

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

На правах рукописи

Казаков Юрий Алексеевич



ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРИЦЕПА
В СОСТАВЕ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТА
МНОГОКРАТНОЙ ПРОХОДИМОСТИ ПО СЛАБЫМ ГРУНТАМ

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Анализ особенностей карьерного способа добычи торфяного сырья с элементами внутрикарьерного транспорта	12
1.2 Анализ горнотехнических условий внутримассивного транспортирования торфяного сырья.....	20
1.3 Обзор и анализ технологического оборудования для внутримассивного транспортирования торфяного сырья	31
1.3.1 Анализ применения колесных тракторов на слабых грунтах	34
1.3.2 Обзор и анализ тракторных транспортных устройств	36
1.4 Выводы по главе 1	44
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТА В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРА	47
2.1. Обоснование структуры и размерно-массовых параметров транспортного агрегата.....	47
2.2 Анализ условий проходимости горнотранспортного агрегата по слабым грунтам	53
2.3 Обоснование размерно-массовых параметров колесного хода транспортного полуприцепа	64
2.4 Анализ движения ГТА при транспортировании экскавированного торфяного сырья в условиях карьера	68
2.5 Анализ производительности ГТА	74
2.6 Выводы по главе 2.....	76
ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	78
3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований... ..	78
3.2 Разработка методики проведения экспериментальных исследований.....	79
3.2.1 Методика проведения экспериментальных исследований в полевых условиях	79
3.2.1.1 Нарботка опытных образцов торфяного сырья.....	80
3.2.1.2 Методика отбора образцов торфяной залежи и торфяного сырья.....	82

3.2.1.3 Методика определения физико-механических свойств грунта.....	83
3.2.1.4 Методика определения осадки колеса в слабое основание	86
3.2.2 Методика проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях	87
3.2.2.1 Лабораторный стенд для штамповых испытаний.....	89
3.2.2.2 Лабораторный стенд для определения угла соскальзывания торфяного сырья с поверхности кузова	90
3.3 Методика определения характеристик образцов торфяного сырья	91
3.4 Методика определения пятна контакта шин на твердом основании.....	92
3.5 Методика определения нормальных напряжений сжатия слабого грунта под колесом.....	93
3.6 Методика планирования дробного факторного эксперимента	96
3.7 Определение адгезии экскавированного торфяного сырья к кузову полуприцепа.....	97
3.8 Методика обработки результатов экспериментов	98
3.9 Выводы по главе 3	98
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	100
4.1 Результаты определения прочностных свойств торфяной залежи	100
4.2 Результаты анализа выбора шин	102
4.3 Результаты штамповых испытаний в лабораторных условиях	110
4.4 Результаты определения адгезионных свойств и угла соскальзывания торфяного сырья при разгрузке	118
4.5 Обоснование формы кузова полуприцепа.....	123
4.6 Выводы по главе 4.....	129
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	131
5.1 Рекомендации по функционированию оборудования в условиях комплексно-механизированного карьера	131
5.2 Характеристики горнотранспортного агрегата.....	133
5.3 Выводы по главе 5.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технические характеристики оборудования.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Количество оборудования выемочно-транспортного комплекса	161
ПРИЛОЖЕНИЕ В Технические параметры перспективного тракторного полуприцепа.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о внедрении результатов диссертационного исследования.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патент на полезную модель №210696.....	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Транспорт – важнейшая составная часть производственной инфраструктуры горного производства. Значение транспорта с высокой проходимостью по слабым грунтам возрастает при карьерной технологии добычи торфа, а также при строительстве трубопроводов, освоении территорий при небольших объемах перевозок, не оправдывающих сооружение автомобильных дорог.

В качестве отличительных особенностей функционирования горнотранспортного агрегата на слабых грунтах следует отметить транспортирование экскавированного влажного органомогенного сырья с высокой насыпной плотностью по торфяной залежи как слабому грунту с низкой проходимостью из-за высокой влажности и относительно низкой прочности, как в естественном, так и частично осушенном состоянии. Эксплуатационные параметры горнотранспортных агрегатов (ГТА) определяются этими ограничениями.

Эффективность выполнения транспортных задач зависит от рационального состава ГТА и конструктивного исполнения транспортного средства с колесным двигателем. Потребительские свойства выпускаемых в настоящее время транспортных средств, их номенклатура и технический уровень не в полной мере соответствуют требованиям устойчивого функционирования на слабых грунтах.

Таким образом, вопросы установления диапазона эффективного применения транспортных средств высокой проходимости с выбором предельных размерно-массовых параметров полуприцепа в составе ГТА многократной проходимости по слабым грунтам, режимами функционирования в допускаемых областях, анализом процесса взаимодействия колесных двигателей с грунтом и рациональной комплектацией флотационными шинами являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие теории движения колесных транспортных средств по грунтам с низкой несущей способностью внесли такие отечественные и зарубежные ученые как: Агейкин Я.С., Бабков В.Ф., Вольская Н.С., Гуськов В.В., Кацыгин В.В., Кутьков, Г.М., Скотников В.А., Хахина А.М., Хитров Е.Г., Bekker M.G., Larminie J.C., MacLaurin E., Nuttall J., Priddy J.D., Rowland D., Rula A.A., Saarilahti M., Willoughby W.E., Wong J.Y. и ряд других исследователей. Ими предложены оценочные методы проходимости транспортного оборудования по слабым грунтам. В настоящее время требуется дальнейшее развитие исследований проходимости в соответствии с принципами формирования структуры мобильного комплекса технологического оборудования и, в частности, с обоснованием режимов функционирования ГТА в допускаемых областях. В направлении исследования физико-механических свойств торфяной залежи и торфа и созданию средств механизации посвящены работы: Амаряна Л.С., Булышко М.Г., Зюзина Б.Ф., Корчунова С.С., Ларгина И.Ф., Лиштвана И.И., Малков Л.М., Миронова В.А., Михайлова А.В., Опейко Ф.А., Самсонова Л.Н., Селеннова В.Г., Солопова С.Г., Танклевского М.М., Фомина К.В., Яблонева А.Л. и др. Результаты научных исследований в обеспечении проходимости транспортных средств через увеличение тягового усилия трактора или через увеличение его скорости достигли предельных значений по причине повышенного буксования трактора-тягача. Для обоснования пределов функционирования транспортных агрегатов в условиях карьерной добычи торфяного сырья требуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью исследования является установление закономерностей процесса изменения многократной проходимости ГТА по слабым грунтам с предельной транспортной нагрузкой в соответствии с паспортом прочности слабого грунта для разработки научно-обоснованного технического решения в условиях комплексно-механизированного карьера при максимально

возможной производительности транспортирования влажного насыпного груза.

Идея исследования заключается в обосновании пределов функционирования транспортных агрегатов в условиях карьерной добычи торфяного сырья и оценки предельной транспортной нагрузки при учете паспорта прочности слабого грунта по критериям предельных значений нормального давления и прочности на сдвиг верхнего слоя торфяной залежи для выбора рациональной структуры полуприцепа ГТА при установлении необходимых и достаточных конструктивных, размерно-массовых и функциональных параметров.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы и обосновать эксплуатационные требования, предъявляемые к ГТА, предназначенных для эксплуатации на грунтах с низкой несущей способностью.

2. Провести анализ предельных состояний прочности слабого грунта и предельной транспортной нагрузки с учетом параметров насыпного груза для обеспечения многократной проходимости агрегата в условиях комплексно-механизированного карьера.

3. Провести параметрический анализ структуры ГТА и обосновать колесную базу, размеры и форму кузова для обеспечения движения при транспортировании экскавированного торфяного сырья в условиях комплексно-механизированного карьера.

4. Провести в полевых и лабораторных условиях экспериментальные исследования по влиянию параметров колесного хода и размерно-массовых характеристик тракторного полуприцепа на процесс многократной проходимости агрегата в условиях комплексно-механизированного карьера при транспортировании экскавированного торфяного сырья.

5. Экспериментально установить размерно-массовые параметры полуприцепа ГТА и разработать техническое решение по форме кузова

полуприцепа для транспортирования и эффективной разгрузки экскавированного торфяного сырья как адгезионно-активного груза.

6. Разработать практические рекомендации по результатам исследований.

Соответствие паспорту специальности. Тема исследования соответствует п. 3. «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов» и п. 4. «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимосвязи с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями» областям исследований паспорта научной специальности 05.05.06 – Горные машины.

Научная новизна работы:

Разработанные математические модели, отличающиеся учетом циклического взаимодействия колесных движителей ГТА с деформируемой опорной поверхностью, позволяющие проводить оценку влияния параметров полуприцепа и движителей на показатели многократной проходимости агрегата без критического нарушения несущего слоя слабого грунта и предельной транспортной нагрузки, дают возможность прогнозировать многократную проходимость транспортного оборудования в условиях комплексно-механизированного карьера и разрабатывать практические рекомендации по ее повышению.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны математические модели, отличающиеся учетом циклического последовательного взаимодействия колесных движителей ГТА с деформируемой опорной поверхностью, позволяющие проводить оценку влияния параметров полуприцепа и движителей на показатели многократной проходимости агрегата без критического нарушения несущего слоя слабого грунта и предельной транспортной нагрузки, дают возможность прогнозировать многократную проходимость транспортного оборудования в условиях комплексно-механизированного карьера.

