675.$$

Для песка получено крайне малое значение ρ , что означает приближение центра давления к кромке опоры и высокую чувствительность к дифференциальной осадке гусениц; для торфа при низком P_0 запас существенно выше.

Для торфа и рыхлых/водонасыщенных песков устойчивость дополнительно определяется деформативностью основания. Критическая высота центра тяжести (40):

$$Z_{\text{кр}} = \frac{k J_{\text{осн}}}{G} = \frac{k J_{\text{осн}}}{P_0 F}. \quad (40)$$

где $Z_{\text{кр}}$ – критическая высота центра тяжести, м; k – коэффициент упругости (эластичности) грунта, Н/м; $J_{\text{осн}}$ – момент инерции опорной площади основания относительно оси опрокидывания, м⁴; G – вес машины, Н; P_0 – среднее удельное давление на основание, Па; F – опорная площадь основания, м².

Условие устойчивости (41):

$$Z_0 < Z_{\text{кр}}. \quad (41)$$

Здесь k целесообразно трактовать как коэффициент постели (модуль реакции основания) [122, 140]: $p=ks$, т.е. k имеет размерность Н/м³ (или Па/м). Тогда k определяется по экспериментальным данным осадки ходовой части (42):

$$k = P_0 / s, \quad (42)$$

где s – средняя осадка (по испытаниям; значения s приводятся на соответствующих графиках осадки).

Далее последовательно приводится к виду “с подстановкой паспортных констант”.

Песок: $J_{\min}=J_{\perp}=15,08 \text{ м}^4$

$$Z_{\text{кр}} = \frac{k \cdot 15,08}{132435},$$

С подстановкой $k=P_0/s$ и $P_0=45,2 \text{ кПа}= 45200 \text{ Па}$:

$$Z_{\text{кр}} = \frac{(45200/s) \cdot 15,08}{132435}.$$

Торф: $J_{\min}=J_{\parallel}=27,22 \text{ м}^4$

$$Z_{\text{кр}} = \frac{k \cdot 27,22}{132435},$$

С подстановкой $k=P_0/s$ и $P_0=18 \text{ кПа}= 18000 \text{ Па}$:

$$Z_{\text{кр}} = \frac{(18000/s) \cdot 27,22}{132435}.$$

Необходимый запас устойчивости на деформируемом основании оценивается коэффициентом (43):

$$n = \frac{Z_{\text{кр}} - Z_0}{Z_0}, \quad (43)$$

где n – коэффициент запаса устойчивости (безразмерный); $Z_{\text{кр}}$ – критическая высота центра тяжести, м; Z_0 – фактическая высота центра тяжести, м.

Подстановка (40) в (43) даёт расчётную форму (44):

$$n = \frac{\left(\frac{kJ_{\min}}{G}\right) - Z_0}{Z_0} = \frac{kJ_{\min}}{GZ_0} - 1. \quad (44)$$

Далее для песка и торфа подставляются J_{\min} , G , а значения k и Z_0 берутся по данным исследования.

Для песчаных оснований коэффициент n (44) также может использоваться как инженерный показатель запаса, если оценка устойчивости выполняется в рамках деформируемого основания по (40), (43) при представлении жёсткости основания параметром k . Однако допустимое минимальное значение n для песка должно устанавливаться с учётом состояния песчаного массива (плотность и водонасыщенность) и режимов работы [106, 204].

2.4 Анализ кинематики движения ковша экскаватора при разгрузке

Движение рабочего оборудования гидравлического экскаватора при добыче нерудных материалов (песок, торф) следует рассматривать не только как описание кинематики, но и как основу для формирования метода управления, обеспечивающего производительность, геометрическую точность выемки и эксплуатационную безопасность [12]. В карьерных условиях требуемое движение задаётся в пространственных терминах — где резать, где поднимать и куда разгружать, — тогда как исполнительное воздействие реализуется гидроприводами [37, 208]. Поэтому анализ движения целесообразно строить как связную теоретическую цепочку, объединяющую переменные приводов, суставные координаты рабочего оборудования и траекторию выбранной точки на ковше или рабочем оборудовании, что особенно важно для операций погрузки/разгрузки и формирования устойчивых рабочих циклов [118, 195, 196].

Первый уровень задачи управления движением соответствует управлению рабочим оборудованием: гидроцилиндрами стрелы, рукояти и ковша (рисунок 17), а также приводом поворота поворотной платформы [37, 38].

В теоретическом описании рабочее оборудование экскаватора представляют в виде вектора обобщённых координат (45) [12]:

$$q = \left[\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4 \right]^T, \quad (45)$$

где φ_1 — угол поворота вокруг вертикальной оси, а φ_2 , φ_3 , φ_4 — угловые координаты стрелы, рукояти и ковша соответственно.

При этом в гидравлических экскаваторах управляющие воздействия прикладываются, как правило, не непосредственно к углам, а к переменным приводам.

Поэтому вводится кинематическое соответствие между переменными приводами s и координатами шарниров q (46):

$$q = f(s) \text{ или } s = f^{-1}(q), \quad (46)$$

где отображение $f(\cdot)$ получают из геометрических соотношений системы. Это отображение образует необходимый мост «гидроприводы \leftrightarrow кинематические координаты», позволяя перейти от уровня гидроприводного воздействия к кинематическому уровню управления, удобному для аналитического и алгоритмического рассмотрения [193, 201].

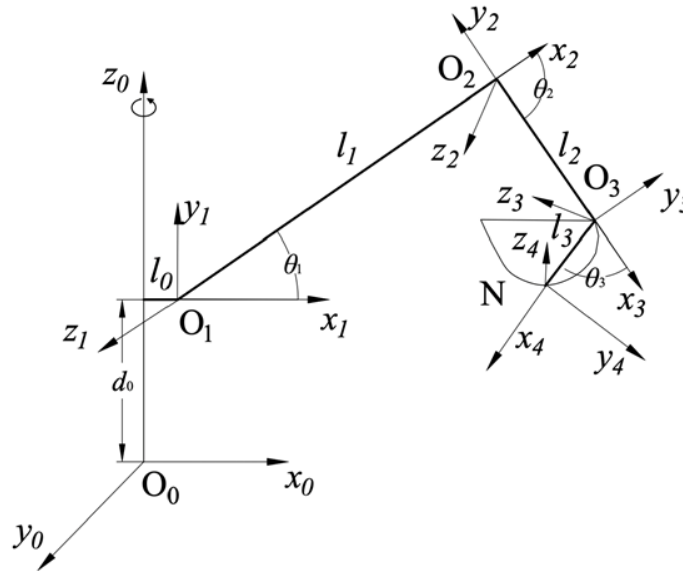


Рисунок 17 – Кинематическая схема движения рабочего органа гидравлического экскаватора по методу Денавита–Хартенберга (составлено автором)

Цель управления на данном уровне формулируется как слежение за заданным движением рабочего оборудования (47):

$$q(t) \rightarrow q^*(t), \quad (47)$$

где $q^*(t)$ – опорная траектория, сформированная в соответствии с требуемым экскавационным циклом (выемка подъём, поворот, разгрузка, обратный ход). Вводя

ошибку слежения $e_q = q^* - q$, обобщённый стабилизирующий закон обратной связи можно записать в дифференциальной форме (48):

$$\dot{q} = \dot{q}^* + K_q e_q, \quad (48)$$

где K_q – положительно определённая матрица усиления. Преобразование команды из шарнирного пространства \dot{q} в команды приводам получают дифференцированием (49):

$$\dot{q} = \frac{\partial f}{\partial s} \dot{s}, \quad \dot{s} = \left(\frac{\partial f}{\partial s} \right)^{-1} \dot{q}. \quad (49)$$

В таблице 18 показаны параметры Денавита-Хартенберга для звеньев гидроманипулятора.

Таблица 18 – Параметры Денавита-Хартенберга звеньев гидроманипулятора (составлено автором)

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

Соотношения (51)–(57) определяют теоретическую сущность управления рабочим оборудованием гидравлического экскаватора: обратная связь по кинематическим координатам в сочетании с кинематическим преобразованием к уровню воздействий гидропривода. Кинематический слой управления остаётся необходимой основой для формирования законов движения и последующих задач автоматизации [195].

Второй уровень задачи управления движением соответствует управлению выбранной точкой на ковше. При погрузке/разгрузке технологическая цель задаётся в пространстве: ковш должен войти в забой по требуемой траектории резания, а затем переместиться в область разгрузки над кузовом при соблюдении условий безопасности. Если задавать только траектории шарниров, точка на ковше будет

перемещаться, однако не обязательно по требуемой пространственной траектории (рисунок 18). Поэтому на рабочем оборудовании выбирают контрольную точку N .

Тогда целевая постановка в пространстве задач принимает вид (50):

$$N_P(t) \rightarrow N_P^*(t). \quad (50)$$

где $N_P(t)$ – положение точки N_P в выбранной системе координат уступа/карьера, а $N_P^*(t)$.

Чтобы управление точкой было реализуемо, необходима модель прямой кинематики, связывающая координаты шарниров с положением точки.

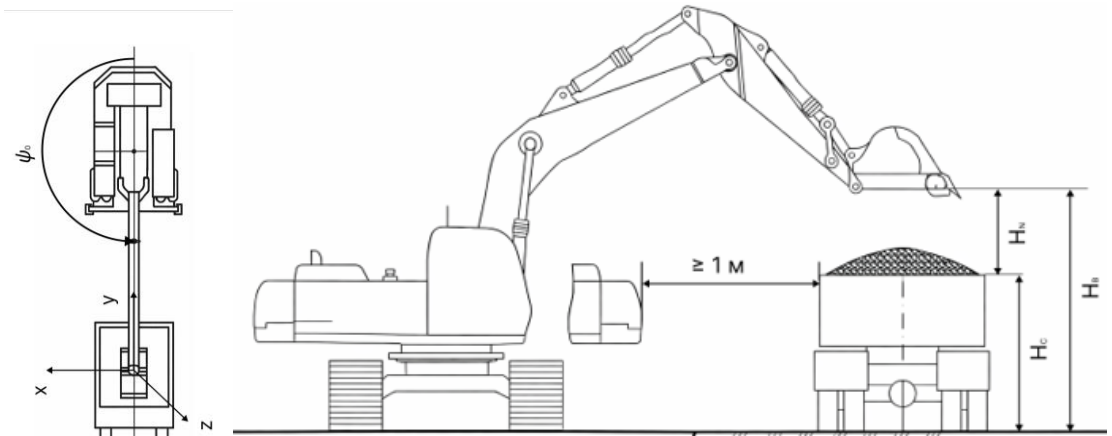


Рисунок 18 – Схема выгрузки сырья (составлено автором)

В рамках кинематики твёрдого тела координаты точки N постоянны в системе координат, жёстко связанной с ковшом, и обозначаются $N_P^{(T)}$. Положение этой же точки в базовой/глобальной системе координат вычисляют по однородному преобразованию (51):

$$N_P(q) = T_0^T(q) \begin{bmatrix} N_P^{(T)} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (51)$$

Преобразование $T_0^T(q)$ строится системно как произведение преобразований звеньев в формализме Денавита–Хартенберга (D–H) (52):

$$T_0^T(q) = \prod_i T_{i-1}^i(a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i), \quad (52)$$

где $(a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i)$ – параметры D–H, определяющие кинематическую цепь от базы экскаватора до системы координат ковша/инструмента. Подход D–H обеспечивает воспроизводимую методику получения прямой кинематики и широко применяется

для последовательных кинематических систем; для экскаваторов он является корректной абстракцией механизма «стрела–рукоять–ковш» при анализе движения и синтезе управления [118, 203]. Эквивалентное представление может быть записано и в векторной форме как суммирование повернутых векторов звеньев; это часто применяется в исследованиях кинематики экскаваторов [143].

Для отслеживания координат нижней части ковша экскаватора (N), движущегося снизу вверх по откосу с постоянным углом позиционирования φ_4 , проводится преобразование $(i-1)$ -й системы координат в i -ю систему координат по матрице однородного преобразования для каждого i -го звена (53):

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (53)$$

где: $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$, $c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$, $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$, $s_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$, $c_2 = \cos \theta_2$, $s_1 = \sin \theta_1$, $s_2 = \sin \theta_2$

Матрица однородного преобразования T_i позволяет связать однородные координаты низа ковша экскаватора K_i с однородными координатами этой точки относительно $(i-1)$ -й системы координат, связанных с $(i-1)$ -м звеном гидроманипулятора (54):

$$K_0 = T_i^{i-1} K_i, \quad (54)$$

где $K_i = [x_i \ y_i \ z_i \ 1]^T$. K_i соотносит координаты нижнего ковша экскаватора 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 (55):

$$K_0 = T_4^0 K_4. \quad (55)$$

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

Матрицы координат точек O_1 , O_2 и O_3 для данного случая (56):

$$\begin{bmatrix} c_0 & 0 & s_0 & l_0 c_0 \\ s_0 & 0 & -c_0 & l_0 s_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (56)$$

Выражение координат нижней части ковша экскаватора относительно базовой системы координат K_0 после перемножения матриц (57):

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_{234} & -c_1 s_{234} & s_1 & c_1 (l_3 c_{234} + l_2 c_{23} + l_1 c_2 + a_0) \\ s_1 c_{234} & -s_1 s_{234} & -c_1 & s_1 (l_3 c_{234} + l_2 c_{23} + l_1 c_2 + a_0) \\ s_{234} & c_{234} & 0 & l_3 c_{234} + l_2 s_{23} + l_1 s_2 + d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (57)$$

В итоге, система уравнений координат нижней части ковша экскаватора $[X, Y, Z]^T$ в классической форме (58):

$$\begin{cases} x_N = \cos\theta_1 (l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos\theta_2 + a_0), \\ y_N = \sin\theta_1 (l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos\theta_2 + a_0), \\ z_N = l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos\theta_2 + d_0. \end{cases} \quad (58)$$

Полученные уравнения позволяют отслеживать координаты нижней части ковша экскаватора после выемки грунта к месту разгрузки (кузов самосвала). Система уравнений является основой для контроля положения ковша экскаватора и перепозиционирования относительно самосвала.

2.5 Обоснование необходимости использования LiDAR-сенсора на гидравлическом экскаваторе

Интеграция LiDAR-сенсора в гидравлический экскаватор обоснована его способностью обеспечивать высокоплотное трёхмерное восприятие рабочей среды в реальном времени, недостижимое при использовании исключительно кинематических или традиционных геодезических средств измерения [159]. LiDAR формирует облака точек рельефа и близлежащих объектов, что позволяет с высокой

точностью оценивать геометрию зон копания и разгрузки; аналогичные подходы реализованы в современных автономных системах управления экскаваторами, в которых локальные карты высот непосредственно вычисляются на основе лидарных измерений для решения задач управления процессом выемки [125, 130]. Установка LiDAR-сенсора на крыше кабины экскаватора (рисунок 19) обоснована тем, что данное положение обеспечивает преимущественно свободное от заслонений поле зрения в направлении зон копания и разгрузки, снижает влияние перекрытий со стороны стрелы, рукояти и ковша, а также формирует механически жёсткую и однозначно определённую систему отсчёта, жёстко связанную с поворотной платформой.

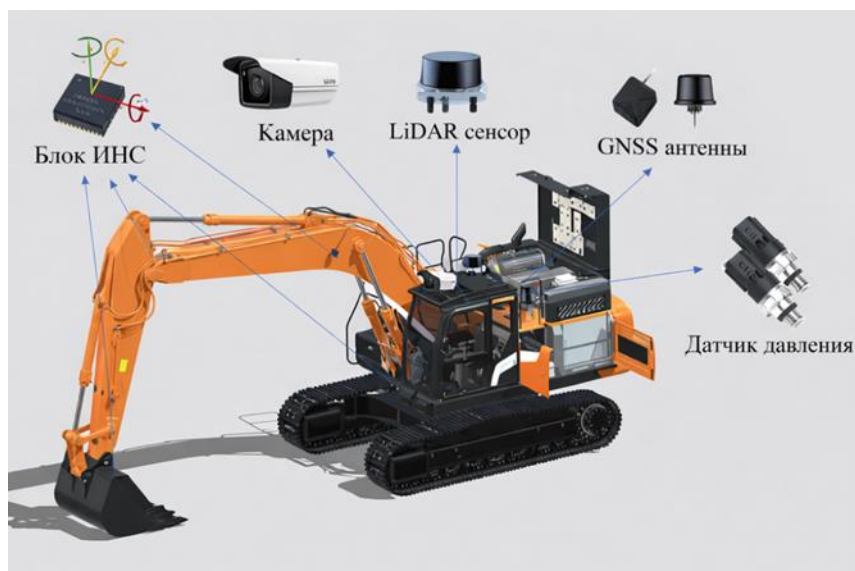


Рисунок 19 – Схема размещения LiDAR-сенсора на крыше кабины гидравлического экскаватора [117]

Это, в свою очередь, упрощает процедуру калибровки, повышает точность слияния данных с других датчиков и обеспечивает надёжное трёхмерное восприятие для решения задач обеспечения безопасности и реализации функций автоматизированного и автоматического управления [102, 164].

Помимо установки на крыше кабины, LiDAR-сенсоры могут размещаться на стреле или рукояти (рисунок 20), по бокам поворотной платформы, а также на

внешних опорных конструкциях (например, на кранах), причём каждое из указанных положений ориентировано на решение специфических прикладных задач.



Рисунок 20 – Схема размещения LiDAR-сенсора на стреле/рукояти гидравлического экскаватора [141]

Лидар, закреплённый на стреле, целесообразно использовать для высокоточной оценки объёма погруженного в кузов автосамосвала материала и детального сканирования зоны погрузки, поскольку его ориентация может быть согласована с положением рабочего оборудования [102].

Боковые и дополнительные верхние лидары применяются для обнаружения опасных объектов и обеспечения безопасного позиционирования машины, в том числе на откосах, формируя перекрывающиеся зоны обзора и улучшая покрытие пространства вокруг экскаватора [169].

Таким образом, использование LiDAR-сенсора на экскаваторе способствует существенному сокращению зон ограниченной видимости вокруг машины и обеспечивает высокоточную оценку и отслеживание траекторий движения поворотной платформы и рабочего оборудования, что повышает ситуационную осведомлённость оператора и точность реализации управляющих воздействий.

2.6 Анализ производительности комплекта экскаватор-самосвал

Значительное число работ посвящено вопросам обоснования производительности комплекта «экскаватор–самосвал» в карьерах, поскольку именно данный комплекс является базовым звеном циклической технологии погрузочно-транспортных работ и в существенной степени определяет технико-экономические показатели открытых горных работ [89]. При этом достигаемая выработка определяется не только номинальными параметрами машин, но и согласованностью времени обслуживания у экскаватора и времени обратного цикла самосвалов, а также организационными потерями, проявляющимися в виде очередей самосвалов у забоя и простоев экскаватора в ожидании подачи транспорта [99, 129]. Поэтому оценка производительности корректно формулируется как анализ *сопряжённого циклического процесса*, где экскаватор выступает в роли погрузочного «обслуживающего устройства», а парк самосвалов – в роли циркулирующих носителей, и ключевая задача сводится к увязке цикла ковша, цикла самосвала и численности парка в единую временную модель, калиброванную по карьерным условиям [112, 129].

Анализ производительности начинают с корректного задания *продолжительности цикла экскаватора*, так как именно этот параметр определяет темп обслуживания самосвалов и является базой для расчёта часовой выработки. Целесообразно использовать разложение времени цикла по элементарным операциям [112, 172]. Тогда время цикла экскаватора $t_{\text{ц}}$ (с) принимают равным (59) [97, 173]:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{к}} + t_{\text{под}} + t_{\text{пов.гр}} + t_{\text{в}} + t_{\text{пов.х}} + t_{\text{оп}}, \quad (59)$$

где $t_{\text{к}}$ – продолжительность операции копания, с; $t_{\text{под}}$ – продолжительность операции подъёма ковша с грунтом, с; $t_{\text{пов.гр}}$ – продолжительность поворота платформы и ковша с грунтом к месту выгрузки, с; $t_{\text{в}}$ – продолжительность выгрузки грунта, с; $t_{\text{пов.х}}$ – продолжительность поворота платформы с ковшом без грунта обратно в забой, с; $t_{\text{оп}}$ – продолжительность опускания ковша, с.

Такое представление принципиально важно для диссертационного анализа, поскольку позволяет хронометрически измерять каждую составляющую, выявлять факторы, увеличивающие цикл, и корректно связывать организационные потери с конкретными операциями [129]. На этой основе техническая производительность экскаватора определяется как выработка при «чистом» цикле без учёта простоев и непроизводительных потерь (60) [41, 54]:

$$Q_{\Pi}^{\text{тех}} = \frac{3600 V_b k_f k_s}{t_{\text{цэ}}}, \quad (60)$$

где V_b – номинальная вместимость ковша; k_f – коэффициент наполнения ковша; k_s – коэффициент приведения/разрыхления и согласования единиц измерения, принимаемый в соответствии с принятой в работе основой учёта объёма/массы [107].

Поскольку реальная эксплуатация включает кратковременные остановки, микропростои, организационные задержки и технологические нарушения ритма, эксплуатационную производительность экскаватора определяют введением коэффициента эксплуатационной эффективности (61) [57, 96]:

$$Q_{\Pi}^{\text{оп}} = Q_{\Pi}^{\text{тех}} \eta_e, \quad (61)$$

где $\eta_e \in (0,1)$ обобщённо учитывает влияние организации работ, квалификации машиниста, регламентных остановок, ожиданий и прочих факторов, не входящих в «идеальный» цикл [57].

Тем самым в расчётной схеме явно разделяются: производительность, обусловленная кинематикой и рабочими параметрами машины, и снижение выработки из-за непроизводительного времени.

Цикл самосвала является сопряжённым с циклом экскаватора через компонент обслуживания (погрузки), поэтому его удобно разлагать на обслуживание у экскаватора и оборот по транспортному плечу [42]. В среднем виде время цикла самосвала (62):

$$T_p = t_{\Pi} + t_{\text{дв(гр)}} + t_{\text{разг}} + t_{\text{дв(пор)}} + t_m, \quad (62)$$

где $t_{\text{п}}$ – время погрузки; $t_{\text{дв(гр)}}$ – время движения гружёного автосамосвала; $t_{\text{разг}}$ – время разгрузки; $t_{\text{дв(пор)}}$ – время движения порожняком; $t_{\text{м}}$ – время манёвров. В ряде источников дополнительно вводят время ожидания или обменных операций. Время погрузки определяется числом рабочих циклов экскаватора, требуемых для заполнения кузова (63) [39]:

$$t_{\text{п}} = n_{\text{р}} t_{\text{ц}}, \quad (63)$$

где $n_{\text{р}}$ – число ковшей при загрузке кузова, зависящее от эффективной вместимости ковша и заданной полезной вместимости самосвала [112].

В таком виде сопряжение «экскаватор–самосвал» выражено непосредственно через $t_{\text{ц}}$: увеличение времени цикла экскаватора автоматически увеличивает $t_{\text{п}}$, снижает пропускную способность погрузочного пункта и, при фиксированном парке, изменяет режим ожиданий.

Техническая производительность одного самосвала задаётся полезной загрузкой за рейс $V_{\text{тр}}$ и временем цикла $T_{\text{р}}$ (64) [94, 96]:

$$Q_{\text{т}}^{\text{тех}} = \frac{3600 V_{\text{тр}}}{T_{\text{р}}}, \quad (64)$$

где $V_{\text{тр}}$ должно задаваться согласованно с принятой системой измерения. В условиях карьера работа самосвалов существенно зависит от состояния и профиля дороги, сопротивлений движению, помех и диспетчерских задержек, поэтому эксплуатационную производительность записывают в виде [94]:

$$Q_{\text{т}}^{\text{оп}} = Q_{\text{т}}^{\text{тех}} \eta_{\text{т}}, \quad (65)$$

где $\eta_{\text{т}} \in (0,1)$ отражает суммарный эффект потерь времени и непроизводительных простоев в транспортной подсистеме [99, 100, 112]. Для парка из Z одинаковых самосвалов (66):

$$\begin{aligned} Q_{\text{т},Z}^{\text{тех}} &= Z Q_{\text{т}}^{\text{тех}}, \\ Q_{\text{т},Z}^{\text{оп}} &= Z Q_{\text{т}}^{\text{оп}}. \end{aligned} \quad (66)$$

В детерминированной постановке предварительного подбора парка производительность комплекса ограничивается «узким местом», поэтому в качестве

базовой оценки целесообразно использовать эксплуатационные (реалистичные) возможности подсистем (67):

$$Q_{\Sigma} \approx \min(Q_e^{\text{оп}}, Q_{t,Z}^{\text{оп}}). \quad (67)$$

Однако даже при формальном равенстве $Q_e^{\text{оп}}$ и $Q_{t,Z}^{\text{оп}}$ реальная работа комплекса может сопровождаться очередями и простоями из-за вариативности времени движения и времени обслуживания, а также из-за нестационарности условий функционирования. Поэтому детерминированные расчёты должны рассматриваться как исходная оценка и уточняться методами теории массового обслуживания и/или дискретно-событийного имитационного моделирования при анализе вариантов состава парка машин [94, 99].

Для увязки численности парка с синхронизацией работы вводят показатель согласования, сопоставляющий «потребность» парка самосвалов в обслуживании с пропускной способностью экскаватора [93]. Принимая эффективную интенсивность подхода самосвалов к экскаватору $\lambda = Z/T_p$ и интенсивность обслуживания $\mu = 1/t_{\text{п}}$, получают (68):

$$MF = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{Z t_{\text{п}}}{T_p} = \frac{Z n_p t_{\text{ц}}}{T_p}. \quad (68)$$

При $MF < 1$ парк недостаточен и экскаватор систематически простаивает в ожидании самосвалов; при $MF > 1$ парк избыточен и формируется очередь у экскаватора, увеличивая ожидание самосвалов и создавая предпосылки к стеснённости маневрирования и рискам в зоне погрузки; случай $MF \approx 1$ соответствует минимальным систематическим простоям [93]. Важно, что в данной формуле влияние параметров экскаватора выражено через $t_{\text{ц}}$: любые технологические или геометрические причины роста $t_{\text{ц}}$ приводят к росту MF при фиксированном Z и тем самым повышают вероятность очередей у забоя.

Таким образом, методика анализа производительности комплекса на уровне диссертационного исследования должна базироваться на хронометражных

наблюдениях (или данных бортового мониторинга) по элементам рабочего цикла экскаватора t_k , $t_{\text{под}}$, $t_{\text{пов.гр}}$, t_b , $t_{\text{пов.х}}$, $t_{\text{оп}}$ и по элементам цикла самосвала, оценке не только средних значений, но и разброса, расчёте технических и эксплуатационных производительностей, а также показателя согласования MF с последующей оценкой потерь ожидания/очередей при изменении численности парка и организационных правил работы. Итоговое инженерное решение следует принимать по критериям выработки и удельных затрат при обязательном соблюдении ограничений безопасности, габаритных условий и организации движения в зоне погрузки, поскольку именно они существенно влияют на время постановки, помехи и устойчивость циклического процесса [93].