2. Разработана математическая модель, описывающая движение ГТА, с оценкой мгновенных ускорений по значениям сил и моментов, действующих на агрегат для определения траекторий движения звеньев ГТА при выполнении транспортной операции в условиях комплексно-механизированного карьера.

3. На основе проведенных исследований определены рациональные конструктивные и геометрические параметры тракторного колесного полуприцепа в составе ГТА. Представлены предложения по дальнейшему совершенствованию конструкций ГТА.

4. Результаты диссертационной работы приняты к использованию при разработке новых видов прицепного оборудования многопрофильным машиностроительным предприятием ООО «Грин-Маш» г. Тверь (акт внедрения от 19.01.2022).

5. По теме работы получен патент РФ на полезную модель.

Методология и методы исследования. В ходе выполнения работы принят комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение научно-технической и патентной информации, положения теории машин и механизмов, механики грунтов, проведения экспериментальных исследований с помощью оригинального экспериментального оборудования на образцах натурального материала, использования методов планирования эксперимента и методов математической статистики и регрессионного анализа с помощью стандартного программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Агрегатирование трактора тягового класса 2 т со сдвоенными колесами и самосвального двухосного полуприцепа со сдвоенными колесами на радиальных флотационных шинах типоразмера 600/50R22,5 обеспечивает рациональное значение среднего максимального давления 29 кПа для многократной проходимости по слабому грунту с учетом предельных состояний прочности грунта и транспортной нагрузки.

2. Форма кузова в виде сочетания двух полутрубных поверхностей в поперечном сечении кузова, обеспечивает снижение уплотнения торфяного сырья на 10 % и снижение критического угла соскальзывания массы торфяного сырья до 46° , что в сочетании с перфорацией днища для удаления излишков жидкости и футеровкой поверхности кузова полиуретаном создает условия для эффективного транспортирования и разгрузки адгезионно активного груза.

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 материалов, 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 диссертационного исследования проведена на научно-практических мероприятиях с докладами:

- VII Международный семинар инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020 (г. Санкт-Петербург, 2020 г.).
- 78-я международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2020 г.).
- научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).
- XIX ежегодная Всероссийская конференция-конкурс молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Связь темы диссертации с научно-техническими программами.

Диссертационная работа выполнена в рамках реализации задач научной школы «Машины, механизмы и энергообеспечение горного производства» в Санкт-Петербургском горном университете, а также соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации по п. 6 «Рациональное природопользование» (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899) и критическим технологиям Российской Федерации «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи».

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, разработке программы и методики полевых и лабораторных исследований, определении параметров при проектировании и реализации новой конструкции кузова, создании лабораторного стенда штамповых испытаний верхнего несущего слоя торфяной залежи, организации и проведении полевых и лабораторных исследований, в анализе полученных результатов и формировании практических рекомендаций для определения характеристик ГТА.

Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 5 приложений. Материалы работы изложены на 166 страницах машинописного текста, включая 24 таблицы, 59 рисунков. Список цитируемой литературы включает 149 источников, из них 54 – на иностранных языках.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ особенностей карьерного способа добычи торфяного сырья с элементами внутрикарьерного транспорта

Планирование технического процесса связано со специфическими особенностями торфяного производства, самые значимые из которых – сезонность производства и большая зависимость процесса от метеорологических условий.

Технологический процесс добычи торфяного сырья карьерным способом начинается в весенний период и предусматривает комплекс работ по подготовке участка к выполнению вскрышных и добычных работ.

До начала работ по выемке торфяного сырья с последующей его транспортировкой необходимо:

- очистить месторождение от леса, пней, кустарника;
- провести предварительное осушение участка;
- подготовить пути для вывоза экскавированного торфяного сырья;
- определить места складирования торфяного сырья;
- укомплектовать механизированный парк необходимым

количеством выемочного оборудования и горнотранспортных агрегатов, исходя из объема и дальности перевозки торфяного сырья.

Торфяная залежь при средней плотности в естественном залегании 800-1100 кг/м³ по классификации ЕНиР 2-1-1 «Земляные работы» по трудности разработки относится к I группе и легко разрабатывается механизированным способом с применением одноковшовых строительных экскаваторов. Технологическая схема характеризуется использованием горнотранспортного оборудования циклического действия: экскаватор (гидравлическая лопата) и горнотранспортные агрегаты [55].

Одной из задач по разработке месторождений открытым способом является выбор состава парка экскаваторов и самосвалов, и разработка алгоритма добычи, который сводит к минимуму транспортные и другие постоянные расходы [98; 118]. При разработке месторождений карьерным

способом обычно широко используется традиционная система экскаватор-самосвал [46, 87]. Добыча торфяного сырья карьерным способом – это процесс разработки торфяного месторождения с помощью глубокого карьера, который вырабатывается в один выемочный уступ на всю глубину торфяной залежи [90].

Для инфраструктуры горного производства транспорт является важнейшей составной частью, а его устойчивое и эффективное функционирование – необходимое условие устойчивого развития горной промышленности страны.

Система включает в себя дискретные циклы выемки-погрузки и транспортирования, производительность которых характеризуются временем рабочего цикла.

Процесс добычи торфяного сырья с помощью выемочно-транспортного комплекса в составе экскаватора и самосвалов является гибким и подходит для геологически сложных торфяных месторождений различной конфигурации и глубины залежи. ГТА циклично совершает транспортирование экскавированного сырья от забоя до отвала, совершая многократный проезд по месторождению по одной и той же траектории (рисунок 1). Время цикла ГТА измеряется с момента операции загрузки кузова транспортного средства экскаватором, ГТА движется груженым до места разгрузки, выгружает материал и возвращается порожним к экскаватору с позиционированием для погрузки [102, 114]. Карьерный транспорт является связующим звеном в технологическом процессе. От четкой работы карьерного транспорта зависит эффективность разработки месторождения. Перемещение карьерных грузов является трудоемким процессом, от четкости организации которого зависит экономичность всех других процессов открытых разработок.

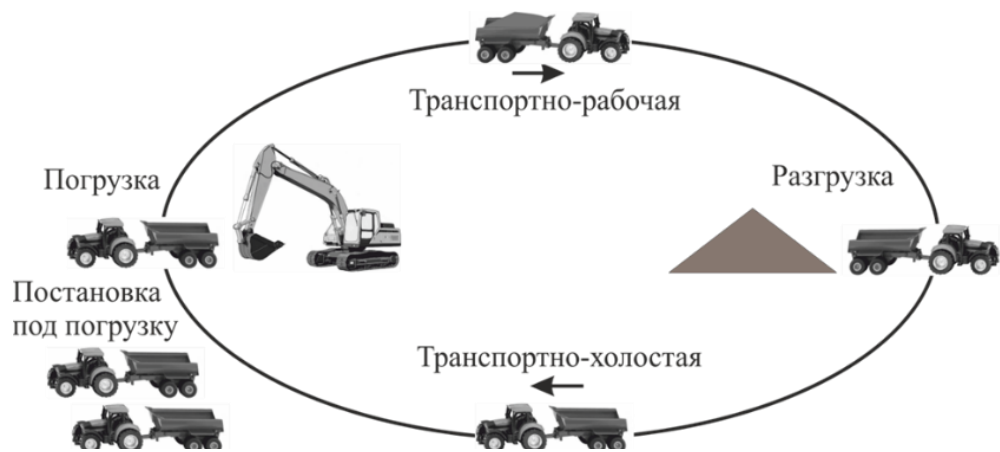


Рисунок 1 – Схема циклического транспортирования экскавированного сырья от забоя до отвала

Ряд факторов, влияющих на производительность, такие как модель экскаватора, модель транспортного агрегата, погодные условия, горно-технические условия, сменный режим работы, согласование транспортного агрегата с экскаватором и т.д., были использованы для оценки производительности с использованием данных времени выемочно-транспортного цикла.

Использование времени выемочно-транспортного цикла для измерения производительности карьера сосредоточено на одном из составляющих общего времени цикла, в то время как другие исследования рассматривают все компоненты для выявления узких мест в производственной мощности [72].

Параметры карьера должны обеспечивать эффективное использование выемочно-транспортного оборудования [71]. Разработку торфяной залежи рационально вести на всю ее глубину ниже уровня стоянки экскаватора обратная лопата, рассматриваемого в качестве выемочного оборудования [35].

Ширина рабочей площадки карьера определяется из условия свободного размещения оборудования и прохода машин, руководствуясь нормами технологического проектирования предприятий промышленности нерудных строительных материалов [72].

Выбор горнотранспортных агрегатов для транспортирования экскавированного торфяного сырья при его натуральной влажности должен соответствовать природным условиям торфяного карьера и обеспечивать эффективную и безопасную работу на карьере в конкретных горно-геологических условиях.

При выборе той или иной марки транспортных машин необходимо руководствоваться [56].

- способностью выбранного ГТА обеспечивать выполнение транспортной операции;
- возможностью достигнуть максимальных показателей использования машин в конкретных горнотехнических условиях.