2.7 Выводы по главе 2

На основе выполненного анализа позиционирования гидравлического экскаватора установлено, что рациональное позиционирование гидравлического экскаватора на уступе карьера определяется условиями его работы на грунтовом основании, взаимным расположением с автосамосвалом в зоне погрузки и наличием персонала в рабочей зоне машины. Показано, что положение экскаватора должно назначаться с учетом параметров уступа, в том числе среднего давления на грунт (NGP), угла откоса уступа и расстояния от бровки уступа, а также свойств грунта и устойчивости машины. Установлено также, что схема размещения пары «экскаватор–самосвал» влияет на безопасность погрузки, величину маневров и продолжительность рабочего цикла. Кроме того, при позиционировании экскаватора необходимо учитывать опасные зоны, связанные с движением рабочего оборудования и поворотной платформы, поскольку нахождение в них персонала повышает производственные риски.

При этом к основным факторам, определяющим функциональность и устойчивость одноковшового гидравлического экскаватора на карьерах нерудных

материалов, относятся номинальное давление на грунт, угол откоса уступа и ширина бермы.

При выполнении анализа методом предельного равновесия машин на уступе карьера установлено, что устойчивость системы «экскаватор– уступ» определяется совокупным влиянием угла откоса, номинального давления на грунт (*NGP*) и расстояния установки машины от бровки уступа (ширины бермы). Расчёты, выполненные по методу Спенсера, показали, что для песчаного откоса при отсутствии внешней нагрузки увеличение угла откоса с 38° до 53° сопровождается снижением коэффициента запаса устойчивости *FoS* с 1,940 до 1,576, что свидетельствует об ухудшении устойчивости системы. Для торфяного откоса наиболее неблагоприятные условия в исследованном диапазоне соответствуют сочетанию углов надводной и подводной частей $63^\circ/53^\circ$, при котором *FoS* составляет 1,839. Установлено также, что введение *NGP*, моделирующего воздействие ходовой части экскаватора, вызывает закономерное снижение *FoS* во всех рассмотренных сценариях, тогда как увеличение ширины бермы от 1,0 до 2,5 м обеспечивает рост коэффициента запаса устойчивости. Результаты расчётов подтвердили, что факторы *NGP*, угол откоса и ширина бермы являются определяющими параметрами, влияющими на устойчивость машины на уступе карьера, и должны рассматриваться в качестве основных переменных при дальнейшем анализе рационального позиционирования экскаватора.

В результате анализа функциональности рабочего процесса показано, что повышение эффективности требует не только обеспечения устойчивости, но и геометрической управляемости рабочего оборудования на этапе разгрузки. Формализация кинематики рабочего органа на основе параметризации Денавита–Хартенберга и векторного алгоритма обеспечила вычисление координат контрольной точки *N* низа ковша, что позволяет задавать требования к безопасному зазору над бортом кузова и снижать количество корректирующих движений.

На основе выполненного анализа установлено, что использование LiDAR-сенсора на гидравлическом экскаваторе является необходимым для получения точной

трёхмерной информации о рабочей среде в реальном времени. Показано, что применение LiDAR-сенсора позволяет сократить зоны ограниченной видимости, повысить точность контроля положения рабочего оборудования и обеспечить обнаружение объектов в рабочей зоне машины. Установлено также, что размещение сенсора на крыше кабины является рациональным с точки зрения обзора и устойчивости системы отсчёта. Полученные результаты подтверждают, что интеграция LiDAR-сенсора способствует повышению безопасности работы экскаватора и создает основу для реализации функций автоматизированного управления.

Представленные подходы к оценке продолжительности рабочего цикла, производительности экскаватора и производительности машинного комплекта показывают, что результативность должна количественно определяться через:

- декомпозицию рабочего цикла на элементарные операции;
- разделение технической и эксплуатационной производительности с учётом коэффициента использования и потерь;
- согласование времени обслуживания самосвала экскаватором со временем оборота самосвала, включая ожидания, обусловленные вариабельностью.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований

В соответствии с поставленной целью и задачами диссертационного исследования, разработана программа экспериментальных исследований:

1. Заготовка и доставка образцов песчаного и торфяного грунта из карьера для лабораторных исследований;
2. Определение прочностных характеристик несущего слоя песчаных и торфяных залежей;
3. Проведение анализа физико-механических характеристик исследуемого песка и торфа;
4. Проведение экспериментальных исследований по установлению влияния работы экскаватора на величину осадки грунта в условиях полевых испытаний на песчаных и торфяных карьерах;
5. Проведение экспериментальных исследований в рамках многофакторного эксперимента;
6. Проведение исследований и обоснования рационального позиционирования экскаватора на уступе с применением LiDAR-сенсора;
7. Проведение экспериментальных исследований по определению и сравнительному анализу продолжительности рабочего цикла экскаватора при традиционной эксплуатации и с использованием искусственных интеллектуальных систем управления.

На первом (подготовительном) этапе при подготовке к экспериментальным исследованиям в полевых условиях были выбраны базовые песчаные и торфяные месторождения.

Разработаны методики проведения экспериментальных исследований как в полевых, так и в лабораторных условиях. Проведены выезды на карьеры с песчаными

и торфяными залежами, где осуществлены заготовка и доставка образцов для лабораторных испытаний. Проведены эксперименты по определению продолжительности рабочего цикла экскаватора в реальных условиях.

На втором этапе проводилось планирование и проведение экспериментов в лабораторных условиях на стенде в порядке, определяемом наличием исходных данных для определения устойчивости гидравлического экскаватора на слабоустойчивых уступах карьеров [21].

На третьем этапе был подготовлен экспериментальный стенд с использованием LiDAR-сенсора и модели экскаватора для исследования рабочей зоны экскаватора.

3.2 Методика проведения экспериментальных исследований

3.2.1 Методика проведения исследований в полевых условиях

Исследования проводились на песчаном месторождении «Глобицы-западный», координаты $59^{\circ}46'43.80''N$; $29^{\circ}12'37.10''E$, Ленинградская область, Ломоносовский район (рисунок 21). Песчаная залежь сложена среднезернистыми песками. Общая площадь – 66,6 га, с запасами 1,5 млн м³.



Рисунок 21 – Песчаный карьер на месторождении «Глобицы-западный»
Ломоносовский район Ленинградской области (фото автора)

Исследования проводились на торфяном месторождении «Заозерское» (кад. №1021), координаты 59°42'08.31"N 29°07'17.77"E, Ленинградская область, Ломоносовский район (рисунок 22). Общая площадь 2980 га с запасами торфа 16,6 млн т, сложена верховой залежью *Sphagnum magellanicum* и *Fuscum* торфа средней степени разложения $R = 22\%$ [28].



Рисунок 22 – Месторождение Заозерское Ломоносовский район Ленинградской области (фото автора)

Наработка образцов сырья проводилась в соответствии с принятыми методиками путем механической экскавации его из торфяной залежи.

Для определения физико-механических свойств залежи необходимо провести испытания в полевых условиях верхнего слоя на сдвиг и сопротивление грунта проникновению, в ходе которых получены данные необходимые для оценки прочностных характеристик залежи [20].

Экспериментальные исследования в полевых условиях необходимо осуществлять по установленным пунктам и алгоритму.

1. Выбор и подготовка инструментария для успешного выполнения исследований в соответствии с поставленными задачами и целями экспериментальных исследований. К инструментам относятся выемочные (лопата, совок, нож, кольцо-пробоотборник) и измерительные (рулетка).

2. Подготовка площадок для проведения экспериментов. Определить и подготовить участки, на которых будут выполняться полевые работы. Образцы материала помещались в отдельные герметичные пакеты для последующих лабораторных исследований.

3. На расчищенных площадках провести испытания по определению предела прочности на сдвиг и прочности на статическое сжатие в трех разных местах участка. Результаты записать в протокол.

4. Произвести отбор образцов верхнего слоя залежи кольцом-пробоотборником. Повторить три раза. Образцы поместить в герметичные полиэтиленовые пакеты с зипером.

Проведена заготовка натуральных монолитов ненарушенного верхнего слоя торфяной залежи размером 0,4x0,5x0,5 м (рисунок 23). Выемка монолита образца верхнего слоя торфяной залежи производилась следующим образом. Очерчивался периметр монолита размерами 0,4x0,4 м, проводилась выемка грунта по периметру на ширину лопаты на глубину 0,4 м. Основание подрезается ножом.



Рисунок 23 – Образец ненарушенного материала из верхнего слоя торфяной залежи (фото автора)

Песок снимался лопатой с выделенного участка и засыпался в мешки по 50 л (рисунок 24); всего отбирали 5 мешков.



Рисунок 24 – Образец материала из верхнего слоя песчаной залежи (фото автора)

Образцы материалов были доставлены в Санкт-Петербургский горный университет для проведения лабораторных исследований.

Количественная оценка прочности слабых грунтов на сдвиг производится методом вращательного среза с помощью специального полевого прибора – сдвигомер-крыльчатка *СК-10* (рисунок 25) [8]. Этот метод заключается в том, что в грунт на требуемую глубину задавливаются короткие металлические лопасти, расположенные друг к другу под углом 90° . Затем эти лопасти проворачиваются. Усилие, требуемое для преодоления сопротивления грунта вращению лопасти, фиксируется динамометром. При вращении лопастей происходит срез грунта на вертикальной цилиндрической и двух горизонтальных плоских поверхностях, очерчиваемых горизонтальными торцами крыльчатки.

Сдвигомер-крыльчатка *СК-10* состоит из четырехлопастной крыльчатки, которая крепится через переходник с зубчатым зацеплением к наращиваемым штангам. Для измерения крутящего момента динамическая рукоятка свободно насажена на бронзовую втулку, которая прикреплена к упору. Втулка с упором крепится к штангам вилкой. Упругая пластина вставлена в пазы упора на цилиндрический штифт [30, 43].

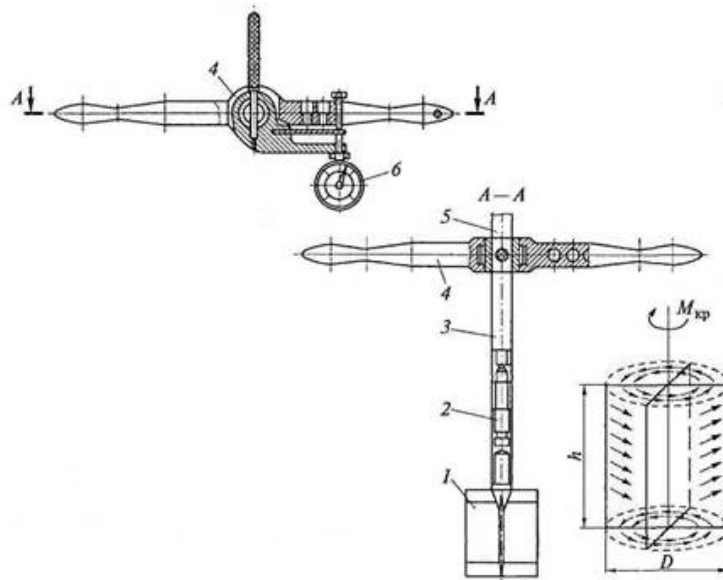


Рисунок 25 – Сдвигомер-крыльчатка СК-10: 1 – наконечник; 2 – компенсатор трения по штангам; 3, 5 – штанги; 4 – измерительная головка с рукоятью; 6 – индикатор часового типа [45]

Деформация пластины при повороте рукоятки с призмой фиксируется индикатором часового типа, который неподвижен по отношению к упору. Испытание заключается в измерении максимального крутящего момента, возникающего при срезе грунта во время вращения в нем крестообразной лопасти [43, 45].

В опытах использовалась крыльчатка диаметром d , равным 0,054 и высотой 0,10 м.

Постоянная крыльчатки (69):

$$K = \frac{\pi d^2}{2} \left(\frac{d}{a} + h \right), \quad (69)$$

где a – постоянный параметр, принимаемый равным 3 при сдвиге на поверхности грунта и 6 в его толщине; h – высота крыльчатки, $h=0,10$ м; d – диаметр крыльчатки, $d=0,054$ м.

$$K = \frac{3,14 \cdot 0,054^2}{2} \left(\frac{0,054}{3} + 0,1 \right) \cong 0,00054 \text{ м}^3.$$

Сопротивление грунта сдвигу (70) (Па):

$$\tau = \frac{M}{K} = \frac{\Delta l}{Kn'}. \quad (70)$$

где M – крутящий момент, Н/м; Δl – показания индикатора сдвигомера-крыльчатки; n – постоянная упругой пластины; K – постоянная крыльчатки, м³.

Сопротивление грунтов прониканию зондов зависит от многих переменных величин (пористости, степени увлажнения, гранулометрического состава, формы минеральных зерен и других факторов), поэтому результаты зондирования характеризуют грунт по совокупности признаков и дают его комплексную характеристику прочности. При статическом зондировании в грунт вдавливают с постоянной скоростью, не превышающей 1 м/мин, штангу диаметром 15 мм со стандартным коническим наконечником, имеющим угол при вершине 60° и площадь основания – 0,001 м². Через каждые 0,02 м погружения измеряют предельное сопротивление грунта вдавливанию и лобовое сопротивление конуса.

Измерения сопротивления грунта q (71) проникновению [43] (показатель конусности) были выполнены с помощью пенетromетра *Eijkelkamp 0601SA* (рисунок 26) с коническим наконечником с площадью основания 0,4 м², с углом конуса 60 °.



Рисунок 26 – Пенетрометр Eijkelkamp 0601SA [40]

Измерения проводились до глубины 1,0 м с шагом 0,1 м.

$$q = F / S'. \quad (71)$$

где F – сила, измеренная динамометром пенетromетра *Eijkelkamp 0601SA*; S – площадь боковой поверхности конуса.

Для определения плотности песка и торфа в залежи выполняется отбор проб с помощью цилиндрического пробоотборника (рисунок 27) (кольцо с заострёнными кромками и известным объёмом) [8].

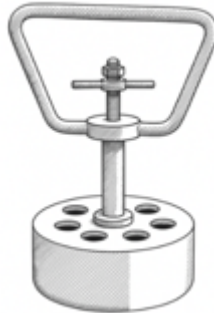


Рисунок 27 – Кольцо-пробоотборник (составлено автором)

Верхнюю зачищенную поверхность грунта выравнивают; на подготовленную площадку устанавливают режущий край кольца и вдавливают пробоотборник в грунт. Для торфа – кольцо вдавливают с лёгким вращением, чтобы избежать деформации волокнистой структуры. Для песка – кольцо вдавливают плавно, без вращения и ударов, чтобы не уплотнить грунт.

После вдавливания кольца грунт снаружи обрезают на глубину 5-10 мм ниже режущего края, формируя холмик диаметром на 1-2 мм больше наружного диаметра кольца. После полного заполнения кольца грунт в залежи подрезают на 8-10 мм ниже режущего края. Для подъема и перемещения пробоотборника используется плоская лопатка [8, 45].

Выступающий за края кольца грунт срезают косым движением ножа, затем поверхность выравнивают заподлицо с краями кольца. Для получения достоверных результатов рекомендуется проводить не менее пяти измерений для торфа и не менее трёх – для песка. Образец аккуратно выдавливают из кольца и помещают в мешок с зипером.

Методика эксперимента по определению продолжительности элементов рабочего цикла основывалась на прямом хронометраже операций, выполняемых гидравлическим экскаватором, с использованием секундомера. Измерения

проводились при двух углах поворота экскаватора – 90 ° и 180 °, в режимах с совмещением операций и без совмещения операций. В ходе эксперимента последовательно фиксировалась продолжительность отдельных элементов цикла, включая копание, поворот к месту разгрузки, разгрузку ковша и возврат в исходное положение, после чего определялась общая продолжительность рабочего цикла $t_{ц}$.

Для каждого исследуемого варианта выполнялись повторные замеры, по результатам которых полученные значения сопоставлялись и усреднялись.

3.2.2 Методика проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях

Образцы отобранных материалов взвешивают на лабораторных весах в естественном (влажном) состоянии. Плотность материала в залежи вычисляют по формуле (72) [8]:

$$\rho = m / V, \quad (72)$$

где m – масса образца, кг; V – объём кольца, м³.

Измерение влажности образцов сырья проводилось посредством анализатора влажности AND MF-50 (рисунок 28).



Рисунок 28 – Анализатор влажности AND MF-50 (фото автора)

Погрешность определения влажности – 0,05%. Микропроцессором анализатора производился контроль температуры, времени и массы исследуемого образца торфяного сырья.

Лабораторные исследования проводились с целью оценки осадки модели гидравлического экскаватора на модельном уступе, а также для анализа эффективности размещения LiDAR-сенсора на модели экскаватора. Эксперименты выполнялись в ёмкости со стенками из оргстекла размерами $1,0 \times 0,5 \times 0,5$ м с использованием натуральных грунтов. Для моделирования условий работы формировался уступ с различными углами откоса, а также рассматривались варианты без воды и при наличии воды у основания.

Нагрузка на поверхность уступа передавалась через физическую модель экскаватора [204] с коэффициентом подобия $K_{\text{Э}}=0,05$ (рисунок 30) и систему дополнительных грузов, что позволяло изменять нагрузку в широком диапазоне – от 80 Н до 700 Н. В ходе опытов фиксировались осадка поверхности, появление трещин, смещение грунта и изменение формы откоса.

Эксперименты в лабораторных условиях проводились в емкости размерами $1,0 \times 0,5 \times 0,5$ м с прозрачными стенками (рисунок 29) с использованием образцов натурального грунта (песок, торф).

Формировались уступы без воды и с водой (уровень воды снизу: 0,145 м и 0,08 м), а также при разных углах откоса (38° , 45°).

Нагрузка передаёт свое действие на площадку уступа, через опорную поверхность экскаватора.

Для моделирования вертикальной нагрузки от экскаватора на поверхность уступа устанавливали модель экскаватора на заданном расстоянии от бровки откоса. Сверху на модели последовательно размещались грузы, что обеспечивало варьирование нагрузки в диапазоне от 8 до 70 кг. Нагружение осуществлялось поэтапно, чтобы избежать мгновенного разрушения и обеспечить наблюдение за развитием деформаций в грунте.



Рисунок 29 – Схема моделирования с использованным натуральных материалов с коэффициентом подобия 1:1 (фото автора)

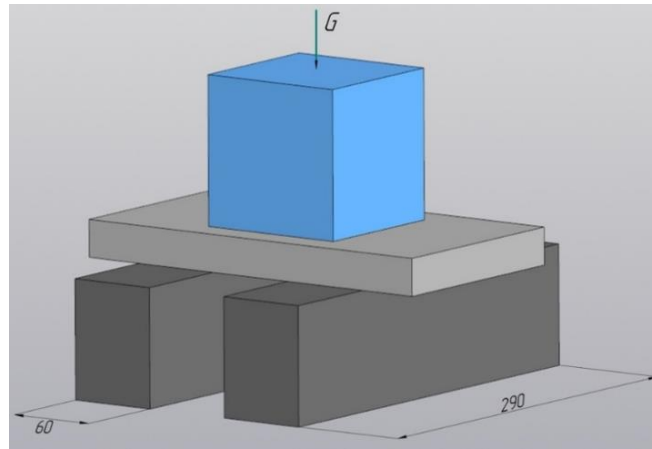


Рисунок 30 – Физическая модель экскаватора (составлено автором)

В процессе нагружения фиксировались визуальные изменения: просадка поверхности уступа, образование трещин, сползание материала и изменение геометрии откоса. Наблюдения документировались фотографиями, сделанными с фронтальной и верхней стороны бокса. Путём изменения типа грунта (песок или торф), геометрии откоса, влажности и величины приложенной нагрузки создавалась контролируемая модельная среда для исследования влияния различных факторов на поведение и устойчивость слабых откосов.

Проводились исследования по размещению LiDAR-сенсора A1M8 на модели экскаватора с коэффициентом подобия $K_3=0,04$. Сравнивались две схемы установки сенсора: в верхней части модели и по боковым сторонам.

3.3 Методика планирования многофакторного эксперимента

С помощью многофакторного эксперимента можно получить математическое описание процесса в окрестности точки факторного пространства с координатами X_1 (кН), X_2 ($^\circ$) и X_3 (м), где X_1 – соответствует номинальному давлению на грунт, X_2 – углу откоса уступа, а X_3 – расстоянию до бровки [45, 68]. В качестве исходных данных приняты данные из таблиц 16, 17.

Для песчаного основания:

$$x_{10} = 25,55; x_{20} = 45,50; x_{30} = 1,75.$$

Математическая модель в кодированных переменных представлена в виде уравнения регрессии (73):

$$y = \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 \tilde{x}_1 + \tilde{b}_2 \tilde{x}_2 + \tilde{b}_3 \tilde{x}_3. \quad (73)$$

где $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ – кодированные значения факторов; $\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3$ – коэффициенты регрессии.

Интервалы варьирования факторов составляют:

$$\Delta x_1 = \frac{35,0 - 16,1}{2} = 9,45 \text{ кН},$$

$$\Delta x_2 = \frac{53 - 38}{2} = 7,5^\circ,$$

$$\Delta x_3 = \frac{2,5 - 1,0}{2} = 0,75 \text{ м}.$$

Тогда натуральные значения факторов определяются как:

$$x_1 = x_{10} \pm \Delta x_1 = 25,55 \pm 9,45 \text{ кН},$$

$$x_2 = x_{20} \pm \Delta x_2 = 45,50 \pm 7,5^\circ,$$

$$x_3 = x_{30} \pm \Delta x_3 = 1,75 \pm 0,75 \text{ м}.$$

Верхние и нижние уровни факторов принимают значения:

$$x_{1Н} = 16,1 \text{ кН}, x_{1В} = 35,0 \text{ кН},$$

$$x_{2Н} = 38^\circ, x_{2В} = 53^\circ,$$

$$x_{3Н} = 1,0 \text{ м}, x_{3В} = 2,5 \text{ м}.$$

Кодирование факторов осуществляется по выражению (74):

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}. \quad (74)$$

Тогда для песчаного основания:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{1Н} &= \frac{16,1 - 25,55}{9,45} = -1, \quad \tilde{x}_{1В} = \frac{35,0 - 25,55}{9,45} = +1, \\ \tilde{x}_{2Н} &= \frac{38 - 45,50}{7,5} = -1, \quad \tilde{x}_{2В} = \frac{53 - 45,50}{7,5} = +1, \\ \tilde{x}_{3Н} &= \frac{1,0 - 1,75}{0,75} = -1, \quad \tilde{x}_{3В} = \frac{2,5 - 1,75}{0,75} = +1. \end{aligned}$$

Для торфяного основания:

$$x_{10} = 24,95; \quad x_{20} = 54,00; \quad x_{30} = 1,75.$$

Интервалы варьирования факторов:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \frac{35,8 - 14,1}{2} = 10,85 \text{ кН}, \\ \Delta x_2 &= \frac{63 - 45}{2} = 9^\circ, \\ \Delta x_3 &= \frac{2,5 - 1,0}{2} = 0,75 \text{ м}. \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{10} \pm \Delta x_1 = 24,95 \pm 10,85 \text{ кН}, \\ x_2 &= x_{20} \pm \Delta x_2 = 54,00 \pm 9^\circ, \\ x_3 &= x_{30} \pm \Delta x_3 = 1,75 \pm 0,75 \text{ м}. \end{aligned}$$

Верхние и нижние уровни факторов:

$$\begin{aligned} x_{1Н} &= 14,1 \text{ кН}, \quad x_{1В} = 35,8 \text{ кН}, \\ x_{2Н} &= 45^\circ, \quad x_{2В} = 63^\circ, \\ x_{3Н} &= 1,0 \text{ м}, \quad x_{3В} = 2,5 \text{ м}. \end{aligned}$$

Кодированные значения факторов:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{1Н} &= \frac{14,1 - 24,95}{10,85} = -1, \tilde{x}_{1В} = \frac{35,8 - 24,95}{10,85} = +1, \\ \tilde{x}_{2Н} &= \frac{45 - 54}{9} = -1, \tilde{x}_{2В} = \frac{63 - 54}{9} = +1, \\ \tilde{x}_{3Н} &= \frac{1,0 - 1,75}{0,75} = -1, \tilde{x}_{3В} = \frac{2,5 - 1,75}{0,75} = +1.\end{aligned}$$

Полная реплика содержит $N = 2^k = 8$ опытов. Для воспроизводимости процесса и уменьшения погрешности модели, каждый из опытов выполняется трижды (75) [69, 205]:

$$y_i = \frac{y_{j1} + y_{j2} + y_{j3}}{3}. \quad (75)$$

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 19.

Таблица 19 - Матрица планирования эксперимента (составлено автором)

Номер опыта	X ₁	X ₂	X ₃	Песчаное основание			Торфяное основание		
				X ₁ , кН	X ₂ , °	X ₃ , м	X ₁ , кН	X ₂ , °	X ₃ , м
1	-1	-1	-1	16,1	38	1,0	14,1	45	1,0
2	+1	-1	+1	35,0	38	2,5	35,8	45	1,0
3	-1	+1	+1	16,1	53	2,5	14,1	63	1,9
4	+1	+1	-1	35,0	53	1,0	35,8	63	1,0
5	-1	-1	+1	16,1	38	2,5	14,1	45	2,5
6	+1	-1	+1	35,0	38	2,5	35,8	45	2,5
7	-1	+1	+1	16,1	53	2,5	14,1	63	2,5
8	+1	+1	+1	35,0	53	2,5	35,8	63	2,5

3.4 Методика размещения LiDAR-сенсора на экскаваторе

Для проведения экспериментов приобретен LiDAR-сенсор A1M8 (Приложение Г). LiDAR A1M8 (Slamtec RPLIDAR A1M8) – это 2D лазерный сканер, который вращается на 360 ° и измеряет расстояния до 12 м вокруг себя, формируя плоское «кольцо» точек [17]. Используя лазерную триангуляцию, он посылает лазерные импульсы, принимает отражённый свет и выдаёт пары угол–расстояние, которые компьютер преобразует в 2D-карту или схему препятствий. Проводилась сравнительная оценка двух схем размещения LiDAR-сенсора на модели экскаватора (рисунок 31).

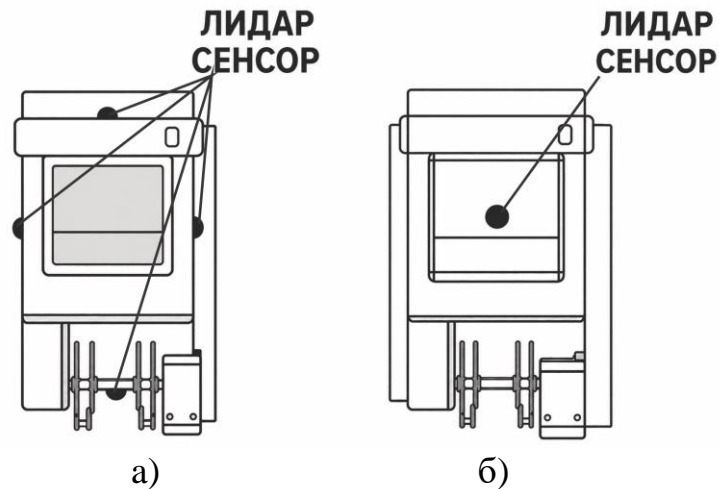


Рисунок 31 – Варианты размещения LiDAR-сенсора A1M8: а) в боковом положении; б) в верхнем положении (составлено автором)

По первой схеме сенсор устанавливался на верхней части модели экскаватора по второй – по боковым сторонам модели экскаватора с коэффициентом подобия $K_3 = 0,04$.