Для эффективной работы выемочно-транспортного комплекса рекомендуемым соотношением при выборе типоразмера ковша выемочного экскаватора и кузова транспортного средства является условие погрузки кузова в 3-5 ковшей (циклов экскавации) [82]. По трудности экскавации торфяная залежь относится к I категории грунтов и для повышения объемов добычи на торфяных карьерах, следует использовать гидравлические гусеничные экскаваторы [27].

Принятая проходка экскаватора (траектория его движения) должна обеспечивать требуемую ширину разработки карьера [71, 116]. Экскаваторы, оборудованные обратной лопатой, разрабатывают забой тупиковыми (траншейными) и боковыми (торцовыми) проходками в зависимости от условий выемки и проходкой при перемещении зигзагом. При выемке торфяного сырья со всей глубины торфяной залежи в ковше при срезании стружки (толщиной 0,10-0,15 м) с откоса забоя происходит перемешивание и усреднение торфяного сырья, а после осуществляется первичная сепарация крупных древесных включений, не попавших в выемочный ковш, которые сбрасываются с откоса на дно карьера [55].

Проходкой при перемещении зигзагом (рисунок 2) экскаватор продвигается внутри очертания разработки, вдоль разрабатываемого периметра,

оставляя позади себя уже выбранную часть залежи, при этом глубина разработки достигает максимальных значений.

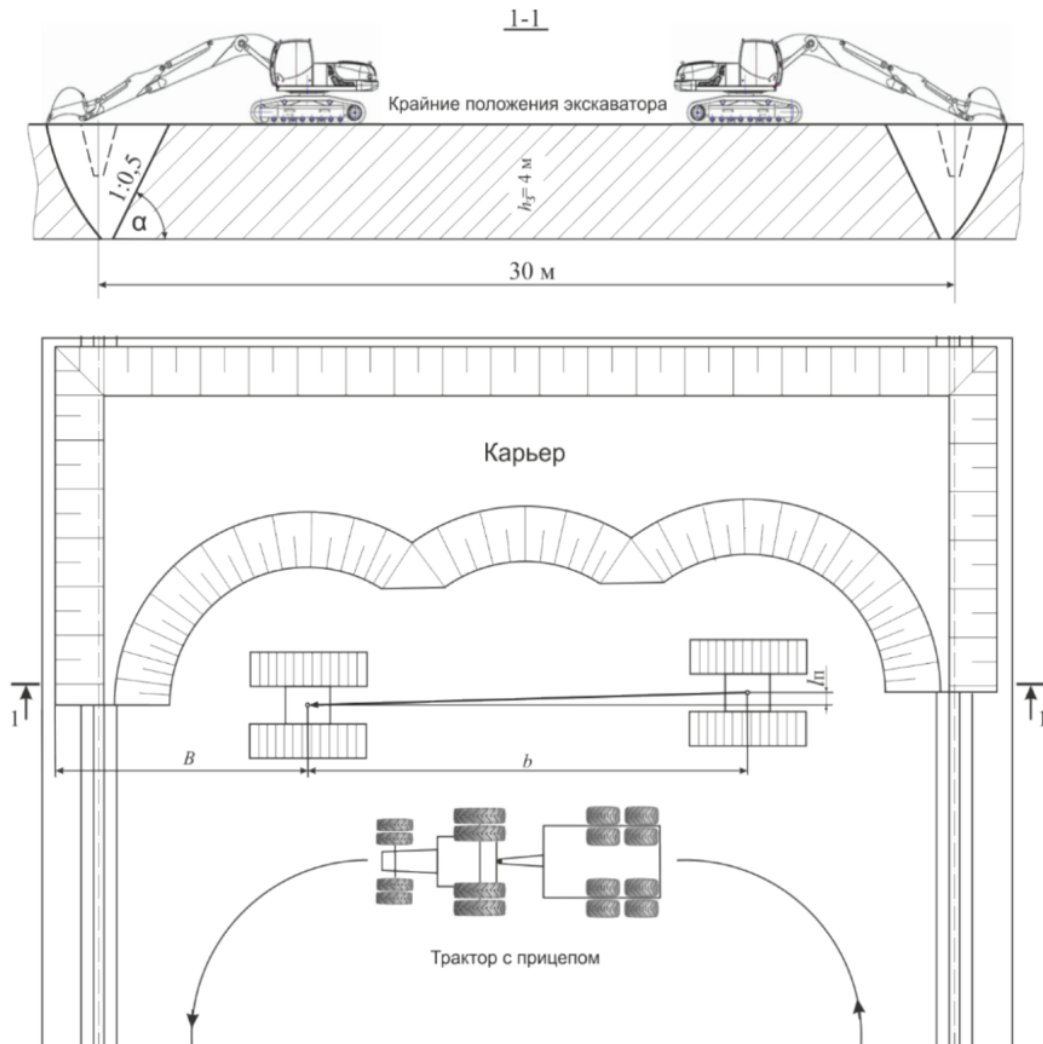


Рисунок 2 – Схема проходки при перемещении экскаватора по зигзагу:

b – ширина передвижки экскаватора, м; $l_{п}$ – длина передвижки экскаватора, м

После выемки торфяное сырье погружается в кузов ГТА. Согласно обеспечению максимальной производительности процесса технологичным является перемещение ГТА вдоль выработки для снижения побочных маневров. Ширина разрабатываемой рабочей площадки по условиям осушения принимается равной 30 м (рисунок 2) [27, 82, 116].

Проходка при перемещении зигзагом обеспечивает максимальную производительность экскаватора, что объясняется наименьшим преодолеваемым стрелой расстоянием и удобной подачей транспортных

средств под погрузку и минимальными простоями при перемещении и сменяемости горнотранспортных агрегатов [55].

В горнодобывающей промышленности быстро развиваются системы внутрикарьерной переработки и транспортирования переработанного сырья IPCC (In-Pit Crushing and Conveying) [108]. Экономическая эффективность и высокая надежность систем IPCC по сравнению с традиционными системами экскаватор-самосвал, делают их более привлекательными для использования в современных технологиях добычи полезных ископаемых. Данные системы позволяют проводить первичную переработку сырья, отделить отходы производства, сократить объемы внутрикарьерных перевозок и транспортные расходы.

Под операциями внутрикарьерной переработки материалов подразумеваются все единичные операции по выемке, погрузке, первичному дроблению, внутримассивному транспортированию и компактированию сырья.

Ближайшие перспективы промышленного освоения месторождений торфа для производства продукции агропромышленного и природоохранного комплексов требуют значительных затрат на сушку экскавированного торфяного сырья. Для обеспечения заданного качества продукции в условиях карьерной добычи особое внимание уделяется интенсификации процессов и, в первую очередь, наиболее продолжительному – естественной сушке компактированного торфяного сырья [88]. В связи с этим внимание уделяется исследованиям по концепции ответственной добычи и анализу существующих и альтернативных подходов к горным работам, максимальному использованию ценных компонентов месторождения (основных, второстепенных и сопутствующих).

Применение внутрикарьерных дробильно-транспортных систем (ВДТС) характеризуются экономической эффективностью, снижением трудозатрат, затрат на транспортировку, расхода топлива по сравнению с обычными самосвалами и общеизвестны [107]. Открытая разработка – это

процесс разработки торфяной залежи путем разработки глубокого карьера с использованием одного горизонтального уступа [116]. Одной из сложных проблем ведения горных работ открытым способом является выбор рационального парка экскаваторов и самосвалов. Эта проблема включает в себя выбор парка экскаваторов и самосвалов и разработку долгосрочного графика добычи, минимизирующего транспортные и другие фиксированные затраты [98]. Глубокая выемка грунта является наиболее экономичным способом разработки торфяной залежи [144].

ГТА является связующим звеном между машинами внутрикарьерного комплекта и оборудованием за пределами карьера [45]. Торфяное сырье выгружается в отвал, из которого забирается навесным на экскаватор многофункциональным модулем для компактирования и укладки компактов на площадку сушки. На рисунке 3 показана структурная схема мобильного комплекта оборудования.

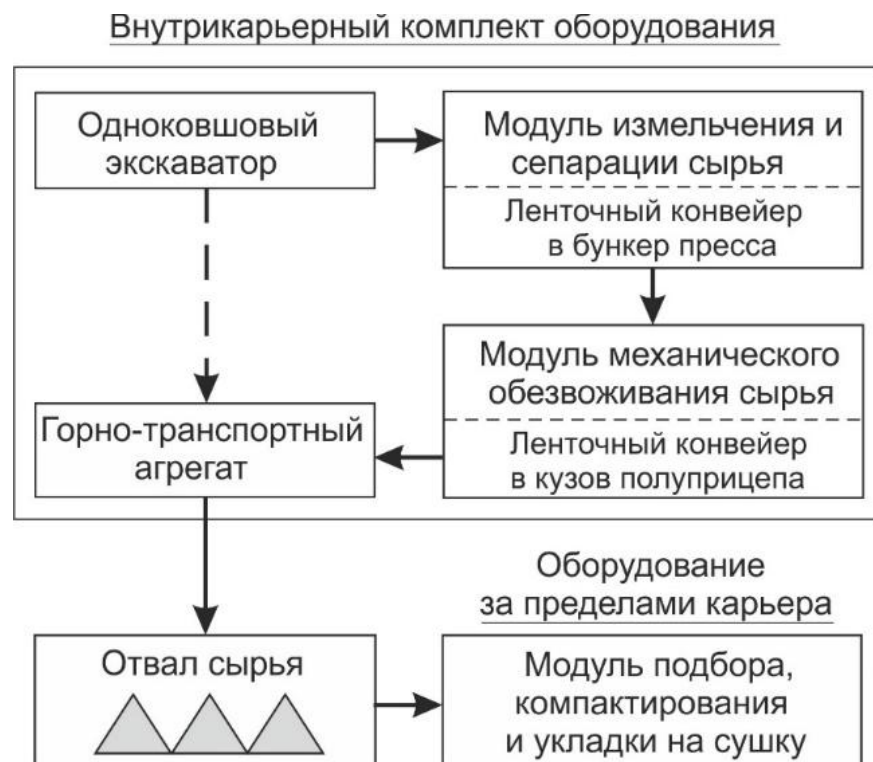


Рисунок 3 – Структурная схема мобильного комплекта оборудования

Существует два варианта технологического процесса в комплексном механизированном карьере от экскавации до вывозки в отвал торфяного сырья:

- 1) Полный процесс, включающий внутрикарьерные операции:
 - выемка сырья с его усреднением и сепарацией крупных древесных включений;
 - измельчение сырья с его усреднением и сепарацией мелких древесных включений;
 - механическое обезвоживание сырья;
 - конвейерное транспортирование сырья;
 - транспортирование сырья в отвал.
- 2) Упрощенный процесс:
 - выемка сырья с его усреднением и сепарацией крупных древесных включений;
 - транспортирование сырья в отвал.

Упрощенный процесс может найти практическое применение при производстве земляных работ с выемкой и заменой слоя слабых грунтов при организации геологоразведочных и буровых работ в условиях северного умеренного пояса и Арктики, при прокладке трубопроводов, строительстве дорог, зданий и сооружений [106, 120].

Тракторные перевозки являются наиболее распространенным способом транспортировки торфяного сырья на стационарные заводы для последующей механической и/или термомеханической переработки. Затраты на транспортировку всегда составляют значительную часть капитальных и эксплуатационных затрат крупных торфяных компаний. Затраты на дизельное топливо для трактора значительны и могут составлять от 15 до 35 % себестоимости продукции. Количество транспортных средств увеличивается с увеличением расстояния перевозки. Полуприцепы в составе тракторных агрегатов хорошо подходят для коротких плеч перевозок (менее двух километров) [131].

Экономическая эффективность и высокая надежность систем ИРСС и грузовиков по сравнению с обычными системами самосвалов делают их

более привлекательными для использования в современных горных работах [122].

Системы IPCC привлекательны низкими эксплуатационными расходами. Добыча торфяного сырья карьерным методом предусматривает интеграцию двух дополнительных установок: измельчительной и обезвоживающей. Измельчительная установка включает в себя бункер, фрезерный барабан и выдающий ленточный конвейер. Установка обезвоживания включает бункер, одношнековый пресс, ленточный конвейер и бункер отжатой воды. Эти установки отличаются непрерывностью процесса и имеют относительно простую конструкцию. После предварительной механической переработки экскавированное торфяное сырье становится более чистым (без древесины), смешанным, измельченным и содержит меньше воды. Основной причиной внедрения мобильных установок предварительной механической переработки экскавированного торфяного сырья является снижение затрат на внутрикарьерное транспортирование сырья по пути к отвалу или на перерабатывающий завод.

Современные системы карьерной добычи и транспортирования торфяного сырья должны базироваться на наиболее эффективных схемах типа IPCC с включением предварительной переработки экскавированного торфяного сырья. Транспортирование экскавированного торфяного сырья может осуществляться как после предварительной переработки, так и после выемки по упрощенной схеме (рисунок 3). При этом сохраняется использование традиционной системы выемочно-транспортного комплекта оборудования – экскаватор-самосвал [46, 87].

1.2 Анализ горнотехнических условий внутримассивного транспортирования торфяного сырья

Транспортирование экскавированного торфяного сырья за пределы добычного карьера – наиболее трудоемкий и энергозатратный процесс,

который зависит от условий эксплуатации оборудования в трудных природно-климатических условиях (на торфяных месторождениях) [34, 54].

Фактическое давление колеса транспортного средства трудно оценить, поскольку реальная площадь контакта зависит от характеристик упругой шины и деформируемого упруго-вязко-пластичного грунта.

Различные факторы влияют на проходимость транспортных средств, включая прочность грунта, липкость, скользкость, критический слой грунта и влажность. Торфяная залежь относится к наиболее сжимаемым грунтам. При давлении 100–200 кПа осадка торфа может составлять 30-50 % первоначальной высоты слоя [49].

Восстанавливающаяся сама по себе или обратимая деформация носит название упругой. Внешние силы, деформируя тела, совершают работу, которая при упругой деформации переходит в накапливаемую телом потенциальную энергию деформации. При снятии нагрузки эта энергия расходуется на восстановление первоначального размера и формы тела [17, 49].

Эти напряжения, являющиеся остаточными по отношению к прежней нагрузке, обычно называют начальными по отношению к напряжениям от вновь приложенной нагрузки. При активном деформировании возрастает упругая и пластическая часть деформации, при разгрузке упругая уменьшается, а пластическая часть остается постоянной [17, 49].

В результате такая упругопластическая система может после разгрузки только частично восстановить свое первоначальное состояние, и в ней останутся внутренние (остаточные) напряжения [49, 92].

При увеличении давления под колесом развиваются процессы уплотнения грунта, в соответствии с теорией линейного деформирования. Как следствие, возникает осадка колеса [49, 86].

В теории линейной упруговязкости широко распространен метод модельного отображения реологических свойств тела, исходящий из

представления, что эти свойства определяются сочетанием упругих, вязких и пластических характеристик [49].

Если использовать механические модели для рассмотрения только качественной стороны процесса, то модель обобщенного упруговязкого тела позволяет описать взаимодействие как процесс упругого последействия, так и процесс релаксации (рисунок 4) [49].

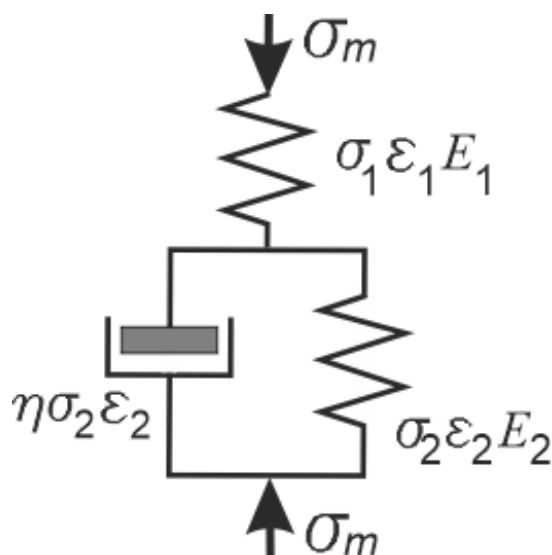


Рисунок 4 – Механическая модель обобщенного упруговязкого тела для описания поведения критического слоя торфяной залежи при проезде колеса

Механическая модель обобщенного упруговязкого тела для описания поведения критического слоя торфяной залежи при проезде колеса (тело Зинера) представляет собой последовательное соединение упругого элемента и тела Кельвина.

На стадии уплотнения торфяной залежи сопротивление оказывается элементами трехфазной системы. На схеме реологической модели напряжения воспринимаются упругим элементом Гука в соответствии с модулем упругости твердой фазы (мгновенная упругая реакция). Происходит взаимное перемещение частиц твердой фазы с уплотнением и выделением воздуха из порового пространства ($\sigma_1, \epsilon_1, E_1$).

С ростом деформаций начинается движение воды в поровом пространстве с выжиманием жидкой фазы и проявляется вязкое

сопротивление, отображаемое вязким элементом Ньютона (η , σ_2 , ε_2). Отмечается медленная упругая деформация за счет узла Кельвина (σ_2 , ε_2 , E_2).

В классической деформационной теории пластичности одним из условий принимается, что напряженное и деформированное состояния подобны. Сдвиговая деформация грунта зависит как от интенсивности касательных напряжений, так и от среднего нормального напряжения, а внутреннее трение проявляется не только в предельном, но и в допредельном состояниях [49].

В грунте развиваются объемные деформации не только под действием среднего нормального напряжения σ , но и в результате сдвига τ (дилатансия), поскольку при действии сдвигающей силы частицы грунта начинают переупаковываться. Предельное сопротивление сдвигу торфа в значительной степени зависит от его плотности, влажности и обусловлено главным образом сцеплением, так как угол внутреннего трения мал. Положение быстро изменяется с уплотнением торфа нагрузкой. В этих условиях угол внутреннего трения $\varphi = 10...22^\circ$, а удельное сцепление $c = 10...30$ кПа [20, 48].

Обобщенное уравнение деформирования грунтов можно записать в виде (1) [17]

$$\gamma_i = f(\tau_1, \sigma_m, t); \varepsilon_m = f^*(\tau_1, \sigma_m, t). \quad (1)$$

Это уравнение связывает сдвиговую и объемную деформации с интенсивностью касательных напряжений, средним нормальным напряжением и временем [49].