Для обеих конфигураций обеспечивались одинаковые условия испытаний, а сканирование пространства рабочей зоны выполнялось вокруг модели с целью оценки обзора рабочей зоны и способности обнаружения объектов, расположенных вблизи экскаватора [163, 164].

3.5 Методика обработки результатов экспериментов

Предварительная обработка экспериментальных данных, построение эмпирических распределений и проверка гипотезы о нормальности распределения выполнялись методами математической статистики с использованием современных программных средств. Расчёт и обработка полученных данных осуществлялись в программной среде Microsoft Excel и графическом редакторе OriginLab. Для трёхмерного моделирования и подготовки графических материалов применялись системы КОМПАС-3D и AutoCAD. Моделирование устойчивости машины на уступе карьера выполнялось в программном комплексе Slide2. Обработка результатов полного факторного эксперимента, построение уравнений регрессии и оценка значимости факторов осуществлялись в программе Design-Expert 13.

3.6 Выводы по главе 3

Программа и методика экспериментальных исследований разработаны в соответствии с целью и задачами, поставленными в диссертации. Задачи экспериментальных исследований решаются на основе разработанных методик, основывающихся на исследованиях по устойчивости экскаватора при выемке нерудных материалов и проведения полевых и лабораторных экспериментов.

Проведена заготовка монолита сырья ненарушенной структуры из торфа и песчаной массы для экспериментальных исследований в лабораторных условиях по определению осадки модели экскаватора в емкости размерами 1,0×0,5×0,5 м.

Разработаны методы определения коэффициента запаса устойчивости на основе многофакторных экспериментов, учитывающих воздействие ряда факторов (номинальное давление на грунт, угол откоса, ширина бермы) на устойчивость машин на уступе карьера.

Для проведения экспериментов были спроектированы и изготовлены лабораторные стенды для размещения LiDAR-сенсора, обеспечивающие реализацию зон сканирования при выемке и оценку наилучшего положения LiDAR на гидравлическом экскаваторе.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты определения прочностных свойств песчаной и торфяной залежи

В рамках проведения полевого эксперимента при помощи кольцевого пробоотборника были отобраны пробы и в камеральных условиях определены величины плотности и влажности верхнего слоя песчаной и торфяной залежи (таблицы 20, 21).

Таблица 20 – Плотность и влажность песчаной залежи (составлено автором)

Проба	Количество образцов	Средняя масса пробы, 10^{-3} кг	Объем пробы, 10^{-5} м ³	Влажность, %	Плотность залежи, кг/м ³
1	3	6,49	38,17	7,50	1700
2	3	6,48	38,17	8,30	1698
3	3	6,52	38,17	9,10	1708
-	Среднее	-	-	8,3	1 702

Таблица 21 – Плотность и влажность торфяной залежи (составлено автором)

Проба	Количество образцов	Средняя масса пробы, 10^{-3} кг	Объем пробы, 10^{-5} м ³	Влажность, %	Плотность залежи, кг/м ³
1	3	3,47	38,17	88,40	840
2	3	3,48	38,17	90,10	887
3	3	3,45	38,17	91,30	859
-	Среднее	-	-	89,93	862

Значения этих параметров характеризуют плотность и влажность грунта, преобладавшие в верхнем слое неосушенной песчаной и торфяной залежи в период проведения исследований. Песчаная залежь на исследованном участке сложена среднезернистыми песками. Торфяная залежь на исследованном участке представлена верховым *Sphagnum fuscum* торфом степенью разложения $R=22\%$.

Различия в исходных параметрах позволяют сопоставить поведение песчаных и торфяных грунтов при полевых испытаниях на определение прочностных свойств. Результаты полевого эксперимента по оценке величины удельного сопротивления грунта q статическому зондированию и значений предела прочности залежи на сдвиг τ методом вращательного среза приведены на рисунке 32. Зондирование проводилось

до глубины 1,0 м с шагом 0,1 м, что позволило получить детализированный профиль изменения прочностных характеристик по глубине.

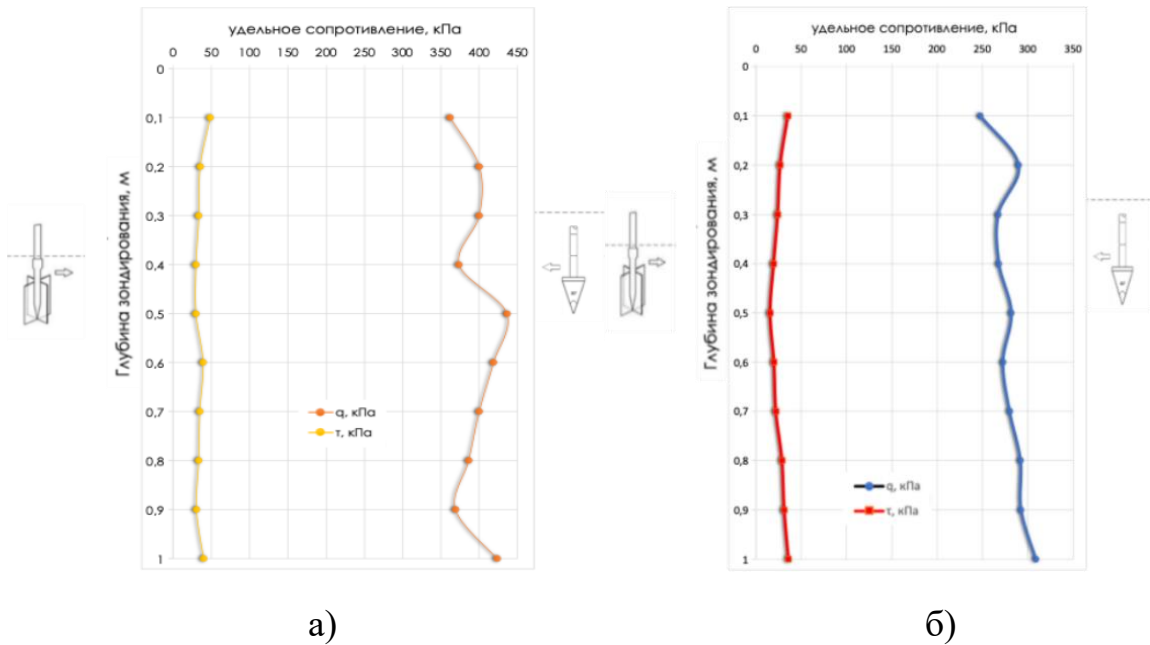


Рисунок 32 – Прочностные характеристики верхнего слоя песчаной залежи (а) и торфяной залежи (б) (составлено автором)

Для песчаной залежи результаты статического зондирования отражают степень уплотнения и водонасыщения массива по глубине, а данные испытаний на сдвиг позволяют оценить сопротивление сдвигу, определяющее условия колееобразования и устойчивость рабочей площадки. Для торфяной залежи значения q и τ характеризуют условия прочности неосушенного массива.

В Приложении Б приведены данные полевых исследований сопротивления сдвигу и результаты измерений сопротивления статическому зондированию.

Обобщая результаты полевых исследований, среднее сопротивление сдвигу составляет порядка $\tau=35$ кПа для песчаной залежи и $\tau=25$ кПа для торфяной залежи. Средние значения удельного сопротивления статическому зондированию достигают $q=400$ кПа для песка и $q=280$ кПа для торфа, что количественно подтверждает более высокую прочность и несущую способность песчаного массива по сравнению с торфяной залежью.

4.2 Результаты определения осадки машин на уступах карьеров

При моделировании устойчивости откосов с использованием программных комплексов сохраняется необходимость экспериментального подтверждения полученных данных на физической модели грунта, что обусловило проведение лабораторных исследований поведения уступов из торфа и песка при воздействии нагрузок, моделирующих давление ходовой части экскаватора. формировались физические модели уступов с двумя геометрическими схемами для каждого типа грунта при углах откоса около 45° и 38° в емкости размерами $1,0 \times 0,5 \times 0,5$ м с прозрачными стенками (рисунки 33, 34).

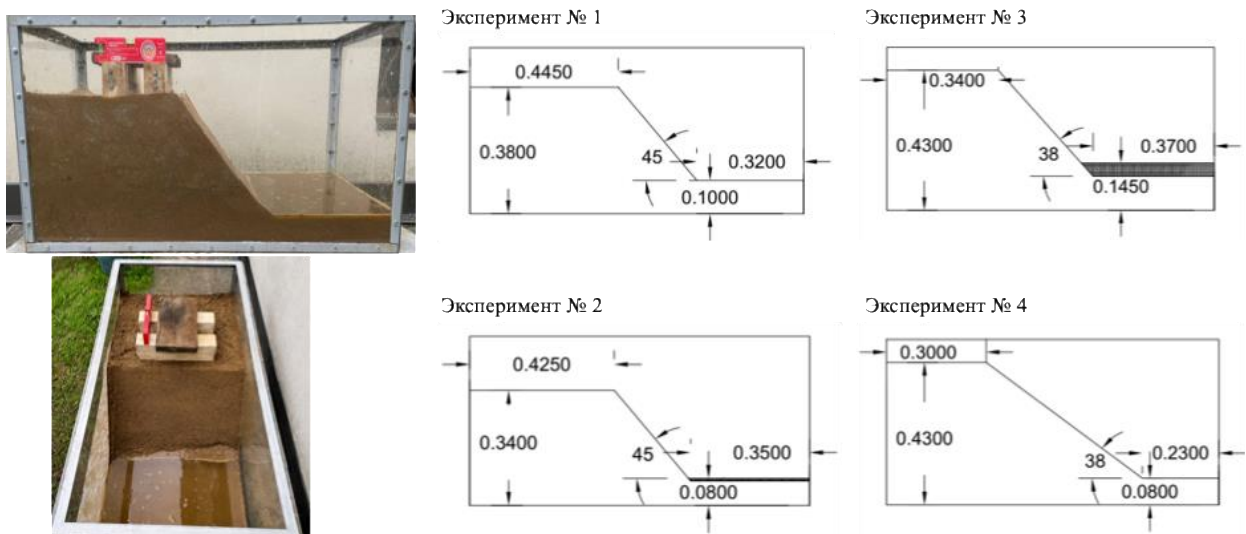


Рисунок 33 – Схема эксперимента по измерению осадки модели гидравлического экскаватора в ёмкости моделью песчаного уступа (составлено автором)

Нагружение модели гидравлического экскаватора осуществлялось поэтапно грузами массой от 8 до 70 кг (эквивалентно $160 \geq 700$ Н), с одновременной регистрацией осадки модели, характера деформаций, трещинообразования и развития зон сдвига в материале уступа.

Для песчаного грунта характер деформирования отличался большей устойчивостью и постепенностью: в экспериментах 1 и 2 (рисунок 35) первые признаки разрушения фиксировались при нагрузках 160-400 Н и 400-560 Н

соответственно, а выраженные деформации и разрушение откоса начинались при 560 Н с развитием при нагрузках ≥ 700 Н.

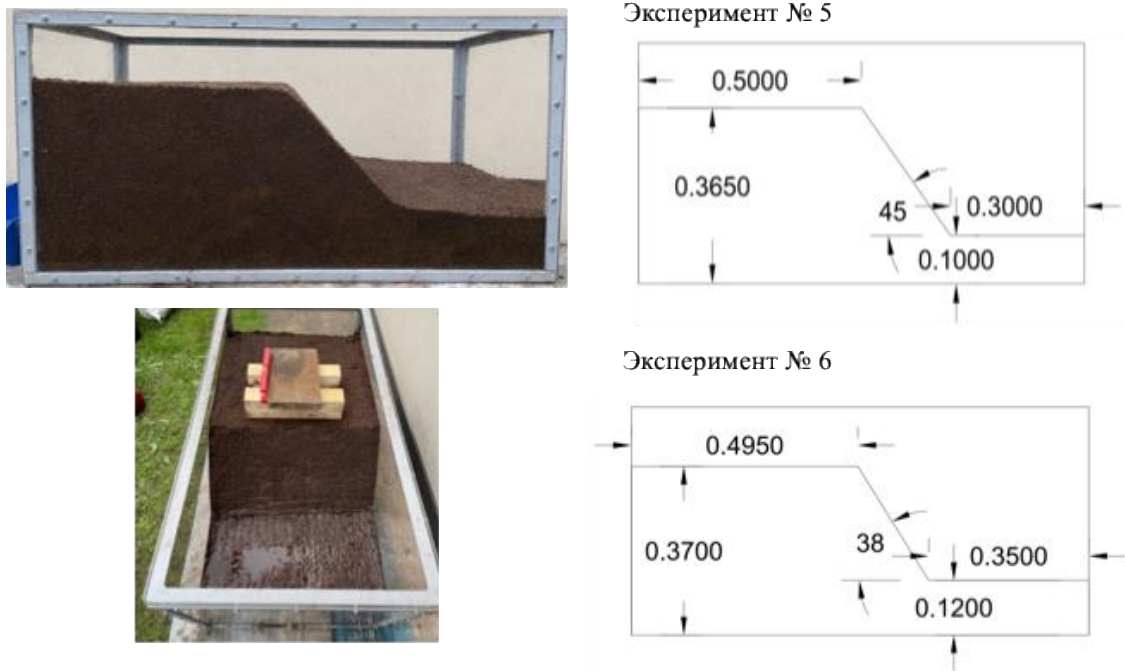


Рисунок 34 – Схема эксперимента по измерению осадки модели гидравлического экскаватора в ёмкости моделью торфяного уступа (составлено автором)

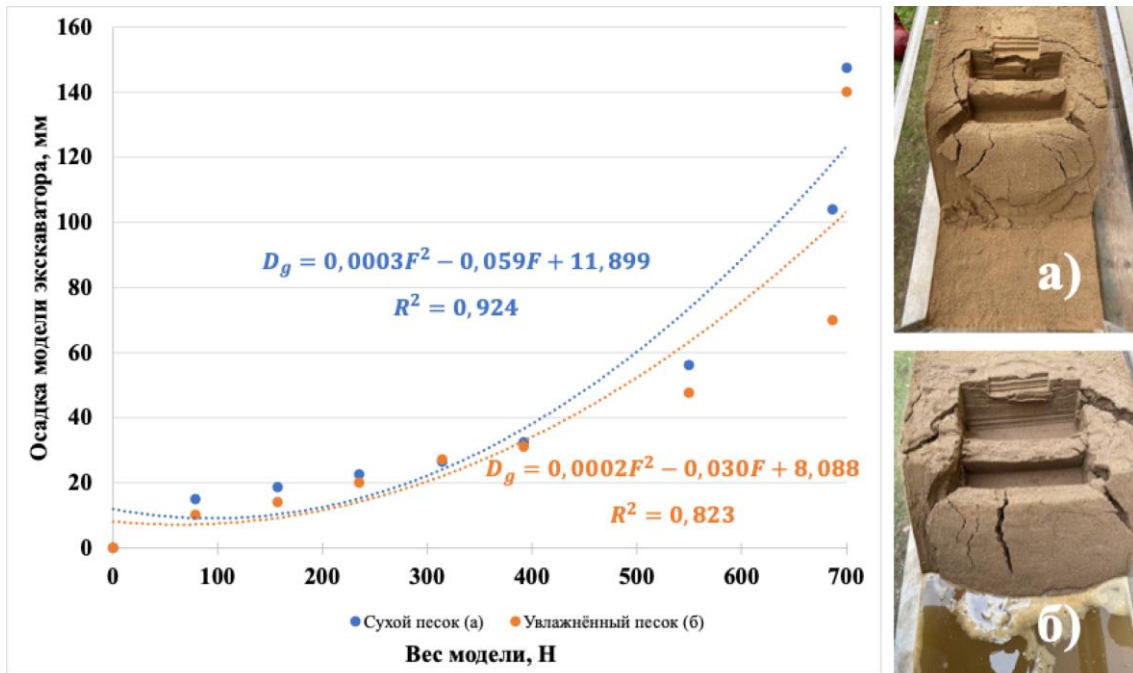


Рисунок 35 – Зависимости осадки модели экскаватора на модели песчаного уступа с углом откоса 45° от веса на грунт: а) сухой песок; б) увлажнённый песок (составлено автором)

Аналогичная тенденция наблюдалась и в экспериментах 3 и 4 (рисунок 36), где порог разрушения также сохранялся вблизи значения нагрузки 560 Н, однако начальные структурные изменения проявлялись в более широком диапазоне нагрузок.

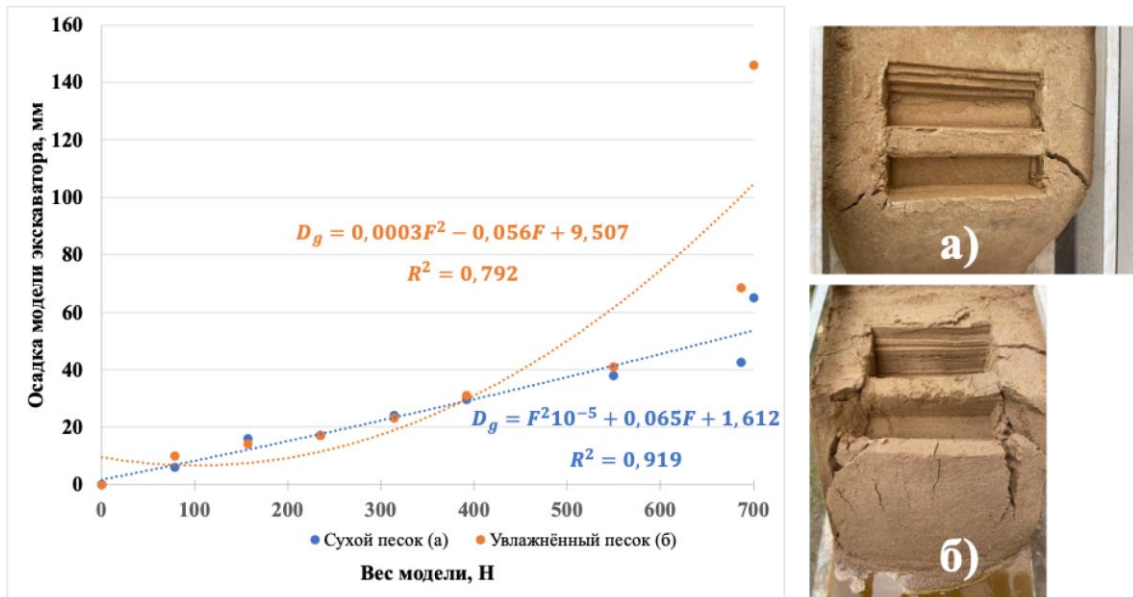


Рисунок 36 – Зависимости осадки модели экскаватора на модели песчаного уступа с углом откоса 38° от веса на грунт: а) сухой песок; б) увлажнённый песок (составлено автором)

Графики осадки демонстрируют умеренный рост деформаций на начальных стадиях с резким увеличением при переходе к критическим значениям нагрузки, что отражает переход от упругой и уплотнительной стадии к сдвиговой неустойчивости. Сравнительный анализ показывает, что торфяная залежь характеризуется более низкой несущей способностью, высокой сжимаемостью и ускоренным развитием пластических деформаций, что непосредственно влияет на функциональность экскаватора: при размещении машины на торфяном уступе возрастает риск потери устойчивости, увеличения глубины погружения гусениц, смещения центра тяжести в сторону откоса и нарушения траектории рабочего органа. Это приводит к снижению производительности, увеличению времени рабочего цикла и повышенной вероятности аварийных ситуаций, тогда как песчаное основание обеспечивает более

стабильное позиционирование экскаватора и предсказуемый режим его функционирования на уступе.

В ходе испытаний на торфяном грунте установлено, что первичные деформации и локальное вдавливание модели экскаватора начинались уже при нагрузках 160-240 Н (рисунок 37), при этом в эксперименте 5 заметные трещины и структурные нарушения откоса проявлялись при 320 Н, тогда как в эксперименте 6 аналогичные изменения фиксировались уже при 240 Н.

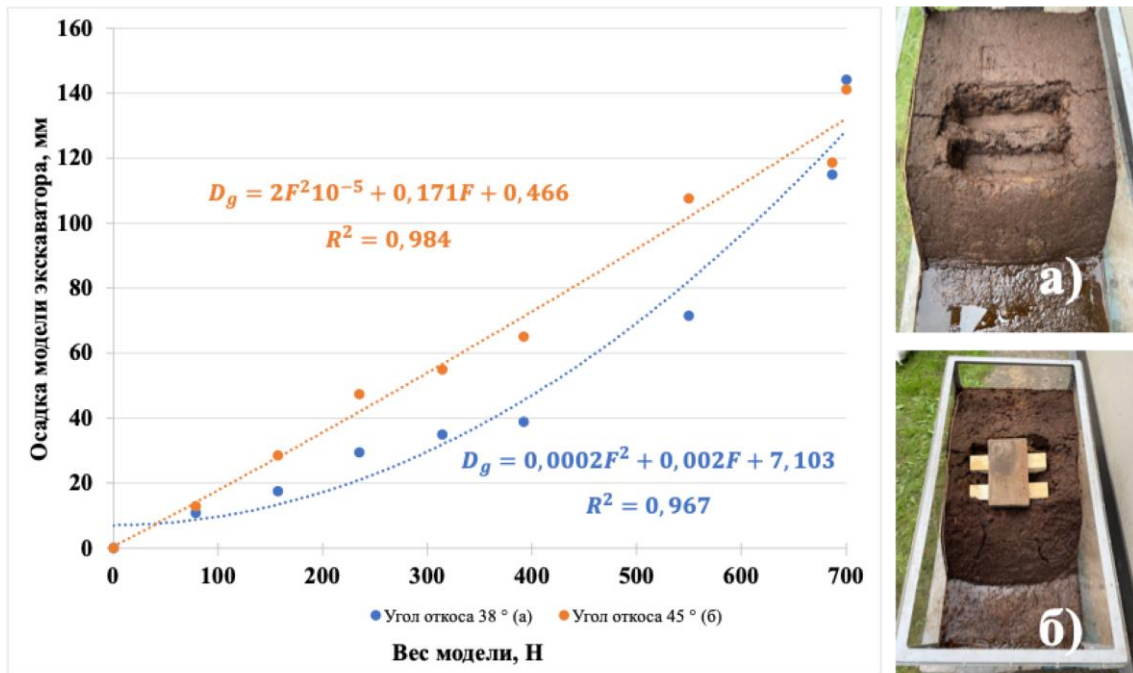


Рисунок 37 – Зависимости осадки модели экскаватора на модели торфяного уступа:

а) угол откоса 38 °; угол откоса 45 ° (составлено автором)

Графики осадки показывают интенсивный рост погружения при увеличении нагрузки свыше 560 Н, что свидетельствует о снижении несущей способности торфа и переходе деформаций в стадию пластического течения с формированием сдвиговых поверхностей и смещением массива в сторону откоса.

Заглубление модели экскаватора сопровождалось не только вертикальной осадкой, но и её наклоном в сторону выемки. Указанное явление следует характеризовать как неравномерную, или угловую, осадку основания, сопровождающуюся креном машины [15]. Его возникновение обусловлено

неравномерным распределением нормальных напряжений в грунтовом массиве под гусеничным ходом. С позиций теории Буссинеска [108] внешняя нагрузка, передаваемая через ходовую часть на поверхность полупространства, формирует пространственное поле вертикальных напряжений σ_z , величина которых уменьшается с глубиной и удалением от точки приложения нагрузки (рисунок 38).

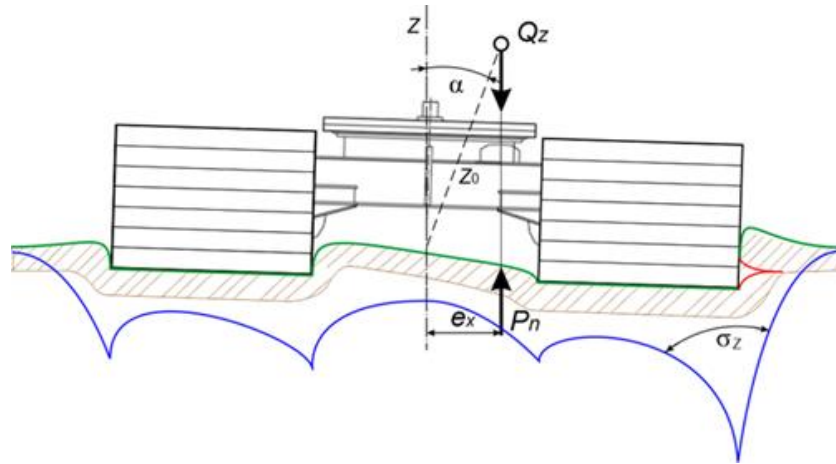


Рисунок 38 – Схема угловой осадки модели экскаватора при неравномерной деформации грунтового основания (составлено автором)

При различии деформаций грунта под противоположными сторонами ходовой части возникает разность осадок, приводящая к наклону машины на угол α . Следовательно, наблюдаемое в экспериментах заглубление модели под углом следует рассматривать как результат дифференциальной осадки грунтового основания.

На рисунке 39, 40 представлены зависимости угла наклона модели экскаватора от прикладываемой нагрузки для песчаного основания (эксперименты № 1-4) и торфяного основания (эксперименты № 5, 6). Полученные зависимости показывают, что характер изменения угла определяется не только величиной нагрузки, но и параметрами уступа: углом откоса, геометрией площадки и уровнем воды. Во всех экспериментах с ростом силы наблюдается увеличение угла наклона модели, что указывает на развитие неравномерной осадки основания и смещение центра тяжести модели в сторону выемки. Для песчаного основания различие между опытами № 1-4 также связано с разной геометрией уступа и уровнем воды. Эксперименты

выполнялись при углах откоса 38° и 45° , а уровень воды составлял 0,145; 0,100 и 0,080 м.

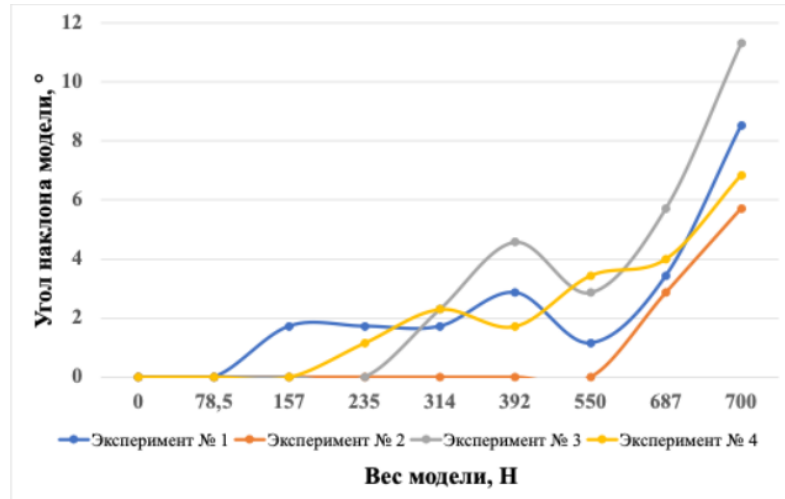


Рисунок 39 – Изменение угла наклона модели экскаватора на песчаном основании (составлено автором)

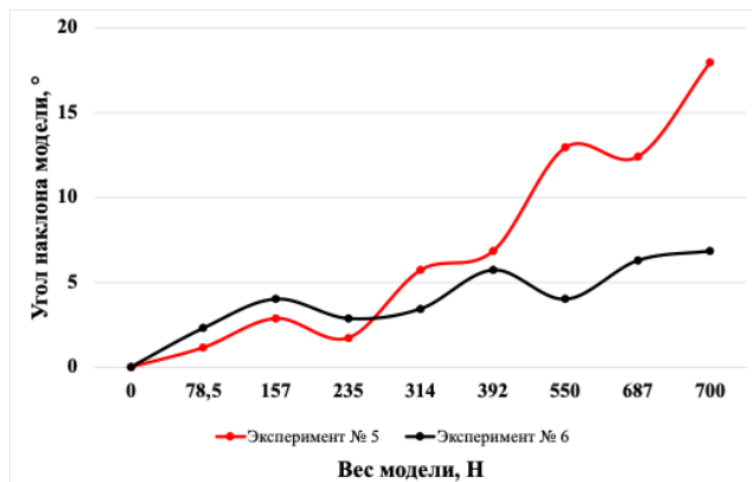


Рисунок 40 – Изменение угла наклона модели экскаватора на торфяном основании (составлено автором)

Полученные результаты показывают, что наиболее неблагоприятное сочетание параметров уступа наблюдалось в эксперименте № 3, где уже при нагрузке 392 Н угол наклона достигал $4,5^\circ$, а при 700 Н возрастал до $11,3^\circ$, что является максимальным значением для песчаного основания. В эксперименте № 1 наклон также развивался достаточно интенсивно и при 700 Н составил $8,5^\circ$. В то же время в эксперименте № 2 сочетание параметров уступа оказалось более благоприятным, поскольку до нагрузки

550 Н заметный крен практически отсутствовал, а при 700 Н угол составил 5,7 °. Эксперимент № 4 занял промежуточное положение: при 700 Н угол достиг 6,9 °. Это подтверждает, что для песчаного основания устойчивость модели определяется не только величиной нагрузки, но и параметрами уступа, включая угол откоса, высоту уступа, ширину горизонтальной площадки и уровень воды, которые в совокупности влияют на развитие неравномерной осадки и величину крена модели.

Для торфа различие между опытами № 5 и № 6 связано с разной геометрией уступа. Один из опытов выполнен при угле откоса 38° и уровне воды 0,120 м, другой – при угле 45° и уровне воды 0,100 м. Полученные результаты показывают, что в эксперименте № 5 сочетание параметров уступа оказалось наиболее неблагоприятным, так как уже при средних нагрузках формировался значительный крен, а при 700 Н он более чем в 2,5 раза превысил значение эксперимента № 6. Это подтверждает, что для торфяного основания устойчивость модели определяется не только величиной нагрузки, но и формой уступа, высотой откоса, шириной горизонтальной площадки и степенью водонасыщения.

Из графиков следует, что увеличение нагрузки приводит к росту угла наклона модели на всех типах основания, однако интенсивность этого роста существенно зависит от параметров уступа. Для песчаного основания максимальные углы составили – 5,7-11,3 °, тогда как для торфяного – 6,8-17,8 °. Кроме того, различия между отдельными кривыми подтверждают, что угол откоса, уровень воды и геометрия уступа оказывают существенное влияние на величину неравномерной осадки и, следовательно, на устойчивость экскаватора на уступе.

Таким образом, результаты лабораторных опытов по осадке модели экскаватора при нагружении на грунте подтверждают принципиальное различие деформационного отклика песчаного и торфяного оснований. Для песка (4 эксперимента) характерна преимущественно нелинейная зависимость $D_g = f(F)$: при малых нагрузках осадка развивается умеренно, однако при увеличении F (ориентировочно после 400 Н) наблюдается ускорение деформаций, что согласуется

с полученными аппроксимациями и удовлетворительными значениями коэффициента детерминации $R^2 \approx 0,79-0,92$.

Для торфа (2 эксперимента) установлено более выраженное нарастание осадки при росте нагрузки и высокая согласованность экспериментальных точек с аппроксимирующими зависимостями ($R^2 \approx 0,97-0,98$), что отражает повышенную сжимаемость и низкую несущую способность торфяного массива. Следовательно, при позиционировании карьерного экскаватора на слабых грунтах контроль нагрузки на основание и ограничение допустимой осадки являются критическими условиями обеспечения устойчивости и предотвращения аварийных ситуаций (просадка, перекоп ходовой части, потеря устойчивости).

4.3 Результаты многофакторного эксперимента по определению устойчивости экскаватора на уступе

Математическая модель отображает наиболее существенные стороны анализируемой устойчивости машин на уступе. Коэффициент запаса устойчивости FoS определяется номинальным давлением на грунт NGP (кН), углом откоса α ($^\circ$) и величиной бермы B (м). Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Матрица планирования и результаты эксперимента (составлено автором)

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	$FoS (\bar{y}_i)$	
				Песок	Торф
1	-1	-1	-1	1,68	1,57
2	+1	-1	-1	1,47	1,21
3	-1	+1	-1	1,32	1,31
4	+1	+1	-1	1,15	1,02
5	-1	-1	+1	1,77	1,62
6	+1	-1	+1	1,60	1,29
7	-1	+1	+1	1,40	1,49
8	+1	+1	+1	1,26	1,15

В таблице 23 факторы представлены в виде кодированных переменных X_1 , X_2 , X_3 , где уровни -1 и $+1$ соответствуют нижнему и верхнему уровням варьирования каждого фактора. Таким образом, значения X_1 , X_2 , X_3 в матрице планирования не

являются физическими величинами, а задают только «уровень» фактора. Расшифровка кодированных уровней -1 и $+1$ для каждого фактора приведена в таблицах 16, 17 отдельно для песчаного и торфяного оснований.

Таблица 23– Таблица факторов (составлено автором)

Параметр	Песчаное основание			Торфяное основание		
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
Фактор	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
Наименование	NGP	α	B_b	NGP	α	B_b
Ед. изм.	кН	°	м	кН	°	м
Мин	16,1	38	1,0	14,1	45	1,0
Макс	35,0	53	2,5	35,8	63	2,5
Кодированный низкий уровень	$-1 = 16,1$	$-1 = 38,0$	$-1 = 1,0$	$-1 = 14,1$	$-1 = 45,0$	$-1 = 1,0$
Кодированный высокий уровень	$+1 = 35,0$	$+1 = 53,0$	$+1 = 2,5$	$+1 = 35,8$	$+1 = 63,0$	$+1 = 2,5$
Среднее	25,55	45,50	1,75	24,95	54,00	1,75

Средний уровень соответствует нулевому (центральному) уровню кодирования и вычисляется как полусумма минимального и максимального значений каждого фактора (76):

$$X_0 = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2}, \quad (76)$$

Для песчаного основания:

$$X_0^{NGP} = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2} = \frac{16,1 + 35,0}{2} = 25,55,$$

$$X_0^{\alpha} = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2} = \frac{38 + 53}{2} = 45,50,$$

$$X_0^{B} = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2} = \frac{1,0 + 2,5}{2} = 1,75.$$

Для торфяного основания:

$$X_0^{NGP} = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2} = \frac{14,1 + 35,8}{2} = 24,95,$$

$$X_0^{\alpha} = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2} = \frac{45 + 63}{2} = 54,00,$$

$$X_0^B = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2} = \frac{1,0 + 2,5}{2} = 1,75.$$

Число степеней свободы для S_y^2 при $R = N$. В Приложении В приведено полное описание многофакторного эксперимента.

Таким образом, окончательно получена модель FoS_{Π} и FoS_T в натуральном виде (77, 78):

$$FoS_{\Pi} = 2,8 - 0,02 NGP - 0,03 \alpha + 0,04 B + 0,0001 NGP \cdot \alpha + 0,001 NGP \cdot B, \quad (77)$$

$$FoS_T = 2,5 - 0,02 NGP - 0,02 \alpha - 0,1 B + 0,0001 NGP \cdot \alpha - 0,0001 NGP \cdot B + 0,003 \alpha \cdot B. \quad (78)$$

Построенные по результатам факторного эксперимента трёхмерные модели отклика (рисунок 41, 42) обеспечивает предварительную оценку FoS для песчаного и торфяного оснований при варьировании NGP , α и B ; при этом расчёт выполняется по полученному регрессионному уравнению $FoS = f(NGP, \alpha, B)$ в натуральных факторах.

Для точной оценки влияния факторов безопасности, применены два аналитических подхода:

- метод стандартизированных коэффициентов
- дисперсионный анализ (ANOVA).

Это позволило не только построить математическую модель, но и выявить реальный вклад каждого фактора в устойчивость машины.

По результатам анализа функций отклика (рисунок 41, 42) установлено:

- 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%).

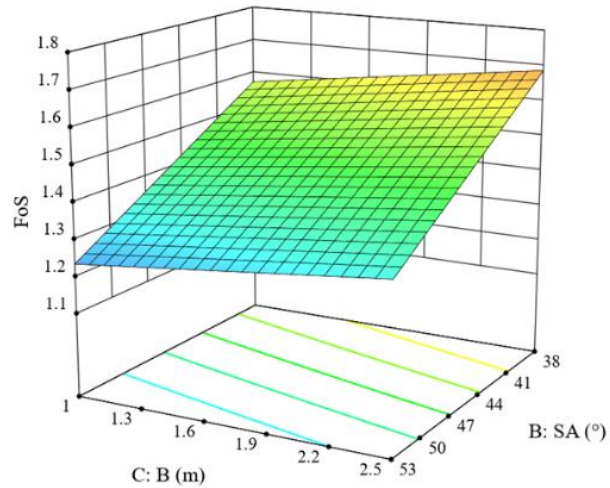
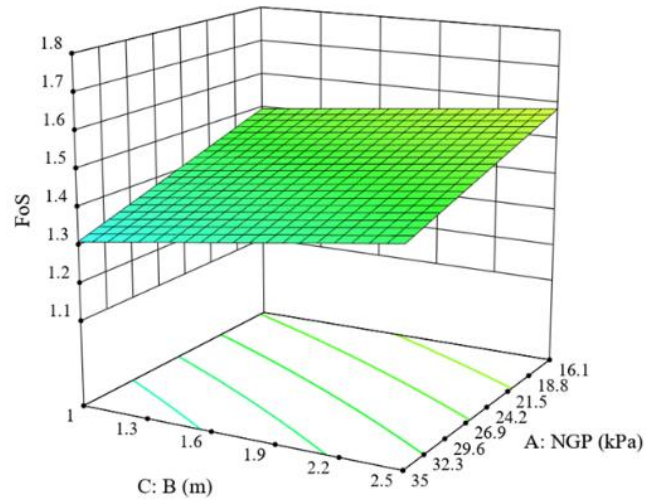
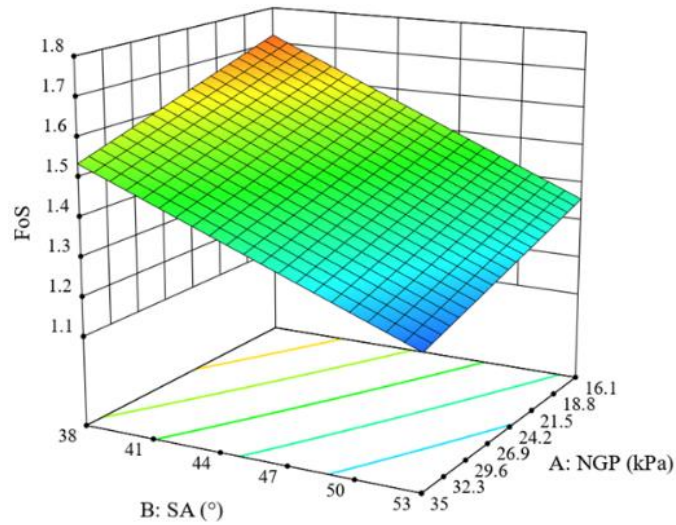


Рисунок 41 – Трёхмерные графики функции отклика FoS в натуральном виде для экскаватора на песчаном основании [156]

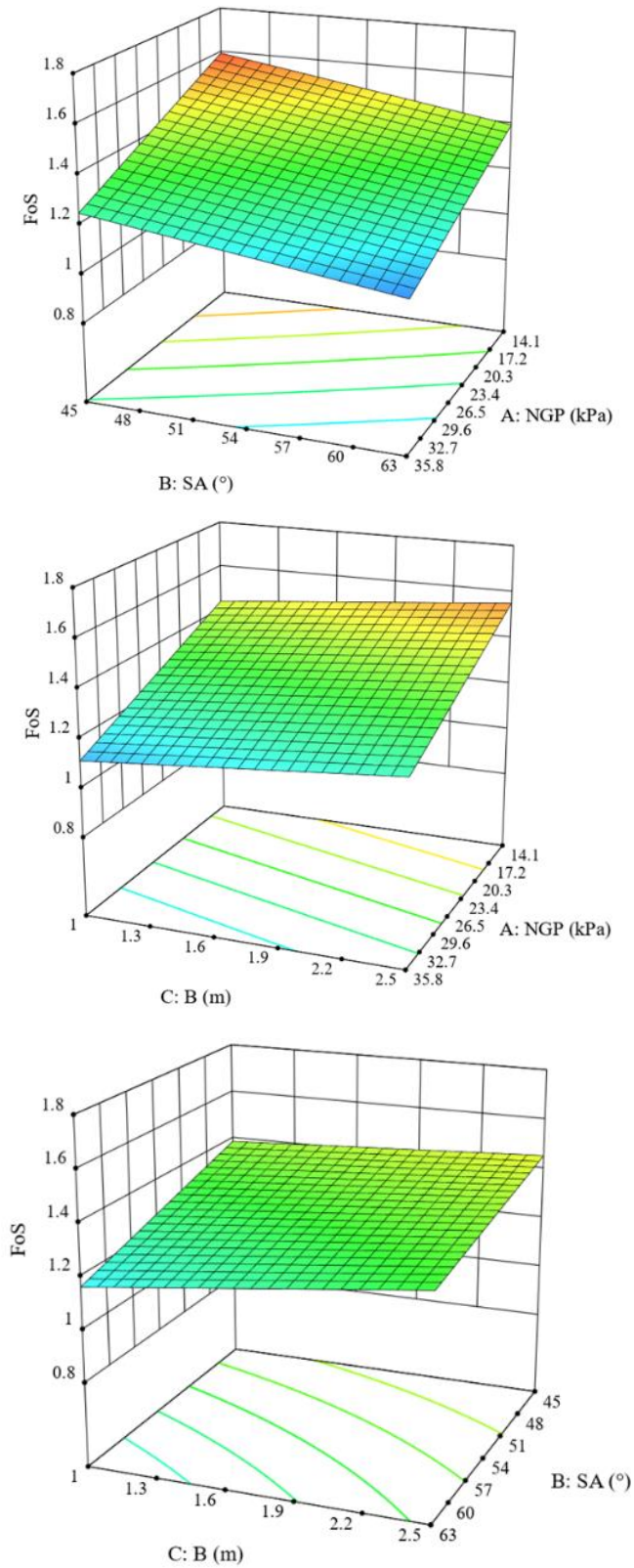


Рисунок 42 – Трёхмерные графики функции отклика FoS для экскаватора на торфяном основании [156]

Таким образом, по результатам полного факторного эксперимента и дисперсионного анализа установлено, что основными факторами, влияющими на рациональное позиционирование и устойчивость гидравлического экскаватора на откосах нерудных месторождений, являются номинальное удельное давление на грунт (NGP), угол откоса уступа (α) и ширина бермы (B).

4.4 Результаты определения рабочей зоны экскаватора

На основе данных, полученных по результатам оценки устойчивости машины и определения пространственного положения рабочего оборудования гидравлического экскаватора, а также по результатам анализа рационального размещения *LiDAR*-сенсоров, была обоснована структура сенсорного обеспечения системы мониторинга [16]. На рисунке 43 показаны исследованные варианты установки *LiDAR*-сенсоров на экскаваторе:

- (а) боковое размещение датчиков на поворотной платформе (верхнем строении) и
- (б) верхнее размещение датчика над надстройкой.

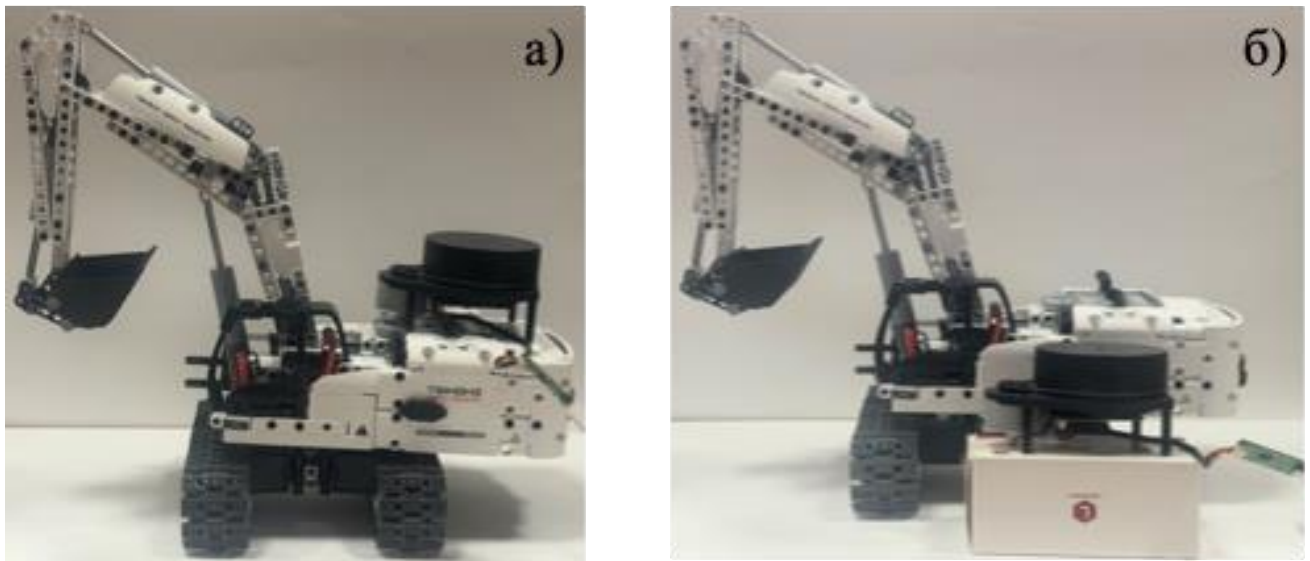


Рисунок 43 – Размещение *LiDAR*-датчиков на модели гидравлического экскаватора:

а) верхняя компоновка; б) боковая компоновка (фото автора)

Эффективность указанных компоновок далее оценивалась по точности обнаружения объектов в пределах заранее заданных зон риска, а количественные результаты представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Показатели работы *LiDAR* сенсора в зонах риска [155]

Зоны безопасности экскаватора	Боковая компоновка <i>LiDAR</i> (%)	Верхняя компоновка <i>LiDAR</i> (%)
Высокий риск (0–5 м)	95	73
Средний риск (5–10 м)	84	85
Низкий риск (10–20 м)	70	90

Как следует из таблицы 24, применение *LiDAR* сенсора обеспечивает повышение надёжности обнаружения объектов в рабочей зоне экскаватора. Боковые *LiDAR*-датчики демонстрируют наибольшую точность в зоне высокого риска (0-5 м) (95%), что принципиально важно для своевременного предупреждения при появлении персонала, машин или статических препятствий в непосредственной опасной близости к экскаватору (рисунок 44).

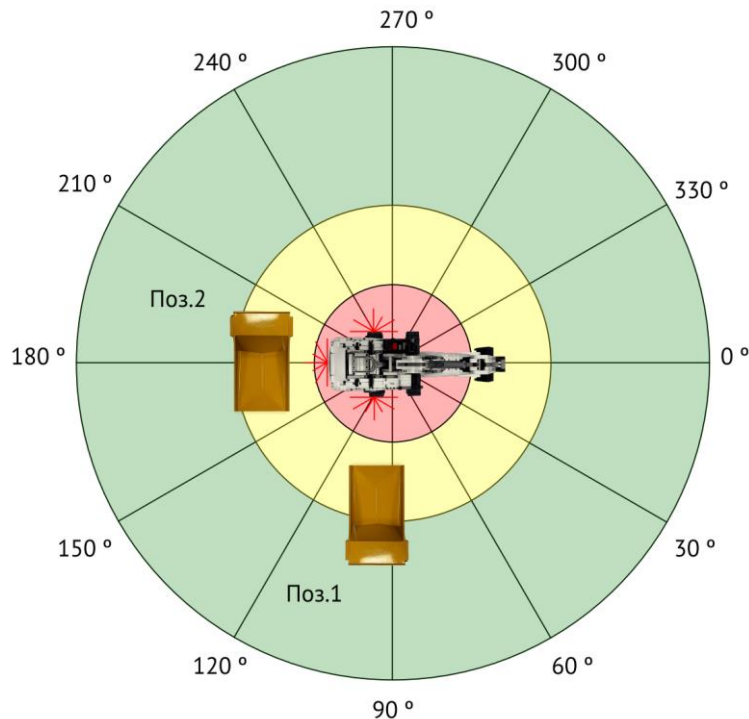


Рисунок 44 – Секторная схема зоны сканирования *LiDAR*-сенсора в рабочем пространстве гидравлического экскаватора (поз. 1 – 90°, поз. 2 – 180°)

(составлено автором)

Вместе с тем, при увеличении расстояния точность при боковой компоновке снижается (84% в зоне 5-10 м и 70% в зоне 10-20 м), что объясняется ослаблением сигнала с ростом дальности и экранированием/окклюзией со стороны стрелы, рукояти и ковша в ходе рабочего цикла.

Напротив, верхняя компоновка *LiDAR* характеризуется меньшей точностью в ближней зоне (73%), но повышенной точностью на больших расстояниях (85-90%), что согласуется с преимуществами возвышенного положения датчика и более благоприятной дальне зонной видимостью.

В результате сравнительного анализа двух вариантов размещения сенсоров установлено, что приоритетным является размещение сенсора *LiDAR* на четырёх боковых поверхностях экскаватора (*RPLIDAR A1M8*). Это обусловлено тем, что такая компоновка 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%).

4.5 Алгоритм управления позиционированием экскаватора на уступах нерудных залежей

На основании полученных результатов был разработан алгоритм мониторинга и управления рациональным позиционированием экскаватора (рисунок 45). Алгоритм реализован на платформе *Raspberry Pi*, связанной с модулем анализа и управления на основе методов искусственного интеллекта. В процессе обучения система была настроена на интерпретацию данных *LiDAR* и эксплуатационных параметров для поддержки принятия решений и формирования предупреждений в реальном времени по следующим направлениям [11, 65]:

- обеспечение устойчивости экскаватора на уступе;
- безопасное и рациональное взаимное положение машин (экскаватор–самосвал и др.);

- предотвращение аварийных ситуаций за счёт выявления и управления потенциально опасными взаимодействиями между экскаватором, другими машинами и персоналом в пределах рабочей зоны.



Рисунок 45 — Алгоритм управления позиционированием экскаватора в рабочей зоне [155, 65]

После активации оператором монитора экскаватора автоматически подаётся управляющий сигнал на запуск системы управления. LiDAR-сенсоры, размещённые на передней, задней и боковых частях поворотной платформы, начинают сканирование окружающего пространства, формируя облако точек, описывающее трёхмерную конфигурацию рабочей зоны машины [65].

Полученные пространственные данные поступают в блок сбора данных, где выполняется их накопление, синхронизация и первичная структуризация. На данном этапе формируется исходный массив координатных данных, привязанных к системе координат поворотной платформы. Подготовленные данные передаются в блок фильтрации, в котором осуществляется очистка массива от шумовых составляющих, вызванных внешними воздействиями, такими как пыль, атмосферные осадки или вибрация. Для этой цели применяются адаптивные алгоритмы фильтрации, в

частности методы статистического устранения выбросов и скользящего среднего, что позволяет сохранить точность пространственных измерений при минимальных потерях данных.

Отфильтрованные данные поступают в блок проверки, где производится детектирование объектов и анализ их пространственного положения относительно экскаватора [80, 81]. Для распознавания объектов используется кластеризация точек по расстояниям с последующим определением контуров предполагаемых препятствий. Каждому объекту присваиваются трёхмерные координаты центра масс, после чего система классифицирует их по степеням риска попадания в зону движения рабочего оборудования. В соответствии с расстоянием до объекта выделяются три зоны опасности: зона *A* – критическая (непосредственная угроза), зона *B* – предупредительная (потенциальная опасность) и зона *C* – контролируемая (допустимая область наблюдения).

Результаты анализа передаются на модуль отображения информации – монитор оператора, на котором визуализируются текстовые и графические предупреждения. В случае обнаружения объекта в зоне *A* активируется аварийная световая и звуковая сигнализация, в зоне *B* – предупредительная, в зоне *C* – информационная. Такая многоуровневая система сигнализации обеспечивает своевременное информирование оператора о возможных препятствиях и позволяет минимизировать риск столкновений при выполнении технологических операций.

Функционирование алгоритма реализовано в виде непрерывного цикла, обеспечивающего обновление пространственных данных и динамическую оценку ситуации в рабочем пространстве экскаватора [80-82]. Непрерывная обратная связь между LiDAR-сенсорами, блоками обработки данных и модулем визуализации гарантирует надёжность контроля и оперативность реакции системы на изменение окружающих условий. За счёт такой структуры обеспечивается высокий уровень автоматизации наблюдения за рабочей зоной и повышение безопасности эксплуатации горнотранспортного оборудования.

4.6 Анализ продолжительности рабочего цикла и производительности экскаватора

В ходе исследования выполнен сравнительный анализ работы гидравлического экскаватора при двух типах движения рабочего органа: с совмещением операций (тип А) и без совмещения операций (тип В), представленных на рисунке 46. Для каждого типа была сформирована структурная схема цикла с выделением отдельных временных интервалов (для типа А и для типа В), отражающих операции копания, подъема, поворота с грузом, разгрузки, холостого поворота и вспомогательных перемещений.