С учетом изложенных выше особенностей деформирования грунта исходные положения деформационной теории, выраженные соотношениями, можно сформулировать в следующем виде: изменение объема грунта в колее следа колеса ε_m складывается из деформации под воздействием среднего нормального напряжения σ_m и деформации, обусловленной воздействием интенсивности касательных напряжений τ_i . Наибольшая прочность отвечает моменту $t = 0$ и может быть условно названа мгновенной прочностью.

Дальнейшее увеличение нагрузки от веса транспортного средства будет приводить к еще большему росту зон пластических деформаций до тех пор, пока они не объединятся в области, практически полностью охватывающие верхнюю часть грунта. При этом при проходе колеса по сторонам колеса на поверхности грунта образуются по бокам валы выпирания. Объемная деформация грунта в колее при проезде колеса транспортного средства развивается во времени почти мгновенно и включает в себя обратимую и необратимую части; деформация ε_m зависит также от вида напряженного состояния, определяемого параметром Лоде [17, 49] без перехода в предельное напряженно-деформированное состояние (2)

$$\varepsilon_m = f^*(\sigma_m, \tau_i, \mu_\sigma, t). \quad (2)$$

Образование колеи обычно проходит по схеме раздавливания слабого грунта: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. В этом случае параметр Лоде-Надаи μ_σ (3) [18]

$$\mu_\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) = -1. \quad (3)$$

Параметр μ_σ , оценивающий напряженное состояние по относительной величине среднего главного напряжения и влияние второго главного напряжения является показателем девиатора напряжений [113].

В механике грунтов торфяную залежь отождествляют со связными грунтами. Основным условием прочности или предельного состояния органоминеральных грунтов является условие Кулона-Мора (4) [119]

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где τ – величина инварианта касательных напряжений, кПа;

C – величина инварианта сцепления грунта, кПа;

σ – величина инварианта нормальных напряжений на грунт, кПа;

φ – угол внутреннего трения грунта, град.

Соотношение главных напряжений определено зависимостью [113] и является функцией угла внутреннего трения φ (5):

$$\sigma_3/\sigma_1 = \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \varphi/2). \quad (5)$$

Определяющие инварианты (6), (7), (8) описывающие напряженное состояние в элементарном объеме среды и влияние второго главного напряжения [30]

$$\tau_{max} = T = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad (6)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}; \quad (7)$$

$$\mu_\sigma = \frac{\sigma_2 - \sigma_n}{T}. \quad (8)$$

Массу транспортного средства выдерживает верхний критический слой грунта с неразложившимися растительными волокнами, составляющими сложно переплетенный каркас и придающий поверхности залежи заметную связность. Глубина критического слоя зависит от типа торфяной залежи, прочности и веса транспортного средства, а также количества проходов по колее. Прочность грунта на сдвиг определяет несущую способность и тяговое усилие и, следовательно, проходимость транспортного средства.

По Амаряну Л.С. [3] значение величины удельного давления более 38-50 кПа соответствует хорошей проходимости обычных гусеничных и даже колесных машин. Торфяная залежь, характеризуется допустимым нормальным давлением q , и пределом прочности на сдвиг τ . Эти величины характеризуют ограничения удельного давления в пятне контакта шин с грунтом, превышение которых означает повышенное буксование и возможное застревание машин в слабом грунте.

Несущая способность торфяной залежи по оценке ряда исследователей представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Несущая способность различных грунтов

Грунт	Несущая способность торфяной залежи, кПа				
	Huvarinen and Ahokas [105]	Rowland D. [132]	Saarilahti [136]	Танклевский М.М. [79]	Амарян Л.С. [3]
Торфяная залежь	10-40	5-15	24-30	23	3,7-22
Торфяная залежь осушенная	-	30-50	-	38-48	38 – 50

По оценке ряда исследователей, указанных в таблице следует, что как тип грунта, так и его влажность существенно влияют на несущую способность грунтов.

Танклевский М.М. [79] рекомендует следующие значения среднего допустимого давления для колесных опор машин на торфяной залежи:

- при осушении и подготовке торфяной залежи к эксплуатации – 23 кПа;
- при производстве фрезерного торфа – 38 кПа;
- при производстве кускового торфа – 48 кПа.

Owende и др. [121] разделили несущую способность грунтов на три категории: низкую менее 40 кПа, средняя 40-80 кПа и высокая несущая способность более 80 кПа на основе трех характеристик грунта: индекс конусности, предел прочности на сдвиг и модуль упругости (таблица 2).

Таблица 2 - Категории несущей способности грунта

Категории несущей способности грунта	Индекс конусности, кПа	Модуль упругости, кПа	Предел прочности на сдвиг, кПа
Низкая < 40 кПа	<300	<20	<20
Средняя: 40–80 кПа	300 – 500	20 – 60	20 – 60
Высокая >80 кПа	> 500	> 60	> 60

Представленная в таблице 2 обобщенная информация по категориям несущей способности грунта может быть основой для прогнозирования многократной проходимости транспортных агрегатов по слабым грунтам.

По классификации типов грунтов и прочности на сдвиг в механике грунтов разделяют различные типы грунтов на две группы:

- фрикционные грунты,
- связные грунты.

Для связных грунтов важны характеристики прочности, влажности и пластичности, структуры, плотности в ненарушенном состоянии. Для достижения единообразия в оценке консистенции грунтов используется

классификация Терцаги, основанная на прочности на одноосное сжатие, в качестве предварительной оценки [81]. Эта классификация приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Классификация консистенции грунтов по Терцаги

Неограниченная прочность на сжатие, кПа	Состояние консистенции
<24	текучее
24 - 48	текучепластичное
48 - 96	мягкопластичное
96 - 192	тугопластичное
192 - 384	полутвердое
>384	твердое

Основным методом обеспечения проходимости транспортных машин по слабым грунтам является увеличение площади контактной поверхности колесного транспорта, поэтому колесные машины рекомендуется оборудовать сдвоенными флотационными шинами, в отдельных случаях дополнительным использованием резинометаллических съемных гусениц. Более уточненный выбор колесного хода зависит от несущей способности слабого грунта [31, 73].

Торфяные грунты, как правило, имеют очень низкую проходимость из-за высокого содержания влаги и относительно низкой плотности торфяной залежи как в естественном, так и частично осушенном состоянии (780-990 кг/м³) [78].

Транспортировка экскавированного сырья в кузове ГТА осуществляется многократно по рабочей площадке карьера, поэтому объем кузова транспортного средства необходимо определять в соответствии с проходимостью и с несущей способностью торфяной залежи при многократном проезде транспортного агрегата.

Таким образом, для разработки торфяных месторождений необходим парк технологического оборудования, способный эффективно выполнять транспортные операции. В силу влияния условий эксплуатации,

транспортирование влажного экскавированного торфяного сырья может осуществляться только подготовленным специальным горнотранспортным агрегатом, с рациональными конструктивными параметрами кузова в соответствии с проходимостью по слабым грунтам.

Оснащение транспортных средств пневматическими колесами зависит от типоразмеров шин и конструктивных параметров, допустимых нагрузок и соответствующим давлением воздуха в шинах для установления допустимого статического прогиба шины в различных условиях эксплуатации при номинальной контурной площади пятна контакта шины с опорным основанием [47].

Проходимость транспортного агрегата также зависит, от размерно-массовых параметров (габаритов и веса) машины, количества осей и колес, а также характеристик самих колес. На выбор параметров транспортного средства влияет также характеристики перевозимого груза (насыпная плотность, влажность и др.).

Множественность проезда ГТА может быть обеспечена снижением сопротивлений, преодолеваемых тяговым устройством агрегата.

Подход к определению условий проходимости транспортного оборудования позволяет классифицировать слабые грунты на территории механизированного карьера по критерию их несущей способности.

Торфяная залежь – малопрочное и легкодеформируемое основание, по которому перемещаются транспортные машины. Поэтому выбор типа и необходимых размеров опорных поверхностей ходового устройства машины производится с учетом деформационных и прочностных свойств верхнего слоя торфяной залежи, характеризующих ее поведение при воздействии внешних нагрузок [73]. Степень разложения торфа влияет на среднюю влажность разрабатываемого слоя торфяной залежи [50]. Добыча производится на торфяных залежах всех типов, сложенных из видов торфов (таблица 4).

Таблица 4 – Нормативные значения характеристик торфяной залежи при карьерном способе добычи торфяного сырья [78]

Степень, разложения торфа, %	Характеристики торфяной залежи			
	Низинный тип		Верховой и переходный типы	
	эксплуатационная влажность, %	плотность, кг/м ³	эксплуатационная влажность, %	плотность, кг/м ³
15-20	88,5	798 - 874	89,0	786 - 869
21-30	87,5	841 - 891	88,5	853 - 949
31-40	87,0	923 - 979	88,0	934 - 982
>40	86,0	953 - 975	87,0	967 - 988

Анализ данных таблицы 4 показывает, что нормативные значения влажности торфяной залежи имеют достаточно высокие значения, определяющие именно функциональность горнотранспортных агрегатов при транспортировании экскавированного торфяного сырья с высокой насыпной плотностью по поверхности рабочей площадки карьера.

Следует отметить относительно малую насыпную плотность перевозимого экскавированного торфяного сырья 800-900 кг/м³ по сравнению с добываемыми минеральными полезными ископаемыми [78].