На рисунке 46 тип А (с совмещением операций), $T_1-(1,2), t_k$, $T_2-(2,3), t_{\text{под}}+t_{\text{пов.гр}}$, $T_3-(3), t_{\text{в}}$, $T_4-(3,4), t_{\text{пов.х}}$, $T_5 - (4, 5), t_{\text{оп}}$; тип В (без совмещения операций), $T_1-(1,2), t_k$, $T_2-(2,3), t_{\text{под}}$, $T_3-(3,4), t_{\text{пов.гр}}$, $T_4-(4), t_{\text{в}}$, $T_5-(4,5), t_{\text{пов.х}}$, $T_6 - (5, 6), t_{\text{оп}}$; t_k – продолжительность операции копания, с; $t_{\text{под}}$ – продолжительность операции подъема ковша с грунтом, с; $t_{\text{пов.гр}}$ – продолжительность поворота платформы и ковша с грунтом к месту выгрузки грунта, с; $t_{\text{в}}$ – продолжительность выгрузки грунта, с; $t_{\text{пов.х}}$ – продолжительность поворота платформы с ковшом обратно в забой, с; $t_{\text{оп}}$ – продолжительность опускания ковша, с.

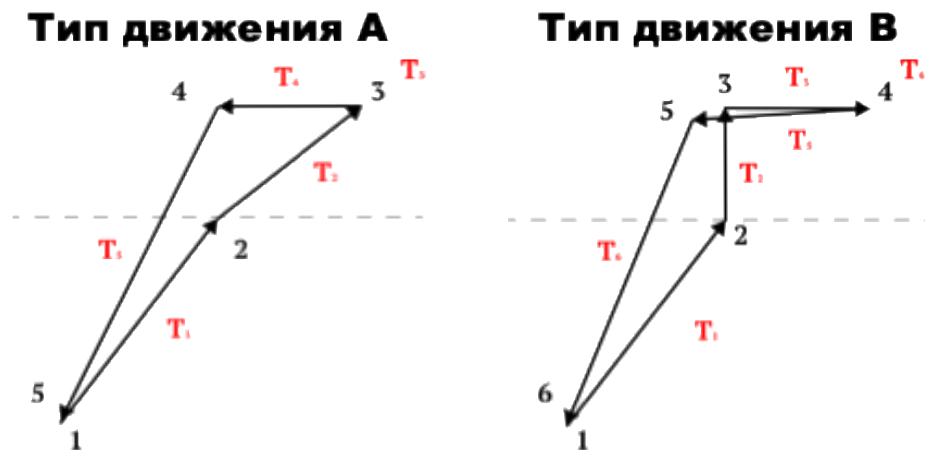


Рисунок 46 – Схема движений рабочего оборудования экскаватора в пределах рабочего цикла (составлено автором)

Анализ циклограмм (рисунок 47) показал, что изменение траектории движения рабочего оборудования приводит к перераспределению длительности отдельных операций цикла.

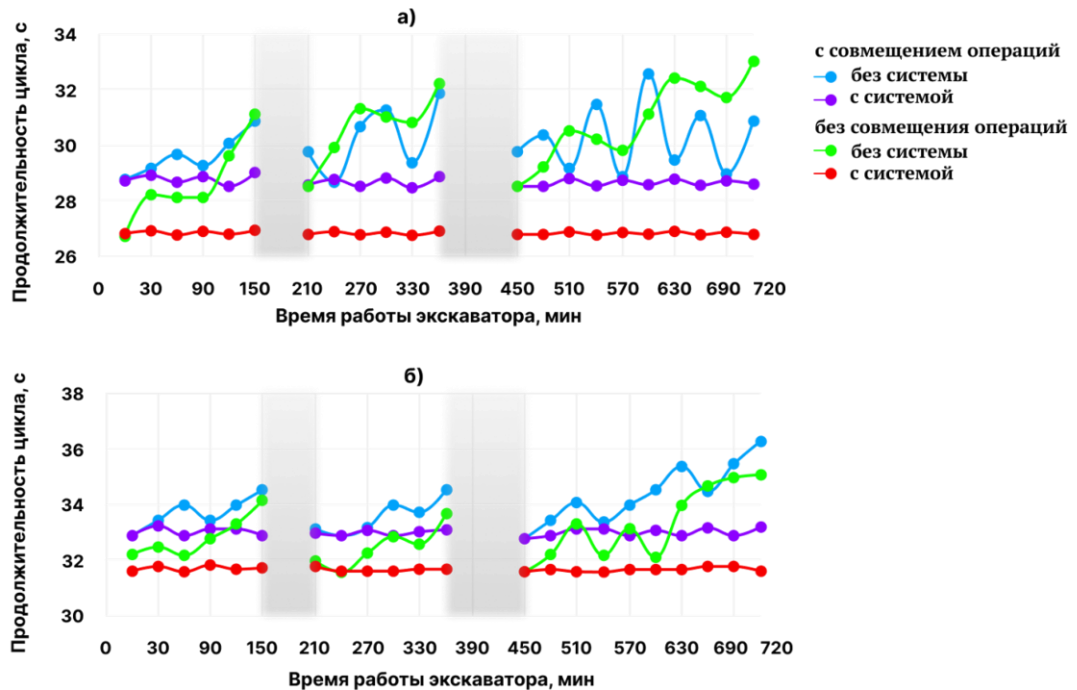


Рисунок 47 – Сменной циклограммы рабочего процесса: а) при повороте на 90° ; б) при повороте на 180° (составлено автором)

Для типа В характерно увеличение числа переходных операций и наличие дополнительного временного интервала T_6 , что вызывает рост суммарной продолжительности цикла. В среднем продолжительность цикла при типе А оказалась ниже на 8–13% по сравнению с типом В, что подтверждено серией натурных измерений.

Результаты анализа для двух типов (А и В) показывают снижение продолжительности цикла при применении системы на 13% (90° , тип А), – 5% (90° , тип В), – 4% (180° , тип А) и – 3% (180° , тип В).

На основании полученных экспериментальных данных определялась техническая производительность экскаватора $Q_{\text{тех}}$.

Уменьшение продолжительности рабочего цикла при применении алгоритма приводит к росту $Q_{\text{тех}}$ (рисунок 48), что подтверждается результатами: при повороте

90 ° прирост составляет до 11,4% для типа А и достигает до 23,4% для типа В, тогда как при повороте 180 ° до 9,8% для типа А и до 18,3% для типа В.

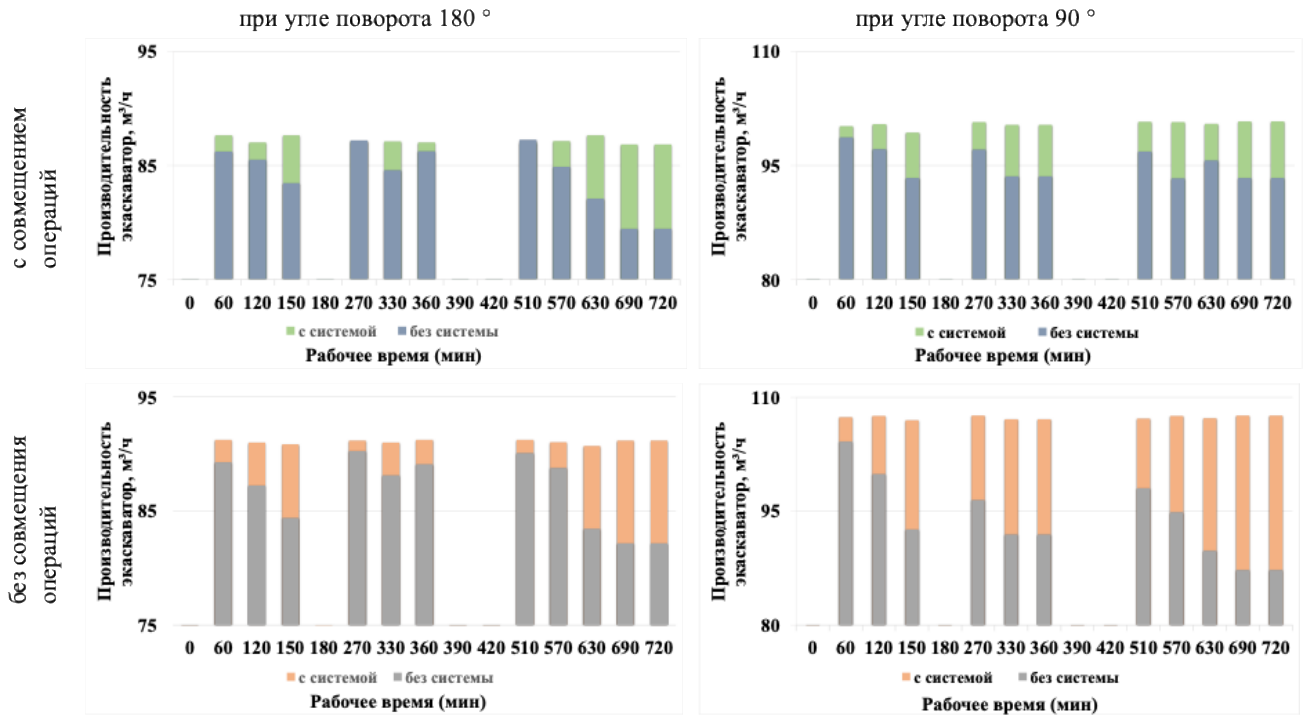


Рисунок 48 – Анализ сменной производительности экскаватора с/без совмещения операций (составлено автором)

Разработанный алгоритм также обеспечивает снижение времени простоев до 25-50% по организационно-технологическим причинам (маневрирование и перепозиционирование в рабочей зоне) за счёт контроля устойчивости и предварительного согласования взаимного положения экскаватора и самосвала.

4.7 Выводы по главе 4

Проведен анализ прочностных характеристик слабых грунтов в условиях карьерной добычи песчаного и торфяного сырья. Определены пределы прочности песчаного и торфяного основания: для песчаного основания $[\tau] = 35$ кПа и $[q] = 400$ кПа, а для торфяного основания $[\tau] = 25$ кПа и $[q] = 280$ кПа для оценки устойчивости машин на слабых грунтах.

Проведённые лабораторные исследования на физической модели уступов из песка и торфа в прозрачной емкости показали принципиально различный

деформационный отклик оснований при нагружении, имитирующем давление ходовой части экскаватора: песчаный грунт демонстрирует более высокую несущую способность и постепенный переход от уплотнения к сдвиговой нестабильности с порогом разрушения порядка 560 Н, тогда как торфяной уступ характеризуется ранним возникновением деформаций уже при 160–240 Н, высокой сжимаемостью и ускоренным развитием пластического течения, что приводит к значительному увеличению осадки, смещению массива в сторону откоса и росту риска потери устойчивости экскаватора. При этом экспериментально установлено, что песчаный уступ выдерживает нагрузку, примерно в 2 раза превышающую нагрузку, воспринимаемую торфяным уступом, при одинаковых значениях основных факторов. Тем самым обоснована необходимость жёсткого контроля нагрузки и допустимой осадки при позиционировании машины на слабых грунтах, особенно торфяных, для предотвращения аварийных ситуаций.

В результате многофакторного эксперимента получены математические модели коэффициента запаса устойчивости, в которых показано, что для песчаных грунтов величина угла откоса уступа является определяющим фактором (значимость 75,5%), а в случае торфяных грунтов доминирующее влияние (значимость 70,7%) оказывает номинальное давление экскаватора на грунт. Это позволяет использовать полученные уравнения в кодированном и натуральном виде для оперативной инженерной оценки FoS и построения трёхмерных поверхностей отклика, по которым можно выбирать безопасные сочетания NGR, α и ширины бермы и выделять области, где устойчивость экскаватора.

В рамках эксперимента показано, что наибольшее значение для обеспечения безопасности имеет контроль зоны высокого риска (0–5 м) вокруг экскаватора, где боковые LiDAR-датчики обеспечивают максимальную точность обнаружения объектов.

Разработано техническое решение с использованием Raspberry Pi, LiDAR и элементов искусственного интеллекта, обеспечивающее мониторинг и рациональное позиционирование экскаватора в реальном времени.

Проведён сравнительный анализ рабочего цикла гидравлического экскаватора для двух типов движения рабочего органа, показавший, что вариант с совмещением операций (тип А) за счёт сокращения числа переходных операций и устранения дополнительного временного интервала обеспечивает уменьшение суммарной продолжительности цикла в среднем на 8-13% по сравнению с типом В, а при внедрении разработанной системы управления даёт дополнительное снижение времени цикла до 11% (при угле поворота 90°), что подтверждено данными натурных измерений.

В результате обработки экспериментальных данных выполнена оценка технической и эксплуатационной производительности экскаватора на основе фактического времени цикла и стандартной зависимости, включающей номинальную вместимость ковша, коэффициент наполнения и коэффициент разрыхления, при этом показано, что сокращение времени цикла под действием алгоритма ведёт к росту производительности до 11-23% при угле поворота 90° и до 10-18% при 180° , а также к снижению организационно-технологических простоев до 25-50% благодаря рациональному маневрированию и согласованию положения экскаватора и самосвала.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Рекомендации по функционированию машин в условиях карьера нерудных материалов

Для разработки месторождений со слабыми и неустойчивыми грунтами, включая песчаные и торфяные основания, целесообразно применять однозабойную схему разработки с высотой уступа не более 5 м (рисунок 49). Данная рекомендация обусловлена тем, что в рыхлых и слабых грунтах устойчивость откосов определяется не только величиной сопротивления срезу грунтового массива, но и воздействием влаги, порового давления воды, локальных нагрузок от горного оборудования, а также нарушением структуры массива в процессе выемки. В несвязных материалах чрезмерное увеличение высоты уступа приводит к повышению вероятности локальных обрушений, прогрессирующих деформаций и потери несущей способности в прибрежной зоне уступа [92].

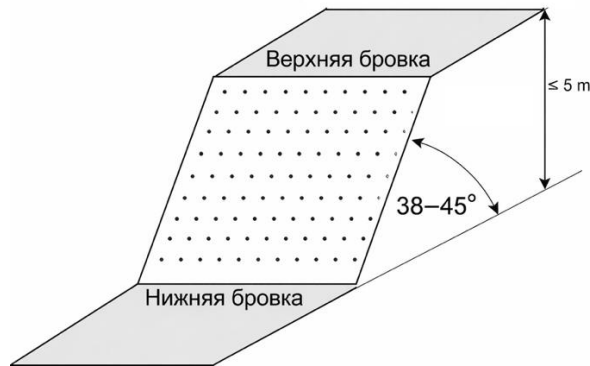


Рисунок 49 – Схема конструкции уступа карьера нерудных материалов
(составлено автором)

Данное требование является особо актуальным для торфяных месторождений, поскольку торф характеризуется высокой сжимаемостью, малой жесткостью, выраженной чувствительностью к степени водонасыщения и значительными деформациями при внешнем нагружении. В таких условиях даже умеренные изменения геометрии откоса могут приводить к потере устойчивости или пластичному течению грунтового массива [60]. Песчаные грунты в целом более

устойчивы по сравнению с торфяными; однако в разрыхлённом состоянии или при высокой степени водонасыщения они также требуют ограничения высоты уступа и тщательного подбора параметров откосов для обеспечения безопасной работы экскаватора и транспортного оборудования [86]. Рекомендуемые параметры разработки уступов в слабых и неустойчивых грунтах приведены в таблице 25.

Таблица 25 – Рекомендуемые параметры разработки уступов в слабых и неустойчивых грунтах (составлено автором)

Параметр	Рекомендуемое значение	Область применения
Схема разработки	Однозабойная схема отработки	Торф и мягкие песчаные грунты
Высота уступа	$\leq 3-5$ м	Торф и песок
Диапазон углов откоса	$38-53^\circ$	Общий проектный диапазон
Рекомендуемый угол откоса для торфа	Около 38°	Торф
Рекомендуемый угол откоса для песка	Около 45°	Песок
Уровень воды в водоотводной/дренажной канаве	0,5–1,5 м	В основном торф
Требования к дренажу	Устройство дренажной канавы / лотка	Торф и ослабленные водонасыщенные грунты

Выбор параметров оборудования осуществляется исходя из массы груза, дальности транспортных операций, а также горно-геологических и природно-климатических условий песчаного и торфяного карьера, с обеспечением эффективной и безопасной работы на карьере [63].

При выборе машин необходимо руководствоваться [64]:

- основными назначениями тягового устройства и полуприцепа;
- способностью выбранного уступа обеспечивать выполнение технологической операции
- возможностью достигнуть максимальных показателей использования машин в конкретных технологических условиях.

При работе в условиях слабых и неустойчивых грунтов подбор парка машин должен включать не только экскаватор, но также автосамосвал и трактор с полуприцепом, поскольку эксплуатационная масса, ходовая часть и характеристики

контакта с основанием каждой из машин влияют на величину давления на грунт, осадки, проходимость и общую устойчивость рабочей зоны. В таких условиях выбор техники следует осуществлять с учётом несущей способности основания и способности машин перемещаться и работать безопасно, не вызывая чрезмерных деформаций грунта. Особое внимание при этом уделяется массе машины, типу и компоновке ходовой части или колёсной схемы, площади контакта с грунтом и соответствующему номинальному давлению на основание. Для экскаватора указанные параметры определяют его устойчивость при выемке и погрузке; для автосамосвала – безопасное расположение при погрузке и движение по слабым технологическим дорогам; для трактора – возможность эффективного выполнения работ по подготовке основания, буксировке и вспомогательных операций в условиях ограниченной несущей способности грунта. Рекомендуемые параметры гусеничной ходовой части экскаватора для работы в песчаных и торфяных грунтах приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Рекомендуемые параметры гусеничной ходовой части экскаватора для работы на песчаных и торфяных грунтах (составлено автором)

Тип грунта	Рекомендуемый тип гусеничной ходовой части	Ширина гусеницы, мм	Среднее давление на грунт, кПа	Область применения
Слабые и водонасыщенные пески	низкое давления на грунт (LGP)	1000–1200	Низкое	Слабые песчаные грунты
Торфяные и органогенные грунты	ультранизкое давления на грунт (ULGP)	1000–1500	Очень низкое	Торфяные грунты и заболоченные участки

При этом гидравлический экскаватор SANY SY135C (см. рисунок 8) рекомендуется для работы в данных условиях, поскольку его номинальное давление на грунт (NGP) составляет около 39 кПа при стандартной ширине гусеницы и снижается до примерно 19-20 кПа при использовании гусениц шириной 1200 мм, что делает его пригодным для эксплуатации на слабых и неустойчивых грунтах.

По условиям обеспечения проходимости колесных машин по поверхности песчаной и торфяной залежи, в зависимости от состояния основания и при неблагоприятных погодных условиях, в состав транспортного комплекса включается: автосамосвал или трактор с полуприцепом.

При разработке песчаного и торфяного месторождений применяется карьерный метод добычи сырья с его экскавацией и погрузкой в транспортные средства: самосвалы типа КАМАЗ 45141-011-50 (см. рисунок 10) или колесные тракторы типа BELARUS 1523.4 (см. рисунок 11) со сдвоенными колесами [14, 38].

Самосвал и трактор приспособлены для работы в различных климатических зонах и на разных видах грунтов, в том числе и с низкой несущей способностью; передний мост – ведущий. Шины для самосвала типоразмера 425/85 R21. Замена задних шин на 520/70R38 для увеличения пятна контакта со слабым грунтом. При сдваивании колес давление в шинах наружных колес должно быть в 1,20-1,25 раза ниже, чем во внутренних [45].

Статическая нагрузка, действующая вертикально вниз на сцепное устройство трактора от прицепного устройства полуприцепа (см. рисунок 12) и измеренная в точке сцепки с трактором, при расположении полуприцепа на горизонтальной жесткой поверхности и незагруженном кузове должна быть не менее 3% веса ненагруженного полуприцепа при опущенном кузове и не менее 500 Н в поднятом положении [29, 45].

Допустимая нагрузка на задний мост трактора составляет 60 кН [45, 86]. Длина дышла выбирается из условия обеспечения зазора между трактором и полуприцепом не менее 50 мм при повороте машин с минимальным заданным радиусом поворота. При сцепке трактора и полуприцепа длина дышла составляет 1,5 м в качестве рационального размера.

На основе полученных результатов могут быть сформулированы практические рекомендации по позиционированию гидравлического экскаватора на уступах карьера и его взаимодействию с самосвалом. Установлено, что рациональное

положение экскаватора относительно бровки уступа достигается при расстоянии между бровкой и ближайшей кромкой ходовой части экскаватора в пределах 0,75-1,75 м.

Показано также, что рациональное взаимное расположение экскаватора и самосвала в зоне погрузки обеспечивается при расстоянии между ними в диапазоне 1,00-2,25 м. Уменьшение данного расстояния может приводить к снижению безопасности при выполнении погрузочных операций, тогда как его увеличение вызывает рост траектории перемещения ковша и, как следствие, снижение производительности.

Кроме того, положение рабочего оборудования целесообразно поддерживать в диапазоне угла поворота 45° – 90° , поскольку именно в этом диапазоне обеспечиваются наиболее эффективные условия выемки и разгрузки. Рекомендуется также выполнение рабочего цикла с совмещением операций, что способствует сокращению продолжительности цикла и повышению общей эффективности работы экскаватора.

Для обеспечения эффективной разгрузки ковша гидравлического экскаватора в кузов самосвала рекомендуется располагать ковш на высоте 0,5-0,75 м выше борта кузова в момент выгрузки материала.

5.2 Рекомендации по применению сенсоров на экскаваторе

Для реализации алгоритма управления позиционированием гидравлического экскаватора требуется применение сенсоров с высоким уровнем точности, поскольку достоверность определения положения машины, рабочего оборудования и объектов в рабочей зоне напрямую влияет на безопасность и эффективность выполнения технологических операций.

В группе сенсоров восприятия лидар Slamtec Aurora S (рисунок 50) и многослойный сканер SICK LD-MRS (рисунок 51) совместно обеспечивают надежное

трёхмерное картирование окружающей среды и достоверное обнаружение препятствий.



Рисунок 50 – Slamtec Aurora S сенсор [103]



Рисунок 51 – Multi-layer SICK LD-MRS сенсор [144]

Их комбинированное использование позволяет повысить устойчивость системы восприятия к внешним воздействиям, компенсировать наклоны и вибрации машины, а также обеспечить безопасную работу даже в случае частичного отказа одного из сенсоров.

Микрокомпьютер Raspberry Pi 5 (рисунок 52), дополненный модулем Raspberry Pi AI NAT+ 2, продемонстрировал достаточную производительность для обработки в реальном времени потоков данных от лидаров, датчиков расстояния и видеосистем в полевых условиях. Использование стандартной программной системы и аппаратного ускорения вычислений ИИ обеспечивает реализацию бортовых алгоритмов обнаружения объектов, интерпретации сцены и диагностирования, при сохранении возможности передачи обобщённых показателей на системы управления более

высокого уровня. Таким образом, данная вычислительная платформа может рассматриваться как достаточное и гибкое решение для интеграции функций расширенного управления и мониторинга в горных машинах.

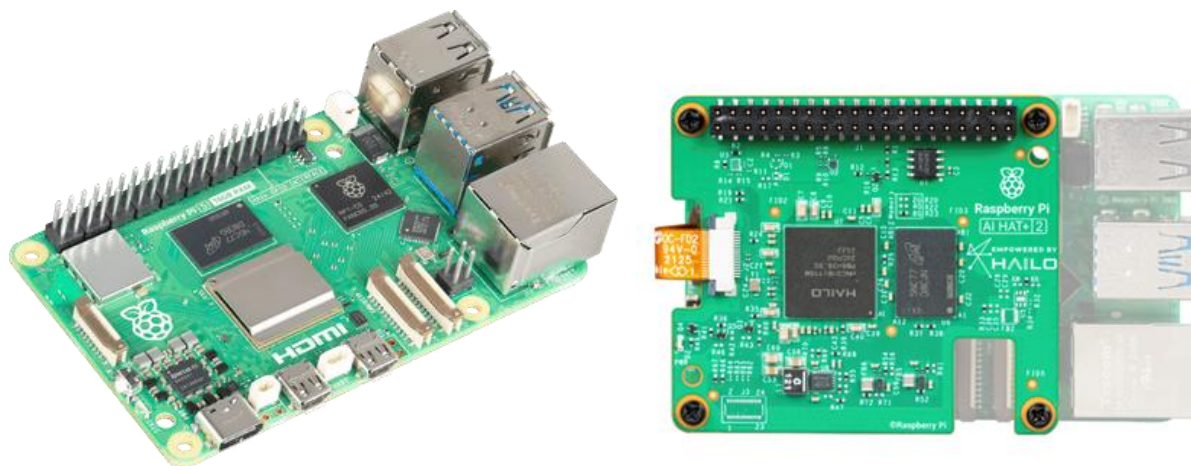


Рисунок 52 – Микрокомпьютер Raspberry Pi 5 [174] и модуль Raspberry Pi AI HAT+ 2 [175]

В дополнение к локальным измерениям на рабочем оборудовании, многослойный лазерный сканер SICK LD-MRS может быть установлен в нижней части рамы экскаватора для контроля просадки машины относительно поверхности грунта. В такой конфигурации сканер формирует набор лазерных лучей, направленных на грунт и окружающие объекты, обеспечивая непрерывный профиль поверхности под ходовой частью и в её окрестности. Анализ изменений измеряемых расстояний во времени позволяет выявлять локальную осадку гусениц, снижение несущей способности грунта, а также образование опасных углублений и пустот, что является критически важным для обеспечения устойчивости машины и предотвращения чрезмерной просадки на слабых и водонасыщенных основаниях.

Размещение многослойного сканера в нижней части экскаватора также позволяет оценивать микрорельеф, сформированный предыдущими проходами машины и работой другого оборудования. Полученная информация может использоваться для корректировки действий оператора или алгоритмов автоматического управления, например, путём ограничения работы в зонах с

повышенной просадкой, перераспределения нагрузок или планирования предварительного укрепления грунта. Таким образом, совместное использование высокоточных датчиков расстояния на рабочем оборудовании и сканера SICK LD-MRS у основания машины обеспечивает более полное представление как о кинематике рабочего органа, так и о состоянии опорной поверхности, повышая безопасность и надёжность эксплуатации в сложных грунтовых условиях.

Применение камер с разрешением 4K Cinflex Pro 516 [128], оснащённых системой защиты от осадков (Rain Deflector), обеспечивает стабильное получение визуальной информации при наличии осадков и высокой запылённости рабочей зоны.

При подключении такой камеры к микрокомпьютеру Raspberry Pi 5 через высокоскоростные интерфейсы MIPI CSI встроенный процессор обработки изображений, и достаточная вычислительная производительность обеспечивают захват, сжатие и анализ видеопотока в формате 4K в реальном времени как для отображения оператору, так и для задач машинного зрения.

Такая интеграция повышает надёжность визуального контроля при сохранении совместимости с современными алгоритмами распознавания, реализуемыми непосредственно на бортовом оборудовании экскаватора.

5.3 Выводы по главе 5

1. При выемке песчаных и торфяных месторождений установлена целесообразность применения однозабойной схемы разработки с высотой уступа не более 5 м. Показано, что соблюдение указанных параметров и назначение угла откоса в пределах 38–53 ° способствуют обеспечению устойчивости массива и безопасных условий работы экскаватора и транспортного оборудования. Для водонасыщенных и слабых грунтов дополнительным обязательным условием является устройство дренажа.

2. Проведенный анализ комплектации парка выемочно-транспортным оборудованием при карьерной добыче торфяного сырья показал возможность

использования, в качестве выемочного оборудования серийный экскаватор, модели SY135C на широких гусеницах и, в качестве транспортного оборудования, трактор BELARUS-1523.4 с полуприцепом на сдвоенном колесном ходу.

3. Установлено, что рациональная работа комплекта экскаватор–самосвал обеспечивается при расстоянии 0,75–1,75 м от бровки уступа до экскаватора и 1,0–2,25 м между экскаватором и самосвалом. Дополнительно эффективные условия достигаются при угле поворота рабочего оборудования 45–90 ° и разгрузке ковша на 0,5–0,75 м выше борта кузова.

4. Эффективная работа алгоритма управления позиционированием гидравлического экскаватора возможна при использовании высокоточных сенсоров, обеспечивающих необходимую точность измерения параметров положения машины и окружающей среды.

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 является 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 работ на торфяном месторождении «Ларьянское» по внедрению системы контроля осадки ходовой части экскаватора на слабом грунте и увеличению устойчивости экскаватора (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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдохин, А. Н. Экологический риск разработки песчаного карьера в русле реки / А. Н. Алдохин, Е. В. Башлакова, И. А. Холодова // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. — 2018. — № 2. — С. 48–58.
2. Алиев, М. М. Нелинейный вариант критерия Кулона–Мора / М. М. Алиев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2015. — № 2 (37). — С. 31-39.
3. Амарян, Л. С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. – М. : Недра, 1969. – 192 с.
4. Амарян, Л. С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. – М. : Недра, 1990. – 220 с.
5. Амарян, Л. С. Физико-механические свойства торфяных залежей и их определение при инженерных изысканиях / Л. С. Амарян, Е. Т. Базин, Ю. Н. Женихов, Н. Т. Король. – М.: Торфогеология, 1983. – 139 с.
6. Андреева, Л. И. Оценка ремонтной технологичности одноковшовых экскаваторов отечественного производства // Горное оборудование и электро-механика. 2024. № 3(173). – С. 63-70. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-3-63-70.
7. Арктиктранс. Бел 91 24.0/50 22,5 4-х слойная 1150×620 22,5" [Электронный ресурс]. URL: <https://arctic-trans.ru/catalog/bel-91-24050-225-4-hsloynaya-1150x620-225> (дата обращения: 21.04.2026). – Текст : электронный.
8. Базин, Е. Т. Технический анализ торфа / Е. Т. Базин, В. Д. Копенкин, В. И. Косов и др.; под ред. Е. Т. Базина. – М.: Недра, 1992. – 431 с.
9. Беларусь. Технические характеристики [Электронный ресурс]. URL:<http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-1220-1/belarus-1220-4/> (дата обращения: 12.01.2022). – Текст : электронный.
10. Буянов, Ю. Д. Направления технико-технологического перевооружения открытых горных работ в промышленности строительных материалов / Ю. Д. Буянов, Г. Р. Буткевич, М. И. Лопатников // Горный журнал. – 2009. – № 11. – С. 83-85.

11. **Бугебрин, Ш.** Анализ интеграции элементов системы искусственного интеллекта в гидравлический экскаватор / **Ш. Бугебрин, Ю. А. Казаков** // 83-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» : сборник тезисов конференции, Магнитогорск, 21-25 апреля 2025 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2025. – Т. 1. – С. 55.

12. **Бугебрин, Ш.** Анализ контроля движений рабочего органа экскаватора / **Ш. Бугебрин, Ю. А. Казаков** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 27-30.

13. **Бугебрин, Ш.** Анализ необходимости рационального позиционирования экскаватора / **Ш. Бугебрин, Д. А. Шибанов, А. В. Михайлов** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 30-32.

14. **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.

15. **Бугебрин, Ш.** Контроль осадки грунта под экскаватором / **Ш. Бугебрин, Ю. А. Казаков** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской

горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 32-34.

16. **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.

17. **Бугебрин, Ш.** Рациональное расположение датчиков контроля позиционирования гидравлического экскаватора в условиях эксплуатации на слабых грунтах / **Ш. Бугебрин**, Ю. А. Казаков // 83-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» : сборник тезисов конференции, Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2025. – Т.1. - С. 54.

18. Васильев, М. В. Автомобильный транспорт карьеров / М. В. Васильев, З. Л. Сироткин, В. П. Смирнов. – М.: Недра, 1973. – 280 с.

19. В 2024 году добыча торфа в России сократилась впервые за последние пять лет / MarketProGroup. — 2025. URL: https://marketprogroup.ru/news/peat_russia_2025/ (дата обращения: 12.03.2026).

20. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973. – 199 с.

21. Великанов, В. С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 29–36. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.

22. Волчек, А. А. Экологическое обоснование добычи нерудных строительных материалов из русел рек (на примере р. Припять) / А. А. Волчек, Д. В. Новик, Н. А. Якушко // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2022. — № 1. – С. 115–129.

23. Гавришев, С. Е. Обоснование параметров откосов бортов с учетом реконструкции карьера Светлинского золоторудного месторождения / С. Е. Гавришев, В. Ю. Заляднов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 3. – С.141-152. DOI 10.46689/2218-5194-2021-3-1-135-146.

24. Горелов, В. А. Методика анализа на прочность ходовых систем гусеничных тракторов с использованием многомассовых динамических и конечно-элементных моделей / В. А. Горелов, А. И. Комиссаров, Д. С. Вдовин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 4. – С. 63-70.

25. Горлов, И. В. Влияние пнистости залежи на безотказность торфяных машин / И. В. Горлов, М. Г. Рахутин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017.– № 12. – С. 139-145. DOI 10.25018/0236-1493-2017-12-0-139-145.

26. Григорьевич, М. Б. Минеральное сырьё для промышленности строительных материалов и его оценка при геологоразведочных работах / М. Б. Григорьевич, М. Г. Немировская. – Л.: Недра, 1974. – 271 с.

27. ГОСТ 8736–2014. Песок для строительных работ. Технические условия. — Введ. 2015–04–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 11 с.

28. ГОСТ 10650 72. Торф. Метод определения степени разложения. Межгосударственный стандарт. М.: Издательство стандартов, 1999. –8 с.

29. ГОСТ 10000-2017. Прицепы и полуприцепы тракторные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018. – 10 с.

30. ГОСТ 12105–74. Тягачи седельные и полуприцепы. Присоединительные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 10 с.

31. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. — Введ. 2021–01–01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 42 с.

32. ГОСТ 27535–87. Экскаваторы одноковшовые гидравлические. Классификация и основные параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 12 с.

33. ГОСТ 30067-93. Экскаваторы одноковшовые универсальные полноповоротные. Общие технические условия. — Минск; М.: Изд-во стандартов, 1995. — 27 с.
34. ГОСТ ISO 7132–2017. Машины землеройные. Самосвалы. Терминология и торговые спецификации. — Введ. 2019–06–01. — М.: Стандартиформ, 2018. — 32 с.
35. ГОСТ ISO 16754–2013. Машины землеройные. Определение среднего значения давления на грунт машин на гусеничном ходу. — 13 с.
36. ГОСТ Р 58656–2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. — Введ. 2020–08–01. — М.: Стандартиформ, 2020. — 24 с.
37. Гурко, А. Г. Математическая модель манипулятора экскаватора с обратной лопатой / А. Г. Гурко // Вестник ХНАДУ. — 2011. — Вып. 55. — С. 79–89.
38. Гурко, А. Г. Моделирование кинематики экскаватора в MATLAB Robotics Toolbox / А. Г. Гурко, И. А. Колобова // Вестник ХНАДУ. — 2013. — Вып. 60. — С. 59–65.
39. Дубинкин, Д. М. Влияние горнотехнических факторов на производительность беспилотных карьерных автосамосвалов / Д. М. Дубинкин, В. В. Аксенов, М. А. Тюленев, С. О. Марков // Техника и технология горного дела. — 2020. — № 4 (11). — С. 42–69.
40. Ерёмин, Н. И. Неметаллические полезные ископаемые: учеб. пособие / Н. И. Ерёмин. — М.: МГУ, 2007. — 459 с.
41. Жариков, С. Н. Совершенствование расчета производительности карьерного экскаватора // Записки Горного института. — 2018. — Т. 229. — С. 56–61. DOI: 10.25515/pti.2018.1.56.
42. Захаров, А. Ю. Основы расчета карьерного транспорта : учеб. пособие / А. Ю. Захаров; КузГТУ. — Кемерово, 2024. — 110 с.
43. Захаров М. С. Статическое зондирование в инженерных изысканиях / М. С. Захаров. — СПб., СПбГАСУ. — 2007. — 72 с.

44. Ильин, С. А. Открытый способ разработки месторождений: возможности и пути совершенствования / С. А. Ильин, В. С. Коваленко, Д. В. Пастихин // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 37-40.

45. Казаков, Ю. А. Обоснование и выбор параметров полуприцепа в составе горнотранспортного агрегата многократной проходимости по слабым грунтам: дис. ... канд. техн. наук : 05.05. – Санкт-Петербург, 2022. –142 с.

46. Кантемиров, В. Д. Методика планирования экскаваторных работ в карьере на основе компьютерного моделирования / В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев, Р. С. Титов, А. В. Тимохин // Горная промышленность. — 2023. — № 6. — С. 75–80. — DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-75-80.

47. Квитка, В. В. Способ оптимальной отработки контактной зоны руда - порода / В. В. Квитка, С. И. Фомин, П. Б. Кава // Записки Горного института. – 2012. – Т. 197. – С. 165-168.

48. Ковров, А. С. Устойчивость бортов карьеров в сложноструктурном массиве мягких пород / А. С. Ковров. — Днепропетровск: НГУ, 2013. – 131 с.

49. Корчунов, С. С. Исследование физико-механических свойств торфа: Труды ВНИИТП. – М.: Госэнергоиздат, 1953, № 12. – 232 с.

50. Корякин, А. Е. Промышленные типы месторождений неметаллических полезных ископаемых / А. Е. Корякин, П. А. Страна, Б. Н. Шаронов [и др.]. – М.: Недра, 1985. – 286 с.

51. Крамаренко, В. В. Классифицирование торфов по чувствительности к механическим техногенным воздействиям / В. В. Крамаренко, В. Ю. Молоков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — Т. 335, № 12. – С. 231–243.

52. Кремчеев, Э. А. Принципы построения транспортного модуля торфяного предприятия с карьерной технологией добычи / Э. А. Кремчеев, А. В. Михайлов, Д. О. Нагорнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 7. – С. 75–81.

53. Кувшинкин, С. Ю. Эксплуатация карьерного оборудования. Изучение конструкции и правил эксплуатации карьерного экскаватора: метод. указания / С. Ю. Кувшинкин, П. В. Иванова, Д. А. Шибанов. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. — 43 с.

54. Кудрявцев, Е. М. Определение производительности одноковшового экскаватора с оборудованием обратная лопата / Е. М. Кудрявцев, Д. Ю. Густов // Вестник МГСУ. — 2010. — № 4. — С. 101–107.

55. Курганов, В. М. Оценка эксплуатационной надежности карьерного экскаваторно-автомобильного комплекса / В. М. Курганов, М. В. Курганов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 143–153.

56. Лагунова, Ю. А. Разработка методики определения параметров универсального экскаватора / Ю. А. Маслеников, А. П. Комиссаров, Ю. А. Лагунова, В. С. Шестаков // Горное оборудование и электромеханика. — 2025. — № 6(182). — С. 10-15. DOI 10.26730/1816-4528-2025-6-10-15.

57. Литвин, О. И. Анализ методик расчета производительности карьерных гидравлических экскаваторов / О. И. Литвин, А. А. Хорешок, Д. М. Дубинкин [и др.] // Горная промышленность. — 2022. — № 5. — С. 112–120. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-112-120.

58. Лысенко, М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1980. — 272 с.

59. Малафеев, С. И. Информационные и управляющие компоненты электрических карьерных экскаваторов / С. И. Малафеев, С. С. Малафеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4. — С. 33–45. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.

60. Маслов, Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. — М.: Высшая школа, 1968. — 544 с.

61. Машины для производства земляных работ. Технические характеристики. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ПКТИпромстрой, 1996. — 220 с.

62. Михайлов, А. В. Методология оценки многократной проходимости горнотранспортного агрегата по слабым грунтам / А. В. Михайлов, Ю. А. Казаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 8. — С. 95–110. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_95.

63. Михайлов, А. В., Анализ парка машин при карьерной добыче торфа / А. В. Михайлов, Ю. А. Казаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 7 (спец. выпуск 20). — С. 3-14. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-7-20-3-14.

64. Михайлов, А. В. Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний / А. В. Михайлов, С. Л. Иванов, В. В. Габов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2015. №14. — С. 82-91.

65. 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.

66. Перчаткин, Ю. В. Пути совершенствования прицепного состава к колесным тракторам / Ю. В. Перчаткин // Транспорт Урала. 2013. № 2. — С. 82–86.

67. Перчаткин, Ю. В. Формирование и обеспечение технико-эксплуатационных свойств прицепного состава тракторного транспорта : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Ю. В. Перчаткин. — Уфа, 2015. — 410 с.

68. Плохов, И. В. Основы теории планирования эксперимента и ее приложения в электроприводе. — СПб: СПбГТУ, 2003. — 126 с.

69. Подболотов, С. В. Возможности увеличения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов на открытых горных работах/ С.В. Подболотов, А. Д. Кольга // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 6. — С. 92–97. DOI:10.30987/article_5ac49dc82bfc10.79665416.

70. Подэрни, Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: учебник / Р. Ю. Подэрни. – М.: Московский государственный горный университет, 2007. – 666 с.
71. Полуприцеп тракторный самосвальный ПСТ-7-1Б. URL: https://bobruiskagromach.com/catalog/tractor_trailers/pst_7/ (дата обращения: 13.03.2026).
72. Пьянков, С. А. Механика грунтов : учеб. пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. – 195 с.
73. Ракишев, Б. Р. Технологические комплексы открытых горных работ: учебник / Б. Р. Ракишев. – Алматы, 2015. – 285 с.
74. Разработка карьера для добычи песка URL: <https://www.alternativa-sar.ru/article/35-razrabotka-karera-dlya-dobychi-peska/> (дата доступа 06.02.2026).
75. Репин, С. В. Метод повышения надежности строительной техники при эксплуатации на севере Российской Федерации / С. В. Репин, А. В. Зазыкин, С. Е. Максимов, Г. Н. Белик // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2025. — № 12. — С. 409–415. — DOI: 10.24412/2071-6168-2025-12-409-410.
76. Ржевский, В. В. Процессы открытых горных работ. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1978. – 544 с.
77. Романович, И. Ф. Месторождения неметаллических полезных ископаемых : учеб. пособие для вузов. – М.: Недра, 1986. – 366 с.
78. Самосвал КАМАЗ 45141-011-50 : технические характеристики // КАМАЗ-Волга : официальный дилер. – URL: <http://www.kamaz-volga.ru/cars/tip-trucks/185219/> (дата обращения: 02.05.2026).
79. Самсонов, Л. Н. Торфяные машины и комплексы. Часть I. Взаимодействие ходовых устройств с торфяной залежью : учебник для вузов / Л. Н. Самсонов, В. Ф. Сеницын. — Тверь: ТГТУ, 1995. – 144 с.
80. 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.

81. 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.

82. 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.

83. SANY. Малый экскаватор SY135C [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sanyglobal.com/ru/product/excavator/small_excavator/111/315/ (дата обращения: 20.04.2026). – Текст : электронный.

84. Силкин, А. М. Влияние свойств грунтов на проходимость машин / А. М. Силкин, В. Я. Жарницкий, А. В. Савельев // Природообустройство. – 2014. - № 1. – С. 41–44.

85. Стенин, Ю. В. Методика расчета производительности экскаваторно-автомобильных комплексов / Ю. В. Стенин, В. В. Макаров, Д. С. Панфилов // Вестник Уральского государственного горного университета. - 2005. - № 21. – С. 60–64.

86. Тер-Мартirosян, З. Г. Механика грунтов. – М.: АСВ, 2009. – 552 с.
87. Тракторы: теория / Под общ. ред. В.В. Гуськова – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
88. Трубецкой, К. Н. Открытые горные работы: справочник / К. Н. Трубецкой, М. Г. Потапов, К. Е. Веницкий, Н. Н. Мельников. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.
89. Фомин, С. И. Определение производительности горнотехнической системы экскаватор - мобильный агрегат переработки песчано-гравийной смеси / С. И. Фомин, Н. С. Лапшин // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 1(103). – С. 60-63.
90. Хазин, М. Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых / М. Л. Хазин // Разработка полезных ископаемых. — 2020. — № 1 (18). – С. 72–74. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15.
91. Характеристики карьерного песка / Такси Песок. — URL: <https://taxi-pesok.ru/stati/harakteristiki-karernogo-peska> (дата обращения: 12.03.2026). – Текст : электронный.
92. Цытович, Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строит. вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1983. – 288 с.
93. Черпегов, Ю. А. Выбор мощности карьерного оборудования. – М.: Недра, 1972. – 208 с.
94. Шешко, Е. Е. Эксплуатация и ремонт оборудования транспортных комплексов карьеров. — М.: МГГУ, 1996. – 424 с.
95. Шпанский, О. В. Моделирование рабочей зоны карьера при переменном направлении понижения горных работ / О. В. Шпанский, Д. Н. Лигоцкий, И. А. Ишкулова, К. С. Арзуманян // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2005. – № 2. – С. 11-15.
96. Штейнцап, Р. М. Методика определения параметров и показателей эффективности применения карьерных гидравлических экскаваторов / Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. — М., 1980. – 49 с.

97. Янсон, Р. А. Экскаваторы одноковшовые полноповоротные : учебное пособие / Р. А. Янсон, Р. В. Саськов. – М.: Издательство АСВ, 2014. – 352 с.
98. Abramson, LW, Lee TS, Sharma S, Boyce GM. Slope stability and stabilization methods. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2002. 736 p.
99. Akhavian, R.; Behzadan, A.H. Evaluation of queuing systems for knowledge-based simulation of construction processes. Automation in Construction. 2014;47:37-49. DOI:10.1016/j.autcon.2014.07.007.
100. Alkass, S.; El-Moslmani, K.; AlHusseini, M. A computer model for selecting equipment for earthmoving operations using queuing theory. Cib Report. 2003. p. 1-8.
101. Altiti, AH.; Alrawashdeh, RO; Alnawafleh, HM. Open pit mining. In: Soni A, editor. Mining techniques: past, present and future. London: IntechOpen; 2021. 7 p. DOI:10.5772/intechopen.92208.
102. Asada, H.; Slotine, JJ. Robot analysis and control. New York: Wiley; 1986. 288 p.
103. Aurora, S. Fully integrated AI spatial perception system // SLAMTEC: [сайт]. URL: <https://www.slamtec.com/en/aurora-s> (дата обращения: 06.04.2026). – Текст : электронный.
104. Awolusi, IG.; Marks, ED.; Pradhananga, N.; Cheng, T. Hazardous proximity zone design for heavy construction equipment. In: Proceedings of the 5th International/11th Construction Specialty Conference (ICSC); 2015; Vancouver, BC, Canada. Montreal: Canadian Society for Civil Engineering; 2015. p. 1-10.
105. Bazaluk, O.; Anisimov, O.; Saik, P.; Lozynskyi, V.; Akimov, O.; Hrytsenko, L. Determining the safe distance for mining equipment operation when forming an internal dump in a deep open pit. Sustainability. 2023;15(7):5912. doi:10.3390/su15075912.
106. Bekker, MG. Introduction to terrain-vehicle systems. Ann Arbor (MI): University of Michigan Press; 1969. 846 p.
107. Bishop, AW. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique. 1955;5(1):7-17. doi:10.1680/geot.1955.5.1.7.

108. Boussinesq, JV. Applications des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Paris: Gauthier-Villars; 1885. p. 104–107.
109. Boggs, S Jr. Petrology of sedimentary rocks. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2009. 607 p.
110. Bowles, JE. Foundation analysis and design. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 1997. 1024 p.
111. Burt, CN.; Caccetta, L. Equipment Selection for Surface Mining: A Review. Interfaces. 2014;44(2):143–62. DOI: 10.1287/inte.2013.0732.
112. Caterpillar Performance Handbook [Electronic resource]. - Peoria, Illinois, U.S.A. : Caterpillar, 2022. 588 p. URL: https://www.ringpower.com/media/oujnpuga/caterpillarperfhandbook_ed50.pdf (accessed: 09.03.2026). – Текст : электронный.
113. Das, BM. Principles of Geotechnical Engineering. 7th ed. Stamford: Cengage Learning; 2010. 683 p.
114. Debbouz, M.; Aoulmi, Z.; Fehdi, C.; Attia, M. Sustainable Transportation Planning for Djebel Onk's Open-Pit Phosphate Mine in Algeria: Using Queuing Theory and Cost-Emission Analysis. Int J Sustain Dev Plan. 2024;19(5). DOI: 10.18280/ijstdp.190504.
115. Demirel, N.; Taghizadeh, H. Optimization of the excavator and dump truck complex at open pit mines. Miner Resour Manag. 2017;33(1):113–30.
116. Distance Measuring Sensors GP2Y0A02YK0F Datasheet // Sharp Corporation : [сайт]. – URL: https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a02yk_e.pdf (дата обращения: 12.05.2026). – Текст : электронный.
117. Dong, HQ.; Gam, NT.; Cuong, HM; Tuan, LA. Fractional-order fast terminal back-stepping sliding mode control of autonomous robotic excavators. Journal of the Franklin Institute. 2024;361(6):106686. doi:10.1016/j.jfranklin.2024.106686.
118. Denavit, J.; Hartenberg, RS. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. ASME J Appl Mech. 1955;77:215–21.

119. Duncan, JM.; Wright, SG.; Brandon, TL. Soil Strength and Slope Stability. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2014. 336 p.
120. Elijah, K.; Joseph, G.; Samuel, M.; Mauti, D. Optimisation of shovel-truck haulage system in an open pit using queuing approach. Arab J Geosci. 2021;14(11):973. DOI: 10.1007/s12517-021-07365-z.
121. Environmental Criticality of Raw Materials / Umweltbundesamt (UBA). — Dessau-Roßlau : UBA, 2020. 254 p. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/environmental-criticality-of-raw-materials> (дата обращения: 12.03.2026). — Текст : электронный.
122. Frýba, L. History of Winkler foundation. Vehicle System Dynamics. 1995;24(S1):7–12. DOI:10.1080/00423119508969611.
123. Farrell, ER. Organics/peat soils. In: ICE Manual of Geotechnical Engineering. 2nd ed. Vol. I. 2023. p. 499–516. DOI: 10.1680/icemge.66816.0499.
124. Global Industrial Silica Sand: Market Size / Freedonia Group. — Cleveland Freedonia Group, 2018. — 31 p. — URL: <https://www.freedoniagroup.com/industry-study/global-industrial-silica-sand-3664.htm> (дата обращения: 12.03.2026). — Текст : электронный.
125. Guan, T.; He, Z.; Song, R.; Manocha, D.; Zhang, L. TNS: terrain traversability mapping and navigation system for autonomous excavators. In: Proceedings of Robotics: Science and Systems XVIII; 2022; New York, NY, USA. DOI:10.15607/RSS.2022.XVIII.049.
126. Goodin, S. Sand and Gravel (Industrial). In: U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2024. p. 144–5. DOI: 10.3133/mcs2024.
127. Read, J.; Stacey, P. editors. Guidelines for Open Pit Slope Design. Collingwood: CSIRO Publishing; 2009. 512 p. DOI: 10.1071/9780643101104.
128. Gyro-Stabilized Systems. Cineflex Pro 516 Gimbal [Электронный ресурс]. — URL: <https://gyrostabilizedsystems.com/broadcast-cineflex-pro-516-gimbal> (дата обращения: 06.04.2026). — Текст : электронный.

129. Halpin, DW.; Riggs, LS. Planning and Analysis of Construction Operations. New York: Wiley-Interscience; 1992. 416 p.
130. Haviland, J.; Corke, P. Manipulator Differential Kinematics: Part I: Kinematics, Velocity, and Applications. *IEEE Robot Autom Mag.* 2023;31(4):149–58. DOI: 10.1109/mra.2023.3270228.
131. Hinze, J.; Huang, X.; Terry, L. The nature of struck-by accidents. *J Constr Eng Manag.* 2005;131(2):262–8. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:2(262).
132. Hinze, JW.; Teizer, J. Visibility-related fatalities related to construction equipment. *Saf Sci.* 2011;49(5):709–18. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.01.007.
133. Huang, Y.; Hammad, A.; Zhu, Z. Providing proximity alerts to workers on construction sites using Bluetooth Low Energy RTLS. *Autom Constr.* 2021;132:103928. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103928.
134. Hustrulid, W.; Kuchta, M.; Martin, R. Open Pit Mine Planning and Design. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2013. 1308 p.
135. ISO 10567:2007. Earth-moving machinery — Hydraulic excavators — Lift capacity. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2007. 16 p.
136. ISO 16754:2008. Earth-moving machinery — Determination of average ground contact pressure for crawler machines. Geneva: International Organization for Standardization, 2008. 8 p.
137. Janbu, N.; Bjerrum, L.; Kjærnsli, B. Veiledning ved løsning av fundamenteringsoppgaver. Oslo: Norges geotekniske institutt; 1956. 92 p.
138. Jovanović, VD.; Janošević, D.; Marinković, D.; Petrović, N.; Djokić, R. Analysis of Influential Parameters in the Dynamic Loading and Stability of the Swing Drive in Hydraulic Excavators. *Machines.* 2024;12(10):737. DOI: 10.3390/machines12100737.
139. Jovanović, V.; Janošević, D.; Petrović, N. Analysis of Slewing Bearing Load of a Rotating Platform Drive in Hydraulic Excavators. *Teh Vjesn.* 2014;21(2):263–70.