Движение ГТА по слабому грунту оценивается «проходимостью» – способностью двигаться по деформируемой опорной поверхности (опорная проходимость).

У тяговых агрегатов эффективная мощность двигателя трактора реализуется через крюк прицепного устройства. Горизонтальная реакция грунта на грунтозацепы ведущих колес трактора определяет движущую силу (касательная сила тяги) P_k . Величина касательной сила тяги зависит как от технических параметров трактора (мощности двигателя, трансмиссии, ходовой системы), так и от характеристик поверхности слабого грунта (прочность, плотность, влажность).

Общее сопротивление движению ГТА определяется:

- силой сопротивления движению трактора;
- силой сопротивления движению полуприцепа R_a , равной силе тяги на крюке трактора $P_{кр}$;

- силой веса трактора $G_{тр}$ и полуприцепа G_n .

Нормальное тяговое усилие трактора $P_{кр}$ ограничивается предельно допустимым значением буксования δ_0 на торфяной залежи. Применение для вывозки торфа колесного трактора со сдвоенными колесами при работе на верховой залежи буксование составляет до 23 % [44].

Анализ данных по эксплуатации колесных тракторов на торфяной залежи показывает, что коэффициент сопротивления передвижению ГТА определяется массой груженого полуприцепа и скоростью передвижения агрегата 0,13...0,19 (среднее 0,16) [44]. Сила тяги на крюке трактора для колесного порожнего полуприцепа изменяется от 2,5 до 4,0 кН, для груженого ($G_2 = 5700$ кг) – от 11,5 до 15,0 кН [43].

Например, для колесного прицепа с колесами диаметром $D = 1,1$ м и шириной $B = 1,2$ м из условия проходимости рекомендуется при перевозке фрезерного топливного торфа иметь объем кузова 18...23 м³; при перевозке торфа для приготовления компостов – 15...20 м³; при перевозке подстилочного торфа – 43...50 м³; при перевозке торфяного сырья иметь объем кузова 10...15 м³ [44]. Исследованиями установлено, что ограничения по объему кузова прицепов определяются не энергонасыщенностью тракторов из числа используемых в торфяной промышленности, а условиями проходимости груженого агрегата по торфяной залежи [44].

Стоит отметить факт углубления существующих неровностей на поверхности торфяного поля при многократных проходах транспортного агрегат [44]. Снижение проходимости наблюдалось у колесных полуприцепов и наступало преимущественно в апреле-мае и в сентябре-октябре при снижении предела прочности на сдвиг поверхностного слоя залежи $\tau < 15$ кПа [44]. После выпадения осадков более 10 кг/м² увеличивается буксование колесного трактора даже при незначительной осадке колес полуприцепа [44].

В большинстве работ характеристики опорной поверхности, необходимые для анализа параметров проходимости ГТА, представлены в

табличном виде, работать с которыми не всегда удобно. Желательно иметь простые аппроксимированные зависимости, связывающие физические и механические характеристики деформируемых опорных поверхностей. Это значительно расширяет возможности оценки проходимости ГТА по слабому грунту.

1.3 Обзор и анализ технологического оборудования для внутримассивного транспортирования торфяного сырья

В настоящее время идет широкое освоение территорий, сложенных слабыми водонасыщенными грунтами. Актуальность определяется необходимостью разработки транспортного оборудования высокой проходимости, способного эффективно выполнять транспортные задачи на обширных бездорожных территориях в различных регионах страны.

Тракторный транспорт находит широкое применение в сельском и лесном хозяйстве, горнодобывающей промышленности, в строительстве. Транспортирование насыпных материалов осуществляется во всех природно-климатических зонах страны. При этом наиболее широкое применение в транспортных схемах находят трактора тягового класса 1,4-2,0. Создание тракторных прицепов, отвечающим требованиям производства работ на слабых грунтах, требует разработки общей концепции ГТА и обоснования его структуры, принципов агрегатирования, конструктивного исполнения и анализа основных технико-эксплуатационных показателей.

Специфика горно-геологических условий эксплуатации горнотранспортных агрегатов определяет ряд характерных требований к структуре и параметрам ГТА в рамках используемых технологий производства:

- трактор-тягач является частично грузонесущим звеном транспортного агрегата;
- малые транспортные плечи и, соответственно, частые разгрузки полуприцепа;

- движение ГТА по слабым грунтам с ограничением по массе перевозимого груза [32] и скорости движения;
- применение флотационных шин и метода сдваивания колес как на трактор, так и на полуприцепе для снижения удельного давления на грунт.

Ограничения по параметрам проходимости ГТА не позволяют применять на стадии проектирования характерные для горной промышленности принципы интенсификации: применение более мощных тракторов и увеличение объема кузова транспортных прицепов.

Транспортная концепция позволяет обосновать тип и вид транспорта торфяного сырья в пределах торфяного массива. Принципы, заложенные при выработке транспортной концепции, учитывают применение колесных тракторных агрегатов, базируемых на отечественном серийном оборудовании, адаптацию к внешним условиям эксплуатации, унификацию и многофункциональность.

Эффективность применения карьерного транспорта, обуславливается его основными достоинствами, к которым относятся:

- высокая мобильность и маневренность, благодаря малым радиусам поворота;
- относительно небольшие размеры транспортных средств;
- отсутствие необходимости в обустройстве специальных путей;
- автономность и обеспечение большей оперативности управления и гибкости транспортного процесса;
- высокая маневренность карьерного транспорта позволяет повысить эффективность процесса отвалообразования транспортируемого сырья;
- затраты на строительство внутрикарьерных дорог отсутствуют.

К особенностям внутрикарьерного транспорта следует относить:

- небольшие экономически целесообразные расстояния транспортировки экскавированного сырья (до 5 км);

- высокий уровень унификации и взаимозаменяемости применяемого оборудования;
- относительно низкая зависимость от изменяющихся метеорологических условий;
- пониженный расход шин карьерного транспорта при эксплуатации на низкофрикционных грунтах.

На производительность карьерного транспорта влияет ряд факторов [14]:

- горно-геологические условия и физико-механические свойства перевозимого торфяного сырья;
- климатические условия производства открытых горных работ;
- техническое состояние и структура парка ГТА (типы применяемых тракторов, их техническое состояние, состояние производственно-технической базы, квалификация обслуживающего персонала и т.п.).

Для выполнения транспортных задач на слабых грунтах предпочтительным является применение ГТА, состоящего из тягового устройства (трактора) и транспортного средства. Известно, что использование прицепных звеньев в составе автопоезда повышает производительность до 60 % по сравнению с производительностью грузовиков без прицепов [70].

Прицепы и полуприцепы тракторные состоят из ходовой части с колесами, рамы, кузова, подъемного механизма, прицепного приспособления. Оборудование имеет много модификаций, которые отличаются друг от друга характеристиками и особенностями.

Полуприцепы соединяют с трактором посредством гидрокрюка либо сцепного устройства. Полуприцеп обладает достаточной маневренностью даже при движении задним ходом. Масса полуприцепов, как правило, на 20-30 % меньше, чем у прицепов. Трактор с полуприцепом при эксплуатации на слабых грунтах более надежен.

Среди рассмотренных транспортно-технологических систем наибольшее распространение получили полуприцепы тракторные самосвальные. Связь полуприцепа с тягачом служит не только для передачи тягового усилия. По конструктивным особенностям полная масса полуприцепа распределяется не только на оси, но и на задний мост тягача. Нагрузка на опорно-сцепное устройство может достигать 30...40 % от всей массы полуприцепа. Эти машины обладают высокой маневренностью, низкими затратами операционного времени при разгрузке. Таким образом, при равной грузоподъемности ходовая часть полуприцепа несет меньшую нагрузку. Однако прицеп аналогичной грузоподъемности должен иметь либо больше осей, либо усиленную конструкцию несущих элементов, что по расчетам увеличивает массу прицепа в снаряженном состоянии на 4...8%. Все это означает, что применение седельной схемы для тяжелого автопоезда вместо прицепной кроме уменьшения полной массы дает возможность при той же грузоподъемности снизить осевую нагрузку на поверхность дороги. Исходя из разницы масс потребная мощность двигателя седельного автопоезда на 35...40 % меньше, чем прицепного, что свидетельствует о более высоких экономических показателях эксплуатации [70]. Транспортировка экскавированного торфяного сырья на карьере может осуществляться посредством применения ГТА. Полуприцепы широко используются также в лесной и сельскохозяйственной отраслях промышленности.

1.3.1 Анализ применения колесных тракторов на слабых грунтах

Одной из задач исследования является повышение эффективности использования горнотранспортных агрегатов на базе колесных тракторов тягового класса 2,0 за счет подбора рациональных параметров агрегата при модульной системе агрегатирования тягово-транспортного назначения. 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 1,4 в агропромышленном, лесном и строительном секторах народного хозяйства, а также с учетом особенностей эксплуатации на слабых грунтах и необходимости обеспечения требуемой силы тяги в работе за основу комплектования агрегата принят трактор BELARUS-1221.4 [11]. Данный трактор предназначен для выполнения различных транспортных работ с навесными, полунавесными и прицепными машинами и оборудованием. Конструкция трактора выполнена по схеме 4К4а и имеет два ведущих моста. На рисунке 5 представлен общий вид трактора BELARUS-1221.4 на сдвоенных колесах [11]. Основные параметры и технические характеристики трактора BELARUS-1221.4 приведены в Приложении А.