140. Lamprea-Pineda, AC.; Connolly, DP.; Hussein, MFM. Beams on elastic foundations: A review of railway applications and solutions. *Transportation Geotechnics*. 2021;33:100696. doi:10.1016/j.trgeo.2021.100696.
141. Lee, M.; Choi, H.; Kim, C.; Moon, J.; Kim, D.; Lee, D. Precision motion control of robotized industrial hydraulic excavators via data-driven model inversion. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022;7(2):1912–1919. doi:10.1109/LRA.2022.3142389.
142. Kaufman, WW.; Ault, JC. *Design of Surface Mine Haulage Roads: A Manual*. Washington, DC: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines; 1977. 49 p.
143. Koivo, AJ.; Ramos, MC.; Thoma, M. Dynamic model for excavators (and backhoes). *IFAC Proc Vol*. 1994;27(14):763–8. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)47394-0.
144. LD-MRS. 3D LiDAR sensor with multilayer technology [Электронный ресурс] // SICK : [сайт]. URL: <https://www.sick.com/es/en/catalog/products/lidar-and-radar-sensors/lidar-sensors/ld-mrs/c/g91913> (дата обращения: 06.04.2026).
145. Li, J.; Li, Y.; Sun, H.; Yang, X.; Cui, Q. Analysis of Effect of Grouser Height on Tractive Performance of Tracked Vehicle under Different Moisture Contents in Paddy Soil. *Agriculture*. 2022;12(10):1581. DOI: 10.3390/agriculture12101581.
146. Li, Z. A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining. *Min Sci Technol*. 1990;10(3):337–40. DOI: 10.1016/0167-9031(90)90543-2.
147. Lorig, L.; Stacey, P.; Read, J. Slope design methods. In: *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Collingwood: CSIRO Publishing; 2009. p. 237–63.
148. Marusiak, M.; Neruda, J. Dynamic Soil Pressures Caused by Travelling Forest Machines. *Croat J For Eng*. 2018;39(2):233–45.
149. McCann, M. Heavy equipment and truck-related deaths on excavation work sites. *J Saf Res*. 2006;37(5):511–7. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.08.005.
150. Mehta, PK.; Monteiro, PJM. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2014. 684 p.

151. Mesri, G.; Ajlouni, M. Engineering properties of fibrous peats. *J Geotech Geoenviron Eng.* 2007;133(7):850–66. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:7(850).
152. Mesri, G.; Huvaj, N. Shear Strength Mobilized in Undrained Failure of Soft Clay and Silt Deposits. In: *Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior.* 2007. p. 1–22. DOI: 10.1061/40917(236)1.
153. Meyerhof, GG. The ultimate bearing capacity of foundations on slopes. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 1957. Vol. 3. p. 384–6.
154. Mikhailov, A.; Kim, A.; Prodous, O. Peatland restoration after open pit mining. In: *Land reclamation in ecological fragile areas.* October 20–23, 2017, Beijing, PR China. Boca Raton: CRC Press; 2017. 6 p. DOI: 10.1201/9781315166582-58.
155. 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. - Volume 39, Issue 6. – PP. 1414-1421. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.10.
156. 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.
157. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2024. Reston (VA): U.S. Geological Survey; 2024. 212 p. doi:10.3133/mcs2024.
158. Mirzaei-Nasirabad, H.; Mohtasham, M.; Omidbad, M. Comparison of the various dispatching strategies for truck-shovel productivity optimization in open pit mines. *International Journal of Mining and Geo-Engineering.* 2019;53(2):193–202. doi:10.22059/IJMGE.2018.255973.594731.
159. Molaei, A.; Kolu, A.; Lahtinen, K.; Geimer, M. Automatic estimation of excavator actual and relative cycle times in loading operations. *Automation in Construction.* 2023;156:105080. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105080.

160. Morgenstern, NR.; Price, VE. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*. 1965;15(1):79–93. doi:10.1680/geot.1965.15.1.79.
161. Morley, D.; Joseph, T.; Lu, M. In search of the ideal truck-excavator combination. In: *Proceedings of the 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining*; 2013; Montréal, Canada. p. 417–425.
162. Nel, S.; Kizil, MS.; Knights, P. Improving truck-shovel matching. In: *Proceedings of the 35th APCOM Symposium*; 2011; Wollongong, NSW, Australia. p. 381–391.
163. Niskanen, I.; Immonen, M.; Makkonen, T.; Hallman, L.; Mikkonen, M.; Keränen, P.; Kostamovaara, J.; Heikkilä, R. Trench visualisation from a semiautonomous excavator with a base grid map using a TOF 2D profilometer. *Journal of Visualization*. 2023;26(4):889–898. doi:10.1007/s12650-023-00908-4.
164. Niskanen, I.; Duan, G.; Kolli, T.; Immonen, M.; Makkonen, T.; Keränen, P.; Kostamovaara, J.; Heikkilä, R. Volume measurement of soil in excavator buckets by solid-state 3D LiDAR. *Construction Robotics*. 2025;9:21. DOI:10.1007/s41693-025-00166-w.
165. Non-Metallic Minerals: Building the Case for Specific Legal Frameworks : draft for consultation 2025. URL: <https://www.igfmining.org/wp-content/uploads/2025/10/igf-non-metallic-mining-legal-frameworks-draft-10-2025.pdf> (дата обращения: 12.03.2026).
166. Padmalal, D.; Maya, K. *Sand mining: environmental impacts and selected case studies*. Dordrecht: Springer; 2014. 162 p.
167. Park, J.; Marks, E.; Cho, YK.; Suryanto, W. Performance test of wireless technologies for personnel and equipment proximity sensing in work zones. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2016;142(1):04015049. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001031.
168. Park, S. Integrating task component design in excavator–truck operation planning to improve earthwork automation systems. *Applied Sciences*. 2024;14(14):6052. doi:10.3390/app14146052.

169. Rasul, A.; Seo, J.; Khajepour, A. Development of integrative methodologies for effective excavation progress monitoring. *Sensors*. 2021;21(2):364. DOI:10.3390/s21020364.
170. Peduzzi, P. Sand, rarer than one thinks. *Environmental Development*. 2014;11:208–218. DOI:10.1016/j.envdev.2014.04.001.
171. Peurifoy, RL.; Schexnayder, CJ.; Shapira, A.; Schmitt, R. Construction planning, equipment, and methods. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2018. 830 p.
172. Peurifoy, RL.; Schexnayder, CJ.; Shapira, A.; Schmitt, RL. Construction planning, equipment, and methods. 8th ed. New York: McGraw-Hill; 2010. 768 p.
173. Rafi, YF.; Witjaksana, B. Productivity analysis of excavator and dump truck heavy equipment on digging and loading works flood control Afvoer Watudakon Mojokerto. *Jurnal Teknik Sipil*. 2023;23(2):205–210. DOI:10.26418/jtst.v23i2.61025.
174. Raspberry Pi 5. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/> (дата обращения: 06.04.2026).
175. Raspberry Pi AI HAT+ 2 [Электронный ресурс] // Raspberry Pi URL: <https://www.raspberrypi.com/products/ai-hat-plus-2/> (дата обращения: 06.04.2026).
176. Rauf, O.; Ning, Y.; Chen, M.; Ma, H. Evaluation of ground pressure, bearing capacity, and sinkage in rigid-flexible tracked vehicles on characterized terrain in laboratory conditions. *Sensors*. 2024;24(6):1779. DOI:10.3390/s24061779.
177. Ray, SJ.; Teizer, J. Dynamic blindspots measurement for construction equipment operators. *Safety Science*. 2016;85:139–151. DOI:10.1016/j.ssci.2016.01.011.
178. Reichl, C. M.; Schatz, G. Zsak. World Mining Data 2024 Vienna, Federal Ministry, 2024. URL: <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD%202024.pdf> (дата обращения: 12.03.2026).
179. Ritchie, AM. Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*. 1963;17:13–28.

180. Rudenko, A. Loading and haulage equipment selection for optimum production in a granite quarry. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing; 2018. 72 p.
181. Rydin, H.; Jeglum, JK. The biology of peatlands. Oxford: Oxford University Press; 2006. 343 p.
182. Saarilahti, M. Maastoliikkuvuuden perusteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja. 1991;390:99 p.
183. Saarilahti, M. Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact: survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors. Soil interaction model. Appendix report. 2002;(5):1–43.
184. Safety Alert: Dump Trucks Contact in Loading Zone [Электронный ресурс] / WorkSafe New Zealand. URL: <https://worksafe.govt.nz/dmsdocument/5370-safety-alert-dump-trucks-contact-in-loading-zone> (дата обращения: 14.03.2026).
185. Schmilewski, G. The role of peat in assuring the quality of growing media / G. Schmilewski // Mires and Peat. 2008. Vol. 3, Art. 02. P. 1–8.
186. Safirova, E. The mineral industry of Russia in 2022. In: U.S. Geological Survey. Minerals yearbook 2022. Vol. 3. Area reports: international—Europe and Central Eurasia. Reston (VA): U.S. Geological Survey; 2025. p. 39.1–39.22.
187. Sand and Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis UNEP/GRID-Geneva, 2022. — 90 p. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/38362> (дата обращения: 12.03.2026).
188. Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources 2019. URL: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28163> (дата обращения: 12.03.2026).
189. Shahgholi, G.; Aghdamifar, E.; Moinfar, A.; Szymanek, M.; Tanaś, W. Evaluation of the changes in Bekker's parameters and their use in determining the rolling resistance. International Agrophysics. 2024;38(3):257–266. DOI:10.31545/intagr/187017.

190. SLAMTEC RPLIDAR A1 : [сайт]. – URL: <https://www.slamtec.com/en/lidar/a1> (дата обращения: 12.05.2026). – Текст : электронный.
191. Sloping and benching [Электронный ресурс] // OSHA. URL: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926SubpartPAppB> (дата обращения: 14.03.2026).
192. Darling, P. editor. SME mining engineering handbook. 3rd ed. Englewood (CO): Society for Mining, Metallurgy & Exploration; 2011. 1845 p.
193. Soltanmohammadlou, N.; Hon, СКН.; Drogemuller. R. Applying systems thinking to research into risk factors influencing earthmoving equipment operation safety in construction sites. *Buildings*. 2024;14(7):1978. DOI:10.3390/buildings14071978.
194. Spencer, E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Géotechnique*. 1967;17(1):11–26. DOI:10.1680/geot.1967.17.1.11.
195. Spong, MW.; Hutchinson, S.; Vidyasagar, M. Robot modeling and control. 1st ed. Hoboken (NJ): Wiley; 2005. 419 p.
196. Stentz, A.; Bares, J.; Singh, S.; Rowe, P. A robotic excavator for autonomous truck loading. *Autonomous Robots*. 1999;7(2):175–186. DOI:10.1023/A:1008914201877.
197. Taib, M. The Mineral Industry of Algeria in 2019. Reston: U.S. Geological Survey, 2023. Vol. 3. URL: <https://pubs.usgs.gov/myb/vol3/2019/myb3-2019-algeria.pdf> (дата обращения: 12.03.2026).
198. Teizer, J.; Allread, BS.; Mantripragada, U. Automating the blind spot measurement of construction equipment. *Automation in Construction*. 2010;19(4):491–501. DOI:10.1016/j.autcon.2009.12.012.
199. Teizer, J.; Allread, BS.; Fullerton, CE.; Hinze, J. Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system. *Automation in Construction*. 2010;19(5):630–640. DOI:10.1016/j.autcon.2010.02.009.

200. Terzaghi, K.; Peck, RB.; Mesri, G. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons; 1996. 592 p.
201. Vahdatikhaki, F.; Hammad, A. Dynamic equipment workspace generation for improving earthwork safety using real-time location system. *Advanced Engineering Informatics*. 2015;29(3):459–471. DOI:10.1016/j.aei.2015.03.002.
202. Wang, J.; Razavi, SN. Low false alarm rate model for unsafe-proximity detection in construction. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016;30(2):04015005. DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000470.
203. Willcocks, L.; Lacity, M.; Craig, A. Robotic process automation: strategic transformation lever for global business services. *Journal of Information Technology Teaching Cases*. 2017; 7:17–28. doi:10.1057/s41266-016-0016-9.
204. Wong, JY. *Theory of ground vehicles*. 5th ed. (NJ): Wiley; 2022. 608 p.
205. Wu, CFJ.; Hamada, MS. *Experiments: planning, analysis, and optimization*. 3rd ed. Hoboken (NJ): Wiley; 2021. 736 p.
206. Yamatomi, J.; Okubo, S. Surface mining methods and equipment. In: Horikawa K, Guo Q, editors. *Civil engineering*. Vol. II. Oxford: EOLSS Publishers Co. Ltd.; 2009. p. 155–170.
207. Yoon, J.; Kim, J.; Seo, J.; Suh, S. Spatial factors affecting the loading efficiency of excavators. *Automation in Construction*. 2014;48:97–106. DOI:10.1016/j.autcon.2014.08.002.
208. Zhang, J.; Zhang, Z.; Luo, N. Kinematics analysis and trajectory planning of the working device for hydraulic excavators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1601(6):062024. DOI:10.1088/1742-6596/1601/6/062024.
209. Zhang, Y.; Zhao, Z.; Bi, L.; Wang, L.; Gu, Q. Determination of truck–shovel configuration of open-pit mine: a simulation method based on mathematical model. *Sustainability*. 2022;14(19):12338. DOI:10.3390/su141912338.

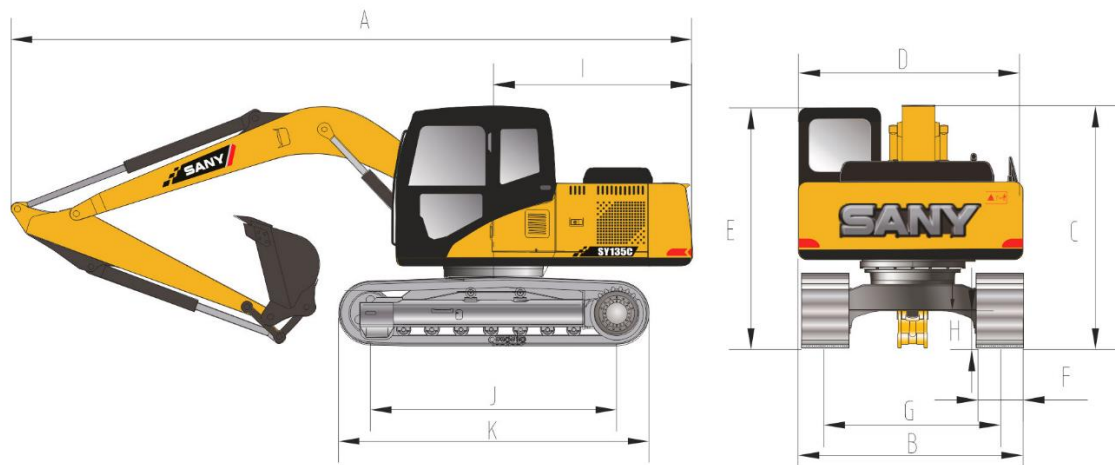
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технические характеристики полевого оборудования

Таблица А.1 – Технические характеристики одноковшового гусеничного гидравлического экскаватора SANY SY135C [83]

Характеристики	Единицы измерения	Величина
Эксплуатационная масса	кг	13 500
Вместимость ковша	м ³	1,0
Тяговое усилие	кН	110
Усилие отрыва ковша	кН	92,7
Усилие резания рукояти	кН	66,1
Скорость передвижения	км/ч	5,5 / 3,5
Скорость поворота платформы	мин ⁻¹	12
Мощность двигателя	кВт при 2000 мин ⁻¹	73
Длина стрелы	м	4,6
Длина рукояти	м	2,5
Ширина гусениц	мм	1500
Удельное давление на грунт	кПа	18
Габаритные размеры		
Сменная эксплуатационная производительность	м ³ /см	935,85
А — Габаритная длина	мм	8100
В — Габаритная ширина	мм	2590
С — Габаритная высота	мм	2815
Д — Ширина по кабине машины	мм	2550
Е — Габаритная высота (включая верх кабины)	мм	2740
F — Ширина башмака по стандарту	мм	500
F — Ширина башмака в болотном исполнении	мм	1500
G — Колея гусеничного хода	мм	1990
Н — Дорожный просвет	мм	425
I — Радиус поворота задней части платформы	мм	2410
J — Опорная длина гусеницы	мм	2930
К — Длина гусеничного хода	мм	3665
Рабочие зоны		
a — Максимальная высота копания	мм	8570
b — Максимальная высота выгрузки	мм	6200
c — Максимальная глубина копания	мм	5500
d — Максимальная глубина вертикального копания	мм	5000
e — Максимальный радиус копания	мм	8270
f — Минимальный радиус поворота платформы	мм	2410
g — Максимальная высота при минимальном радиусе поворота	мм	6500

(a)



(б)

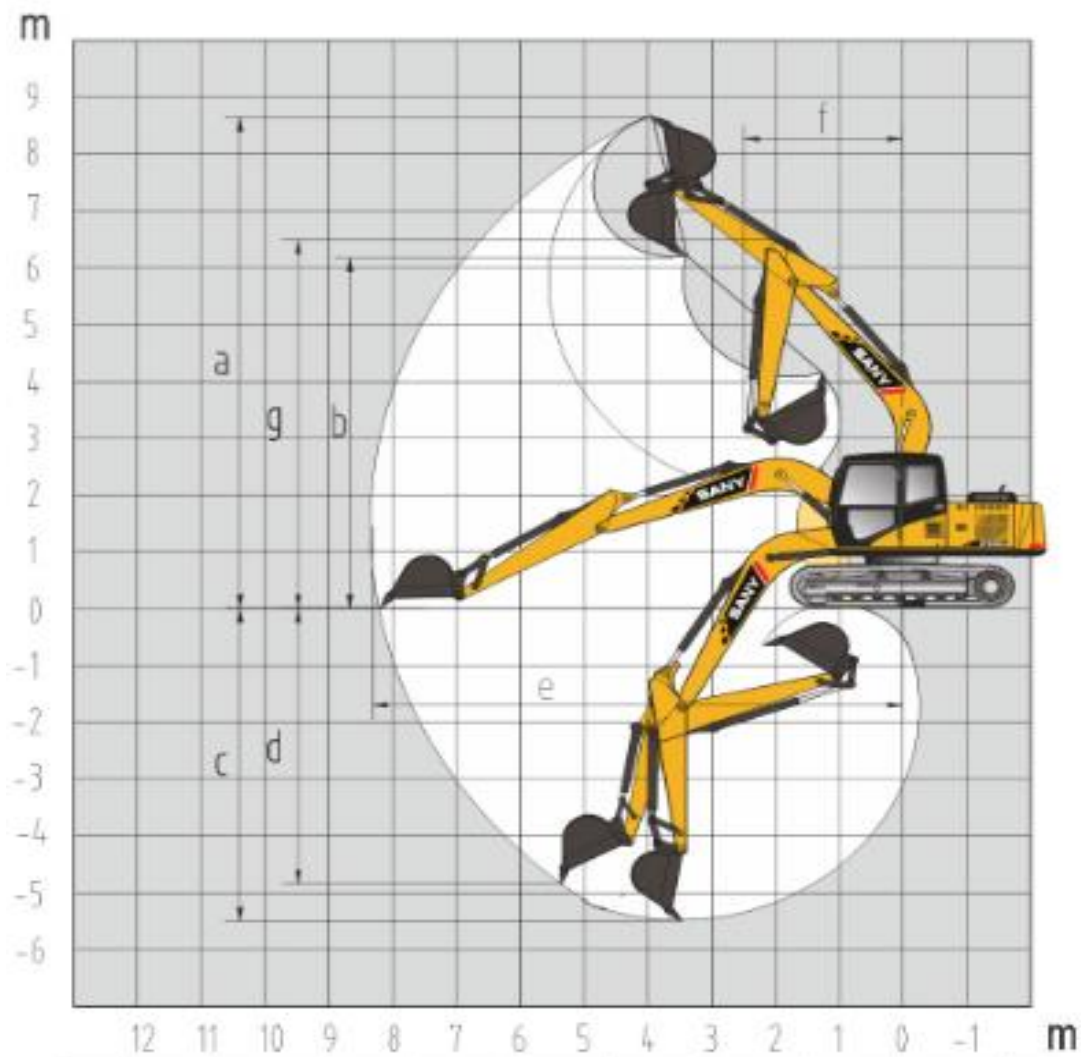


Рисунок А.1 – Размерная схема экскаватора SANY SY135C (а), Параметрическая схема экскаватора (б) SANY SY135C [83]

Таблица А.2 – Технические характеристики самосвала КАМАЗ 45141-011-50 [77]

Характеристики	Единицы измерения	Величина
Двигатель	–	КАМАЗ 740.705-300
Тип двигателя	–	Четырехтактный дизель
Количество и расположение цилиндров	–	8, V-образное
Рабочий объём цилиндров	см ³	11762
Степень сжатия	–	17,6–18,4
Максимальная мощность	кВт (л.с.)	221 (300)
Максимальный крутящий момент	Н·м	1275
Топливо	–	Дизельное
Колесная формула	–	6×6
Тип ошиновки	–	Односкатная
Грузоподъемность	т	9,5
Коробка передач	–	ZF9
Объем грузовой платформы	м ³	6,6
Передаточное отношение главной передачи	–	5,94
Шины	–	425/85R21
Топливный бак	л	350
Тягово-сцепное устройство	–	Крюк-петля
Разгрузка	–	Задняя

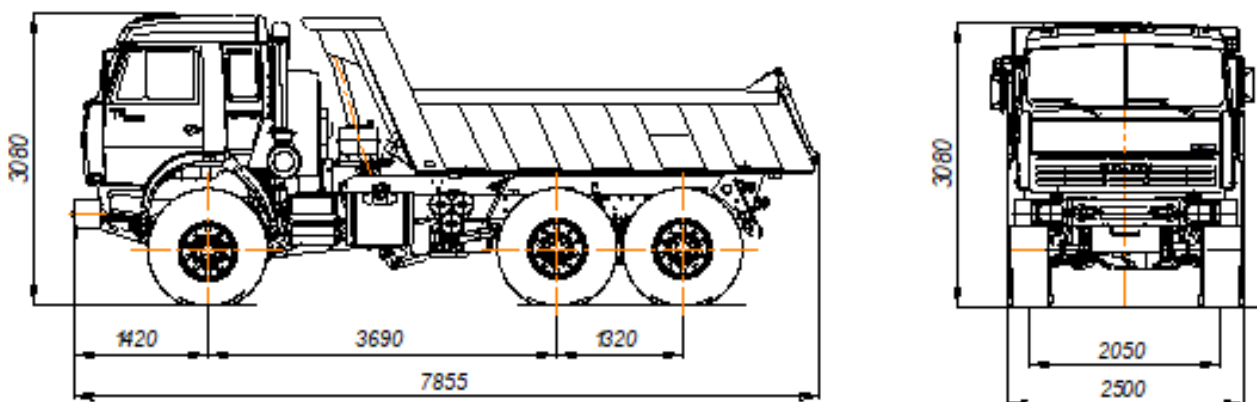


Рисунок А.2 – Габаритные размеры самосвала КАМАЗ 45141-011-50 [77]

Таблица А.3 – Технические характеристики трактора БЕЛАРУС-1523.4-10/99 [9]

Характеристики	Единицы измерения	Величина
Тяговый класс по ГОСТ 27021-86	–	3
Номинальное тяговое усилие	кН	30
Мощность двигателя	кВт	118
Удельный расход топлива при номинальной мощности	г/кВт·ч	270
Число передач вперед/назад	–	16/8

Продолжение таблицы А.3

Характеристики	Единицы измерения	Величина
Скорость переднего хода (расчетная) движения трактора при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя: 1) наименьшая замедленная 2) наибольшая транспортная	км/ч	1,70 35,0
Допустимая нагрузка на мосты, кН: а) на передний б) на задний	кН	40 60
Масса трактора (эксплуатационная максимально разрешенная)	кг	9000
Дорожный просвет под корпусом заднего моста	мм	380
Наименьший радиус окружности поворота (с подтормаживанием)	м	5,5
Колесная формула	—	4К4а
Шины: - передние колеса - задние колеса	—	420/70R24 520/70R38
База трактора	мм	2760 ± 30
Длина общая	мм	4710
Ширина	мм	2300
Высота по кабине	мм	3000
Размер колеи, мм: а) по передним колесам б) по задним колесам	мм	2020±20, 2120 ±20 от 1946 до 2150
Элемент ТСУ Тяговый крюк	—	К1220- 28071005

Таблица А.4 – Технические характеристики полуприцепа самосвального ПСТ-7-1Б с герметичным кузовом [71]

Характеристики	Единицы измерения	Величина
Тип	—	Полуприцеп
Грузоподъемность	т	8
Вместимость кузова	м ³	6,0 ± 0,15
Погрузочная высота по полу кузова	мм	1080 ± 50
Погрузочная высота по боковым бортам	мм	1960
Угол подъема кузова	град	50
Масса	кг	1770
Давление жидкости в гидросистеме	МПа	16,0
Время подъема загруженного кузова	с	30
Длина	мм	4800 ± 100

Продолжение таблицы А.4

Характеристики	Единицы измерения	Величина
Ширина	мм	2500 ± 50
Высота	мм	1960 ± 100
Максимальная высота при выгрузке	мм	5000
Дорожный просвет	мм	350
Размер шин	–	Бел-91 24.0/50-22,5
Давление в шинах	МПа	0,20
Агрегируется с тракторами	т.с. / л.с.	3,0 / от 150
Тип тормозной системы	–	Пневматическая однопроводная
Стояночный тормоз	–	С механическим приводом
Размеры сцепной петли DxS по СТБ 2216	мм	50 ± 5 × 30 ± 2

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты анализа залежи

Таблица Б.1 – Сопротивление сдвигу песчаной залежи (составлено автором)

№	Глубина зондирования, м									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1.1	50,0	54,0	57,0	52,0	54,0	60,0	55,0	53,0	49,0	47,0
1.2	52,0	57,0	56,0	53,0	55,0	61,0	58,0	54,0	50,0	48,0
1.3	51,5	59,0	57,1	52,1	54,8	60,1	57,1	53,1	49,1	46,1
Среднее	51,2	56,7	56,7	52,4	54,6	60,4	56,7	53,4	49,4	47,0
τ, кПа	48,6	35,5	33,8	30,0	30,0	39,3	35,0	33,5	30,5	40,1

Таблица Б.2 – Сопротивление статическому зондированию песчаной залежи (составлено автором)

№	Глубина зондирования, м									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	1450	1600	1620	1500	1750	1680	1620	1550	1480	1700
2	1470	1620	1610	1520	1770	1700	1610	1570	1500	1720
3	1465	1628	1618	1510	1765	1695	1619	1560	1490	1710
Среднее	1461,7	1616,0	1616,0	1510,0	1761,7	1691,7	1616,3	1560,0	1490,0	1710,0
q, кПа	361,8	400,0	400,0	373,7	436,1	418,8	400,0	386,1	368,8	423,2

Таблица Б.3 – Сопротивление сдвигу торфяной залежи (составлено автором)

№	Глубина зондирования, м									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1.1	50,0	54,0	57,0	52,0	54,0	60,0	55,0	53,0	49,0	47,0
1.2	52,0	57,0	56,0	53,0	55,0	61,0	58,0	54,0	50,0	48,0
1.3	51,5	59,0	57,1	52,1	54,8	60,1	57,1	53,1	49,1	46,1
Среднее	51,2	56,7	56,7	52,4	54,6	60,4	56,7	53,4	49,4	47,0
τ, кПа	35,4	26,8	24,0	19,4	15,5	19,7	21,9	28,8	31,3	36,1

Таблица Б.4 – Сопротивление статическому зондированию торфяной залежи (составлено автором)

№	Глубина зондирования, м									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	900	1100	980	1020	1090	1110	1150	1120	1080	1050
2	940	1140	1020	980	1130	1090	1110	1140	1100	1070
3	920	1155	1000	1010	1175	1105	1135	1135	1090	1060
Среднее	920,0	1131,7	1000,0	1003,3	1131,7	1101,7	1131,7	1131,7	1090,0	1060,0
q, кПа	247,6	290,0	267,4	268,2	282,0	272,6	280,0	292,0	292,7	309,2

ПРИЛОЖЕНИЕ В

План полного факторного эксперимента 2^3

Число опытов равно числу точек плана [205]:

$$R = N = 8.$$

Для песка и торфа в каждой точке плана получено по одному значению отклика (повторностей нет), то есть $m = 1$. Тогда число степеней свободы, связанных с воспроизводимостью (чистая ошибка по повторным измерениям), равно:

$$f_y = R(m - 1) = 8(1 - 1) = 0.$$

Это означает, что для обоих материалов (песок и торф) дисперсию воспроизводимости по повторностям оценить нельзя, потому что повторных испытаний нет.

Число оцениваемых коэффициентов:

$$p = 6.$$

Поскольку модель не является насыщенной (не включает все эффекты полного плана), появляется остаточная степень свободы:

$$df_{\text{res}} = N - p = 8 - 6 = 2.$$

Итак, для песка и для торфа при одинаковом плане 2^3 , при $m = 1$ и одной и той же укороченной модели получаем одинаковые степени свободы:

- $f_y = 0$ — степеней свободы на чистую ошибку (нет повторностей);
- $df_{\text{res}} = 2$ — остаточные степени свободы модели.

Для песчаного основания:

Коэффициенты регрессии (в качестве y_i берётся \bar{y}_i)

Так как $m = 1$, то $\bar{y}_i = y_i$

$$d\tilde{b}_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}.$$

$$\tilde{b}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \tilde{x}_{ji}.$$

Значения отклика по строкам плана [205]:

$$y_1 = 1,68, y_2 = 1,47, y_3 = 1,32, y_4 = 1,15, y_5 = 1,77, y_6 = 1,60, y_7 = 1,40, y_8 = 1,26$$

$$\tilde{b}_0 = \frac{1}{8} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8),$$

$$\tilde{b}_0 = \frac{1}{8} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8),$$

$$= \frac{1}{8} (1,68 + 1,47 + 1,32 + 1,15 + 1,77 + 1,60 + 1,40 + 1,26) = 1,46.$$

$$\tilde{b}_1 \text{ (для фактора } X_1; \tilde{x}_{1i} = X_{1i})$$

$$\tilde{b}_1 = \frac{1}{8} [y_1(-1) + y_2(+1) + y_3(-1) + y_4(+1) + y_5(-1) + y_6(+1) + y_7(-1) + y_8(+1)],$$

$$= \frac{1}{8} [-1,68 + 1,47 - 1,32 + 1,15 - 1,77 + 1,60 - 1,40 + 1,26] = -0,086.$$

\tilde{b}_{12} (для взаимодействия X_1X_2 ; $\tilde{x}_{12,i} = X_{1i}X_{2i}$)

$$\begin{aligned}\tilde{b}_{12} &= \frac{1}{8}[y_1(+1) + y_2(-1) + y_3(-1) + y_4(+1) + y_5(+1) + y_6(-1) \\ &\quad + y_7(-1) + y_8(+1)], \\ &= \frac{1}{8}[1,68 - 1,47 - 1,32 + 1,15 + 1,77 - 1,60 - 1,40 + 1,26] = 0,0078.\end{aligned}$$

\tilde{b}_{123} (для взаимодействия $X_1X_2X_3$; $\tilde{x}_{123,i} = X_{1i}X_{2i}X_{3i}$)

$$\begin{aligned}\tilde{b}_{123} &= \frac{1}{8}[y_1(-1) + y_2(+1) + y_3(+1) + y_4(-1) + y_5(+1) + y_6(-1) \\ &\quad + y_7(-1) + y_8(+1)], \\ &= \frac{1}{8}[-1,68 + 1,47 + 1,32 - 1,15 + 1,77 - 1,60 - 1,40 + 1,26] = -0,0020.\end{aligned}$$

Для песчаного основания:

Значения функции отклика (торф) по строкам плана:

$$y_1 = 1,57, y_2 = 1,21, y_3 = 1,31, y_4 = 1,02, y_5 = 1,62, y_6 = 1,29, y_7 = 1,49, y_8 = 1,15.$$

$$\tilde{b}_0 = \frac{1}{8}(1,57 + 1,21 + 1,31 + 1,02 + 1,62 + 1,29 + 1,49 + 1,15) = 1,33,$$

$$\tilde{b}_1 = \frac{1}{8}[-1,57 + 1,21 - 1,31 + 1,02 - 1,62 + 1,29 - 1,49 + 1,15] = -0,17,$$

$$\tilde{b}_{12} = \frac{1}{8}[1,57 - 1,21 - 1,31 + 1,02 + 1,62 - 1,29 - 1,49 + 1,15] = 0,01,$$

$$\tilde{b}_{123} = \frac{1}{8}[-1,57 + 1,21 + 1,31 - 1,02 + 1,62 - 1,29 - 1,49 + 1,15] = -0,01.$$

Дисперсия коэффициентов модели [205]:

Среднеквадратическое отклонение модели (Std. Dev.) по Fit Statistics равно:

$$s = 0,0117, S_y^2 = MSE = s^2 = (0,0117)^2 = 1,3689 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда дисперсия коэффициентов модели:

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{N} = \frac{1,3689 \cdot 10^{-4}}{8} = 1,7111 \cdot 10^{-5},$$

Среднеквадратичная ошибка в определении коэффициентов модели:

$$S_b = \sqrt{S_b^2} = \sqrt{1,7111 \cdot 10^{-5}} = 0,00414 \approx 0,0041.$$

При доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе степеней свободы для $S_y^2 f_y = 2$ табличное значение критерия Стьюдента составляет $t = t_{0,975}(f_y = 2) = 4,303$.

Истинные значения коэффициентов находятся в доверительном интервале:

$$|\Delta b| = S_b t = 0,00414 \cdot 4,303 = 0,0178.$$

Для оценки значимости коэффициентов регрессии проводится анализ соотношения:

$$|b_j| > |\Delta b|.$$

При $P = 0,95$ ранее получено:

$$p |\Delta b| = 0,018.$$

Тогда для коэффициентов модели (в кодированных факторах) имеем:

$$\begin{aligned}
|b_0| &= |1,46| > |\Delta b|, \\
|b_1| &= |-0,09| > |\Delta b|, \\
|b_2| &= |-0,17| > |\Delta b|, \\
|b_2| &= |0,05| > |\Delta b|, \\
|b_{12}| &= |0,01| < |\Delta b|, \\
|b_{13}| &= |0,01| < |\Delta b|.
\end{aligned}$$

Следовательно, при $P = 0,95$ основные эффекты X_1 , X_2 , X_3 являются значимыми, а взаимодействия X_1X_2 и X_1X_3 — незначимыми.

Уравнение полученной модели:

$$\begin{aligned}
\hat{y} &= b_0 + b_1\tilde{x}_1 + b_2\tilde{x}_2 + b_3X_3 + b_{12}\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + b_{13}\tilde{x}_1\tilde{x}_3, \\
\hat{y} &= 1,46 - 0,09\tilde{x}_1 - 0,17\tilde{x}_2 + 0,05\tilde{x}_3 + 0,01\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + 0,01\tilde{x}_1\tilde{x}_3.
\end{aligned}$$

Для последующего проведения проверки адекватности модели находятся расчётные значения функции отклика по полученной регрессионной формуле:

$$\begin{aligned}
\hat{y}_1 &= 1,46 - 0,09(-1) - 0,17(-1) + 0,05(-1) + 0,01(+1) + 0,01(+1) = 1,68, \\
\hat{y}_2 &= 1,46 - 0,09(+1) - 0,17(-1) + 0,05(-1) + 0,01(-1) + 0,01(-1) = 1,50, \\
\hat{y}_3 &= 1,46 - 0,09(-1) - 0,17(+1) + 0,05(-1) + 0,01(-1) + 0,01(+1) = 1,32, \\
\hat{y}_4 &= 1,46 - 0,09(+1) - 0,17(+1) + 0,05(-1) + 0,01(+1) + 0,01(-1) = 1,15, \\
\hat{y}_5 &= 1,46 - 0,09(-1) - 0,17(-1) + 0,05(+1) + 0,01(+1) + 0,01(-1) = 1,77, \\
\hat{y}_6 &= 1,46 - 0,09(+1) - 0,17(-1) + 0,05(+1) + 0,01(-1) + 0,01(+1) = 1,60, \\
\hat{y}_7 &= 1,46 - 0,09(-1) - 0,17(+1) + 0,05(+1) + 0,01(-1) + 0,01(-1) = 1,40, \\
\hat{y}_8 &= 1,46 - 0,09(+1) - 0,17(+1) + 0,05(+1) + 0,01(+1) + 0,01(+1) = 1,26.
\end{aligned}$$

Оценка дисперсии адекватности

Оценка дисперсии адекватности (по отклонениям расчётных значений от экспериментальных):

$$S_{aa}^2 = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (N = 8, p = 6, f_{aa} = N - p = 2),$$

Подстановка:

$$\begin{aligned}
S_{aa}^2 &= \frac{1}{2} [(-0,0035)^2 + (-0,0075)^2 + (0,0035)^2 + (0,0075)^2 + (0,0035)^2 + (0,0075)^2 \\
&\quad + (-0,0035)^2 + (-0,0075)^2] = 1,37 \cdot 10^{-4}.
\end{aligned}$$

Расчётное значение критерия Фишера для проверки адекватности (значимости) модели по ANOVA:

$$F_p = \frac{MS_{\text{модель}}}{MS_{\text{res}}} = \frac{0,065}{0,00014} = 471,22.$$

где $MS_{\text{модель}}$ — средний квадрат, объяснённый моделью; MS_{res} — средний квадрат остатка (ошибки), т.е. MSE .

Критерий Фишера $F_p = 471,22$ при $f_1 = 5$, $f_2 = 2$ даёт очень малое p -значение (в ANOVA $p = 0,0021$), следовательно модель статистически значима.

Поскольку $F_p > F_{\text{табл}}$, полученная регрессионная модель считается статистически значимой. Для получения модели в натуральном виде подставим в нормированное уравнение преобразованные значения факторов.

Нормированное (кодированное) уравнение имеет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_A \tilde{x}_1 + b_B \tilde{x}_2 + b_C \tilde{x}_3 + b_{AB} \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 + b_{AC} \tilde{x}_1 \tilde{x}_3.$$

Для торфяного основания:

Коэффициенты регрессии (в качестве y_i берётся \bar{y}_i)

Так как $m = 1$, то $\bar{y}_i = y_i$.

Значения отклика по строкам плана:

$$y_1 = 1,57, y_2 = 1,21, y_3 = 1,31, y_4 = 1,02, y_5 = 1,62, y_6 = 1,29, y_7 = 1,49, y_8 = 1,15.$$

$$\tilde{b}_0 = \frac{1}{8}(1,57 + 1,21 + 1,31 + 1,02 + 1,62 + 1,29 + 1,49 + 1,15) = 1,330,$$

$$\tilde{b}_1 = -0,165,$$

$$\tilde{b}_2 = -0,090,$$

$$\tilde{b}_3 = 0,055,$$

$$\tilde{b}_{12} = 0,008,$$

$$\tilde{b}_{13} = -0,001,$$

$$\tilde{b}_{23} = 0,022,$$

Дисперсия коэффициентов модели:

$$s = 0,028, S_y^2 = MSE = s^2 = (0,028)^2 = 7,784 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда дисперсия коэффициентов модели:

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{N} = \frac{7,784 \cdot 10^{-4}}{8} = 9,730 \cdot 10^{-5},$$

Среднеквадратичная ошибка в определении коэффициентов модели:

$$S_b = \sqrt{S_b^2} = \sqrt{9,7301 \cdot 10^{-5}} = 0,01.$$

Число степеней свободы для S_y^2 :

$$f_y = df_{res} = N - p = 8 - 7 = 1.$$

При доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе степеней свободы для $S_y^2 f_y = 1$ табличное значение критерия Стьюдента:

$$t = t_{0,975}(f_y = 1) = 12,706.$$

Истинные значения коэффициентов находятся в доверительном интервале:

$$|\Delta b| = S_b \cdot t = 0,00986 \cdot 12,706 = 0,125.$$

Для оценки значимости коэффициентов регрессии проводится анализ соотношения:

$$|b_j| > |\Delta b|.$$

При $P = 0,95$ ранее получено: $|\Delta b| = 0,125$.

Тогда для коэффициентов модели (в кодированных факторах) имеем:

$$|b_0| = |1,33| > |\Delta b|,$$

$$\begin{aligned}
|b_1| &= | -0,17 | > | \Delta b |, \\
|b_2| &= | -0,09 | < | \Delta b |, \\
|b_3| &= | 0,06 | < | \Delta b |, \\
|b_{12}| &= | 0,01 | < | \Delta b |, \\
|b_{13}| &= | -0,001 | < | \Delta b |, \\
|b_{23}| &= | 0,022 | < | \Delta b |.
\end{aligned}$$

Следовательно, при $P = 0,95$ значимым является основной эффект X_1 , а эффекты X_2 , X_3 и взаимодействия X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 — незначимы (что согласуется с вашими p -значениями: значим только А, $p = 0,0381 < 0,05$).

Уравнение полученной модели (в кодированных факторах):

$$\begin{aligned}
\hat{y} &= b_0 + b_1\tilde{x}_1 + b_2\tilde{x}_2 + b_3\tilde{x}_3 + b_{12}\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + b_{13}\tilde{x}_1\tilde{x}_3 + b_{23}\tilde{x}_2\tilde{x}_3, \\
\hat{y} &= 1,33 - 0,17\tilde{x}_1 - 0,09\tilde{x}_2 + 0,06\tilde{x}_3 + 0,01\tilde{x}_1\tilde{x}_2 - 0,001\tilde{x}_1\tilde{x}_3 + 0,02\tilde{x}_2\tilde{x}_3.
\end{aligned}$$

Для последующего проведения проверки адекватности модели находятся расчётные значения функции отклика:

$$\begin{aligned}
\hat{y}_1 &= 1,33 - 0,17(-1) - 0,09(-1) + 0,06(-1) + 0,01(+1) - 0,001(+1) + 0,02(+1) = 1,56, \\
\hat{y}_2 &= 1,33 - 0,17(+1) - 0,09(-1) + 0,06(-1) + 0,01(-1) - 0,001(-1) + 0,02(+1) = 1,22, \\
\hat{y}_3 &= 1,33 - 0,17(-1) - 0,09(+1) + 0,06(-1) + 0,01(-1) - 0,001(+1) + 0,02(-1) = 1,32, \\
\hat{y}_4 &= 1,33 - 0,17(+1) - 0,09(+1) + 0,06(-1) + 0,01(+1) - 0,001(-1) + 0,02(-1) = 1,01, \\
\hat{y}_5 &= 1,33 - 0,17(-1) - 0,09(-1) + 0,06(+1) + 0,01(+1) - 0,001(-1) + 0,02(-1) = 1,63, \\
\hat{y}_6 &= 1,33 - 0,17(+1) - 0,09(-1) + 0,06(+1) + 0,01(-1) - 0,001(+1) + 0,02(-1) = 1,28, \\
\hat{y}_7 &= 1,33 - 0,17(-1) - 0,09(+1) + 0,06(+1) + 0,01(-1) - 0,001(-1) + 0,02(+1) = 1,48, \\
\hat{y}_8 &= 1,33 - 0,17(+1) - 0,09(+1) + 0,06(+1) + 0,01(+1) - 0,001(+1) + 0,02(+1) = 1,16.
\end{aligned}$$

Оценка дисперсии адекватности:

$$S_{aa}^2 = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, (N = 8, p = 7, f_{aa} = N - p = 1),$$

Подстановка:

$$\begin{aligned}
S_{aa}^2 &= \frac{1}{1} [(0,0099)^2 + (-0,0099)^2 + (-0,0099)^2 + (0,0099)^2 + (-0,0099)^2 + (0,0099)^2 \\
&\quad + (0,0099)^2 + (-0,0099)^2] = 7,80 \cdot 10^{-4}.
\end{aligned}$$

Расчётное значение критерия Фишера для проверки адекватности модели по ANOVA:

$$F_p = \frac{MS_{\text{модель}}}{MS_{\text{res}}} = 66,46.$$

По ANOVA: $F_p = 66,46$ при $f_1 = 6$, $f_2 = 1$ даёт p -значение $p = 0,0936$. Следовательно, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (то есть при $P = 0,95$) модель в целом статистически незначима, однако на уровне $\alpha = 0,10$ может рассматриваться как близкая к значимой.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Технические характеристики электронного оборудования

Таблица Г.1 – Технические характеристики LiDAR-сенсор A1M8 (Slamtec RPLIDAR A1M8) [190]

Характеристики	Единицы измерения	Величина
Рекомендуемые области применения	–	Пылесос-робот, домашний робот
Диапазон измерений	м	0,15–12
Частота выборки	кГц	8 (8000 измерений/с)
Скорость вращения	Гц	5,5
Угловое разрешение	°	≤ 1
Угловой диапазон	°	360
Разрешение по дальности	%	≤ 1% диапазона (≤ 12 м); ≤ 2% (12–16 м)
Точность измерения дальности	%	1% (≤ 3 м); 2% (3–5 м); 2,5% (5–25 м)
Габаритные размеры	мм	96,8 × 70,3 × 55
Напряжение питания системы	В	5
Ток потребления	мА	100
Потребляемая мощность	Вт	0,5
Интерфейс вывода	–	UART (последовательный), уровень 3,3 В
Рабочий диапазон температур	°С	0–40



Рисунок Г.1 – Общий вид сенсора LiDAR (RPLIDAR A1M8) [190]

Лидар вращается и излучает лазерные импульсы. Эти импульсы отражаются от окружающих предметов. Датчик измеряет время возврата каждого отраженного

сигнала. Это позволяет точно вычислить расстояние до каждой точки. Так формируется облако точек на 360 градусов.

Таблица Г.2 – Характеристик Raspberry Pi 5 [174]

Процессор	Broadcom BCM2712, 2,4 ГГц, 4-ядерный 64-бит Arm Cortex-A76 с Crypto Extension, L2 по 512 КБ на ядро, общий L3 2 МБ raspberrypi+1
Графика	VideoCore VII GPU, поддержка OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.2 raspberrypi+1
Видеовыход	2× HDMI с поддержкой 4Kp60 HDR geeksvalley+1
Аппаратный декодер видео	4Kp60 HEVC
ОЗУ	LPDDR4X-4267, варианты 1/2/4/8/16 ГБ
Беспроводная связь	Двухдиапазонный Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0 / BLE geeksvalley+1
Накопитель	Слот microSD, поддержка режима SDR104
Порты USB	2× USB 3.0 (до 5 Гбит/с), 2× USB 2.0 geeksvalley+1
Сеть	Gigabit Ethernet, поддержка PoE+ (через отдельный PoE+ HAT)
MIPI интерфейсы	2× 4-линейных трансивера для камеры/дисплея
PCIe	PCIe 2.0 x1 (через отдельный M.2 HAT или адаптер)
Питание	5 В / 5 А через USB-C, поддержка Power Delivery geeksvalley+1
Разъём GPIO	Стандартный 40-контактный разъём Raspberry Pi
Часы реального времени	Встроенный RTC, питание от внешней батареи
Кнопка питания	Есть
MTBF (нормальные условия)	93 800 ч (Ground Benign)
Рабочий диапазон температур	от 0 °C до 70 °C geeksvalley+1

Таблица Г.3 – Характеристик Raspberry Pi AI HAT+ 2 [175]

AI-ускоритель	Нило-10Н, производительность 40 TOPS (INT4) при инференсе raspberrypi+1
Производительность CV	Сопоставима с Raspberry Pi AI HAT+ (26 TOPS) для моделей компьютерного зрения raspberrypi+1
Память	8 ГБ встроенной RAM, эффективный запуск генеративных AI-моделей raspberrypi+1
Интеграция ПО	Полная интеграция в программный стек камер Raspberry Pi raspberrypi+1
Форм-фактор	Соответствует спецификации Raspberry Pi HAT+ raspberrypi+1
Комплектация	Плата AI HAT+ 2, опциональный радиатор, 16-мм стекируемый разъём, стойки и винты для установки на Raspberry Pi 5 с активным кулером buyzero+1
Рабочая температура	0 °C...50 °C (окружающая среда)



Рисунок Г.2 – Общий вид инфракрасного дальномера Sharp GP2Y0A02YK0F [116]

Таблица Г.4 – Характеристики инфракрасного дальномера Sharp GP2Y0A02YK0F [116]

Характеристики	Единицы измерения	Величина
Тип выходного сигнала	–	Аналоговый
Измеряемое расстояние	см	20–150
Дифференциальное напряжение (свыше диапазона измерений)	В	2,05
Время отклика	мс	$38,3 \pm 9,6$
Типичная частота дискретизации	Гц	26
Рабочее напряжение	В	4,5–5,5
Потребляемый ток	мА	33
Габариты	мм	$29,5 \times 13,0 \times 21,5$
Масса	г	4,8

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Патент и свидетельства на объекты интеллектуальной собственности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025615460

Программа для помощи оператору при
позиционировании экскаватора на уступе нерудных
карьеров

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

Авторы: *Михайлов Александр Викторович (RU), Бугебрин
Шуаиб (RU)*

Заявка № 2025612868

Дата поступления 19 февраля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 марта 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025664988

**Программа контроля рабочей зоны экскаватора при
позиционировании на уступе нерудных карьеров**

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

Авторы: *Михайлов Александр Викторович (RU), Бугебрин
Шуаиб (RU), Акинола Коллинз Кингсли (RU)*

Заявка № 2025663725

Дата поступления 29 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 июня 2025 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0492e761a6300b154f2a01670bca2026
Владелец: **Зубов Юрия Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025666286

**Программа контроля осадки ходовой части экскаватора
при работе на уступах нерудных карьеров**

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

Авторы: *Михайлов Александр Викторович (RU), Бугебрин
Шуаиб (RU), Казаков Юрий Алексеевич (RU)*



Заявка № 2025664510

Дата поступления 03 июня 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 июня 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0492e763a63005b542401670bca2026
Владелец: **Зубов Юлий Сергеевич**
Действителен с 10.02.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2855340

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ
ЭКСКАВАТОРА

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

Авторы: *Михайлов Александр Викторович (RU), Казаков Юрий Алексеевич (RU), Бугебрин Шуаиб (RU)*

Заявка № 2025117318

Приоритет изобретения **24 июня 2025 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **30 января 2026 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **24 июня 2045 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Е**Акты внедрения**

**Общество с ограниченной ответственностью
«Биохимический завод» (ООО «БХЗ»)
ИНН 4715020073 КПП 471501001
187650, Ленинградская область,
г. Бокситогорск, ул. Заводская, д. 1**

**АКТ**

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации
БУГЕБРИНА Шуаиба
по научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Комиссия (специальная) в составе:

Генеральный директор Горошилов Н. В. (Председатель), заместитель генерального директора Капустина О. В., начальник производства Хван Т. К.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертации БУГЕБРИНА Шуаиба на тему «Обоснование рационального позиционирования гидравлического экскаватора на слабоустойчивых уступах карьеров нерудных материалов», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности ООО «БХЗ» при разработке проекта организации ведения горных работ на торфяном месторождении «Ларьянское» (Бокситогорский район, Ленинградской обл.) в виде:

– инженерной методики определения параметров рабочих площадок на основе рационального позиционирования комплекта машин «экскаватор-самосвал» на уступе торфяного карьера;

– рекомендаций по применению системы контроля осадки ходовой части экскаватора на слабом торфяном основании;

Комиссия считает, что внедрение в процесс экскавации торфяного сырья указанных рекомендаций приведет к:

– снижению количества ошибок оператора при позиционировании экскаватора на уступе торфяного карьера на 20%;

– увеличению устойчивости гидравлического экскаватора на водонасыщенных и слабонесущих уступах торфяных карьеров;

– повышению уровня безопасного ведения горных работ за счёт автоматического контроля нахождения людей и машин в опасных зонах экскаватора;

– снижению времени простоев машин по организационно-технологическим причинам (маневрирование самосвала и перепозиционирование ковша в рабочей зоне при разгрузке в кузов самосвала) и предотвращению аварийных ситуаций;

– снижению продолжительности рабочего цикла экскаватора на 10% и повышению его производительности.

Председатель комиссии

Генеральный директор

Горошилов Н. В.

Заместитель ген.директора

Капустина О. В.

Начальник производства

Хван Т. К.

Общество
с ограниченной ответственностью
«Мелиоратор»
188501, Россия, Ленинградская область,
Ломоносовский район, д. Низино
ул. Промышленная, 10.
ИНН/КПП 4720000844/472501001
ОГРН 1024702184814,
р/с 40702810955140135319
г. Санкт-Петербург
ПАО «Сбербанк России»,
к/с 30101810500000000653, БИК 044030653.
Тел 8-(921-945-71-84),
E-mail: meliorator89@mail.ru



«Утверждаю»

Генеральный директор
ООО «Мелиоратор»

Леончик Н.С.

«14» января 2026г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации
Бугебрина Шуаиба
по научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Комиссия в составе:

Председателя: Генеральный директор Леончик Н.С.

Членов комиссии: Технический директор Чичайкин Э.В.

Инженер по производству Звездин И.О.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертации **Бугебрина Шуаиба** на тему «**Обоснование рационального позиционирования гидравлического экскаватора на слабоустойчивых уступах карьеров нерудных материалов**», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности ООО «Мелиоратор» на месторождении песка «Глобицы-Западный» (Ломоносовский р-н, Ленинградская обл.) на 2026 год в виде:

– рекомендаций по применению алгоритма системы управления позиционированием экскаватора на песчаном карьере с применением сенсоров наклона типа LiDAR.

– методики определения параметров рабочих площадок при позиционировании комплекта машин «экскаватор-самосвал» на уступе песчаного карьера.

Использование указанных результатов в процессе экскавации песка позволит:

– снизить количество ошибок оператора при позиционировании экскаватора на уступе песчаного карьера на 22%;

– повысить оперативную безопасность ведения работ за счёт автоматического контроля нахождения персонала и техники в опасных зонах;

– снизить время простоев машин – до 50% по технологическим причинам (маневрирование самосвала и перепозиционирование ковша в рабочей зоне при разгрузке песка в кузова самосвала);

– снизить продолжительность рабочего цикла экскаватора на 10-12% и тем самым повысить эксплуатационную производительность на 20%.

– предотвращать возникновение аварийных ситуаций в процессе выемки и погрузки песка.

Председатель комиссии

Генеральный директор

Леончик Н.С.

Члены комиссии:

Технический директор

Чичайкин Э.В.

Инженер по производству

Звездин И.О.