Рисунок 5 – Трактор BELARUS-1221.4 на сдвоенных колесах

К особенностям данной модели трактора следует отнести следующие возможности дополнительной комплектации:

- механический ходоуменьшитель;
- сдваивание колес;
- переднее навесное устройство.

Мощность двигателя трактора-тягача можно определить по уравнению тягового баланса (9)

$$N_e = \frac{fGv}{\eta_e \eta_{тр} \eta_k}, \quad (9)$$

где N_e – максимальная эффективная мощность двигателя трактора, кВт;

v – допускаемая скорость агрегата, м/с;

f – коэффициент сопротивления передвижению (0,02...0,025 для колесной машины);

G – полный вес машины, кН;

η_e – КПД двигателя, трансмиссии и колесного движителя соответственно [58].

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

На примере оценки тягово-экономических показателей трактора Т-150К со сдвоенными колесами потери на перекачивание и буксование составляют тяговый КПД до 0,48. Показатели максимальной тяговой мощности и удельного расхода топлива 25 % [44].

1.3.2 Обзор и анализ тракторных транспортных устройств

Процесс технического оснащения транспортными средствами определяет необходимость адаптации технологических решений, а также максимального учета условий их функционирования.

Полуприцеп в составе ГТА является ведомой транспортной единицей, чрезмерная нагрузка на которую при эксплуатации на слабых грунтах может нарушить стабильность процесса транспортирования экскавированного торфяного сырья.

Размеры, масса, мощность и структура ГТА в соответствии с заданной целью функционирования определяются непосредственно исходя из условий эксплуатации ГТА и его назначения [10]. Элементы системы «грунт-машина» приведены на рисунке 6.

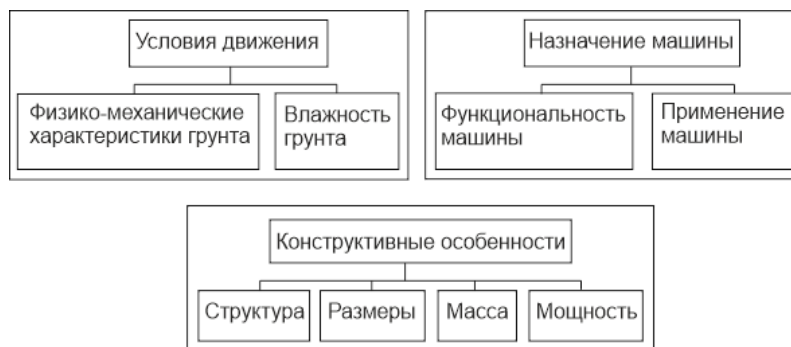


Рисунок 6 - Элементы системы «грунт - транспортное средство»

Важнейшим техническим показателем тракторного прицепа является грузоподъемность, пропорционально связанная с объемом кузова. Практика показывает, что при перевозке торфяного сырья в одних случаях грузоподъемность недоиспользуется, в других наблюдается перегрузка. Следствием существенного превышения массы груза над грузоподъемностью часто является потеря проходимости [44, 61].

Для конкретного тракторного поезда технико-экономические показатели определяются главным образом массой перевозимого груза и скоростью движения. Каждая из этих величин, в свою очередь, ограничивается дорожными условиями. Величина полной массы прицепного устройства m_n ограничивается условиями взаимодействия движителей трактора с поверхностью грунта, а скорость движения v – в основном плавностью хода [44]. Классификация условий эксплуатации ГТА [61] с позиций ограничений, накладываемых условиями проходимости на величину m_n и v .

Транспортирование экскавированного торфяного сырья должно обеспечивать перевозку сырья насыпной плотностью $750-850 \text{ кг/м}^3$ при максимальном использовании грузоподъемности транспортного средства.

Мероприятия для совершенствования конструкций полуприцепов можно обобщить признаками [61]:

- повышение единичной грузоподъемности до допустимых пределов;

- снижение собственной массы для увеличения номинальной грузоподъемности или снижения удельного давления на грунт;
- применение шин с минимальным удельным давлением на грунт [61, 62].

Весь диапазон дорожных условий, в которых эксплуатируются тракторные поезда, предлагается разделить на четыре категории (таблица 5) [62].

Таблица 5 – Классификации условий эксплуатации по типу ограничений на эксплуатационные показатели ГТА

Категории условий эксплуатации	Диапазон значений эксплуатационных параметров	
	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	$m_n \leq m_{n \text{ пред}}$	$v \leq v_{\max}$

IV категория условий эксплуатации соответствует слабым грунтам, на которых действует ограничение на полную массу прицепного звена по условиям сцепления ведущих колес трактора.

Потребительские качества выпускаемых транспортных средств, их номенклатура и технический уровень не в полной мере соответствуют требованиям торфяного производства [61].

Тракторные прицепы по конструкции подразделяются на прицепы и полуприцепы. В прицепе общий вес распределяется между передней и задней осями. В полуприцепе общая масса распределяется на гидрокрюк тягача и ось полуприцепа. В функциональном отношении полуприцеп обладает хорошей маневренностью, особенно при движении задним ходом, его конструкция проста, а вес на 20-30 % меньше, чем у прицепа. В тяжелых дорожных условиях тягачи с полуприцепами обладают более высокой эксплуатационной надежностью, чем тягачи с двухосными прицепами. Часть веса полуприцепа распределяется на его раму, другая же 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.

Таким образом, в результате анализа конструктивных особенностей и функциональности транспортных средств в качестве звена ГТА в работе выбран полуприцеп для агрегатирования с колесным трактором тягового класса 2,0.

Проведен анализ известных конструкций полуприцепов с учетом минимума по массе и габаритам и стоимостным показателям.

Среди тракторных полуприцепов агропромышленного направления использования следует отметить ряд конструкций, приведенных ниже.

Тракторный полуприцеп ПТУ-7,5 изображен на рисунке 7. Двухосная ходовая часть позволяет снизить нагрузку на несущий грунт, обеспечивает устойчивость и проходимость полуприцепа. Существенным недостатком полуприцепа ПТУ-7,5 является ограничение выбора диаметра шин из-за относительно низкого расположения кузова и межосевого расстояния. Кузов имеет прямоугольное сечение с наличием заднего борта, что приводит к утяжелению конструкции и образованию застойных зон при налипании влажного вязко-пластичного органогенного сырья [69].



Рисунок 7 – Полуприцеп тракторный универсальный ПТУ-7,5

Полуприцеп тракторный самосвальный Мордовагромаш 2ППТС-4,5 отличается меньшей грузоподъемностью и предназначен для перевозки различных насыпных грузов. Разгрузка негерметичным кузовом полуприцепа трехсторонняя. Полуприцеп тракторный самосвальный 2ППТС-4,5 не приспособлен к многократному проезду по слабым грунтам (рисунок 8) [67].



Рисунок 8 – Полуприцеп тракторный самосвальный ППТС-4,5

Полуприцеп ПСТ-7-1Б производителя «Бобруйскагромаш» предназначен для транспортирования различных строительных и сельскохозяйственных сыпучих грузов плотностью до $1,15 \text{ т/м}^3$ (органических удобрений и др.) с разгрузкой назад (рисунок 9) [65, 68]. Кузов типа «монокок» имеет высокие борта с наличием заднего борта, что осложняет разгрузку кузова. Колесный ход аналогичен полуприцепу ПТУ-7,5.



Рисунок 9 – Полуприцеп тракторный самосвальный ПСТ-7-1Б

Полуприцепы агропромышленного сектора имеют объемные кузова и небольшие диаметры шин, что не позволяет применять их на слабых грунтах при карьерной добыче торфяного сырья.

Полуприцеп PRONAR T679/4M предназначен для транспортировки строительных сыпучих материалов: щебня и песка, насыпная плотность которых около $1500\text{-}1800 \text{ кг/м}^3$. Для их транспортировки кузова полуприцепа все металлоконструкции выполнены упрочненными, с высокой металлоемкостью, что увеличивает массу полуприцепа. Колесный ход предназначен для скального твердого грунта. Непосредственное применение

полуприцепа PRONAR T679/4M в условиях карьерной добычи торфяного сырья на слабых грунтах нерационально (рисунок 10) [66].



Рисунок 10 – Полуприцеп тракторный самосвальный Trailer PRONAR T679/4M

Известны полуприцепы предназначенные для эксплуатации на торфяных месторождениях при добыче фрезерного и кускового торфа. Следует отметить, что по условиям, указанным в технологии добычи поверхность торфяной залежи отличается меньшей влажностью опорного основания слабого грунта 80-82 % [50].

Среди рассмотренных образцов полуприцепов для анализа транспортирования кускового торфа фрезформовочным методом [50] выделены две характерные конструкции полуприцепов финской фирмы «Suokone» и ирландской фирмы «DIFCO».

Выпускаемые финской фирмой Suokone колесные полуприцепы TRL-30 F предназначены для транспортировки окускованного торфяного сырья насыпной плотностью 600 кг/м^3 (рисунок 11) [38, 50]. Отличительной особенностью кузова полуприцепа является его ширина 3450 мм, что означает использование данного полуприцепа только в качестве внутримассивного транспорта. Достоинством полуприцепа является устойчивость двухосной конструкции ходовой части со сдвоенными колесами, что обеспечивает высокую проходимость по слабым грунтам. Разгрузка кузова набок способствует эффективному осуществлению транспортной задачи полуприцепа [143]. Технические характеристики колесного полуприцепа TRL-30F приведены в Приложении А.



Рисунок 11 – Колесный полуприцеп TRL-30 F

В настоящее время широкое применение в торфяной промышленности нашли прицепы ирландской компании «DIFCO». Гусеничный прицеп Difco с шасси с пластинчатой конструкцией и высокопрочной сталью обеспечивает прочную ходовую часть (рисунок 12). Основным преимуществом прицепов Difco является низкий удельный вес за счет применения облегченных гусениц на пневматических шинах, что, однако, в свою очередь негативно влияет на массу агрегата в сравнении с колесным ходом, маневренность и удельный сцепной вес тягача [103].

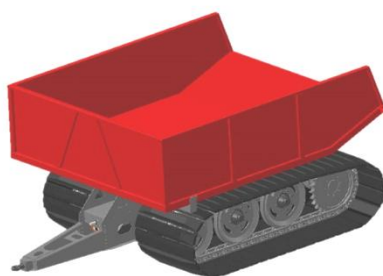


Рисунок 12 – Прицеп DIFCO Tracked Trailers

Полуприцеп-самосвал ПТК-3М института торфяной промышленности предназначен для транспортирования фрезерного торфа, полученного поверхностно-послойным способом плотностью около 200 кг/м^3 (рисунок 13) [78]. Оборудованный пневматическими колесами полуприцеп предназначен для вывозки фрезерного торфа из многоциклового валков к месту складирования при раздельном способе его уборки. Полуприцеп агрегируется с колесным трактором тягового класса 3,0 со сдвоенными

колесами и работает на торфяных залежах всех типов степенью разложения не менее 5 % и пнистостью не более 1,5 %, подготовленных в соответствии с правилами технической эксплуатации, в условиях умеренного климата [48]. Технические характеристики полуприцепа-самосвала ПТК-3М представлены в Приложении А.

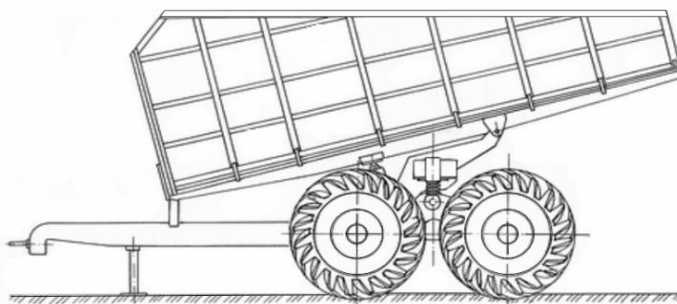


Рисунок 13 – Общий вид полуприцепа-самосвала ПТК-3М

Подъем кузова при разгрузке полуприцепа осуществляется плунжерным гидроцилиндром, подключенным к гидросистеме трактора. Управление разгрузкой полуприцепа осуществляется из кабины трактора.

На рисунке 14 приведен пример модернизированного силами торфяной компании полуприцепа ПТК-3А для перевозки фрезерного торфа при насыпной плотности 250-300 кг/м³. Анализ конструктивного исполнения полуприцепа свидетельствует о стремлении к максимальному увеличению площади контакта колес с торфяной залежью для повышения проходимости транспортного средства. Исходные металлические катки заменены на наборы обычных автомобильных шин [77].



Рисунок 14 – Модернизированный полуприцеп ПТК-3А для перевозки фрезерного торфа

Полуприцепы, предназначенные для эксплуатации на осушенных торфяных месторождениях имеют высокую проходимость за счет более плотной и прочной поверхности торфяной залежи. Торфяные полуприцепы оснащены кузовами большого объема порядка 20-28 м³, имеют высокую конструктивную массу 4000-6000 кг. Соответственно, непосредственное их применение в условиях эксплуатации на слабых грунтах рабочих площадок карьеров, а также при транспортировании экскавированного торфяного сырья высокой насыпной плотности, достигающей 900 кг/м³, является нецелесообразным.

Таким образом, из анализа существующих трех основных характерных типов полуприцепов, широко применяемых в смежных и торфяной промышленности, следует выделить общие признаки на конструктивном, функциональном и технологическом уровнях: все рассмотренные конструкции соответствуют их функциональности в соответствующих условиях применения; конструктивное оформление подчиняется общим характерным принципам конструирования – сочетание несущей рамы, кузова, двухосной колесной ходовой части и дышла для сцепки с трактором-тягачом; технологические особенности карьерного способа добычи торфяного сырья при эксплуатации транспортного оборудования на слабых грунтах и при перевозке торфяного сырья высокой насыпной плотности не позволяют непосредственного прямого применения рассмотренных полуприцепов. Требуется проведение дополнительных исследований и проектирование транспортного оборудования в виде транспортного полуприцепа с обоснованными размерно-массовыми параметрами для обеспечения необходимой функциональности в данной технологической схеме.

1.4 Выводы по главе 1

Анализ особенностей технологии карьерного способа добычи торфяного сырья показал, что обоснование структуры комплекта

технологических машин по реализации технологии добычи торфяного сырья и получения окускованной или компактированной торфяной продукции в полевых условиях кроется в применении связки экскаватор-ГТА. Добыча торфяного сырья карьерным способом – это процесс разработки торфяного месторождения с помощью глубокого карьера, который вырабатывается в один выемочный уступ.

Торфяная залежь – малопрочное и легкодеформируемое основание, по которому перемещаются транспортные машины. В связи с этим, выбор типа и необходимых размеров опорных поверхностей ходового устройства транспортного средства производится с учетом деформационных и прочностных свойств торфяной залежи, характеризующих ее поведение при воздействии внешних нагрузок.

Для выполнения транспортных задач на слабых грунтах предпочтительным является применение ГТА, состоящего из тягового устройства (трактора) и полуприцепа. Среди рассмотренных транспортно-технологических систем наибольшее распространение получили полуприцепы тракторные самосвальные. Эти машины обладают высокой маневренностью, низкими затратами операционного времени при разгрузке. ГТА циклично совершает транспортировку экскавированного сырья от забоя до отвала, совершая многократный проезд по месторождению по одной и той же траектории. Время цикла ГТА измеряется с момента операции загрузки кузова экскаватором, ГТА движется заполненным до места разгрузки, выгружает груз и возвращается порожним к экскаватору с позиционированием для погрузки. Таким образом, требуется проведение дополнительных научных исследований многократной проходимости полуприцепа в составе горнотранспортных агрегата.

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

Целью исследования является установление закономерностей процесса изменения многократной проходимости ГТА по слабым грунтам с

предельной транспортной нагрузкой в соответствии с паспортом прочности слабого грунта для разработки научно-обоснованного технического решения в условиях комплексно-механизированного карьера при максимально возможной производительности транспортирования влажного насыпного груза.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы и обосновать эксплуатационные требования, предъявляемые к горнотранспортным агрегатам, предназначенным для эксплуатации на грунтах с низкой несущей способностью.

2. Провести анализ предельных состояний прочности слабого грунта и предельной транспортной нагрузки с учетом параметров насыпного груза для обеспечения многократной проходимости агрегата в условиях комплексно-механизированного карьера.

3. Провести параметрический анализ структуры ГТА и обосновать колесную базу, размеры и форму кузова для обеспечения движения при транспортировании экскавированного торфяного сырья в условиях комплексно-механизированного карьера.

4. Провести в полевых и лабораторных условиях экспериментальные исследования по влиянию параметров колесного хода и размерно-массовых характеристик тракторного полуприцепа на процесс многократной проходимости агрегата в условиях комплексно-механизированного карьера при транспортировании экскавированного торфяного сырья.

5. Экспериментально установить размерно-массовые параметры полуприцепа ГТА и разработать техническое решение по форме кузова полуприцепа для транспортирования и эффективной разгрузки экскавированного торфяного сырья как адгезионно-активного груза.

6. Разработать практические рекомендации по результатам исследований.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТА В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРА

2.1. Обоснование структуры и размерно-массовых параметров транспортного агрегата

Подвижные технологические транспортные процессы характеризуются перемещением ГТА по территории карьера без изменения состояния перевозимого насыпного груза.

Мобильные ГТА можно классифицируют по основным эксплуатационным признакам:

- по виду источника энергии – двигатель трактора (механический);
- по составу прицепных машин – одномашинные с задним расположением;
- по способу соединения прицепных машин с трактором – прицепные, полуприцепные.

Наиболее влияющим на эффективность и производительность освоения месторождений торфа является проходимость оборудования по слабым грунтам. Таким образом, машины и оборудование для освоения торфяного месторождения необходимо адаптировать к условиям проходимости по слабым грунтам, при этом следует учитывать тенденцию увеличения производительности транспортирования горной породы.

В горном деле наблюдается увеличение производительности транспортирования горной породы за счет увеличения объемов кузовной части транспортного агрегата. Однако при разработке торфяных залежей этот принцип не применим, так как основным ограничивающим фактором является проходимость мобильного оборудования. Поэтому, из условий проходимости по слабым грунтам при освоении торфяного месторождения выбирается выемочно-транспортный комплекс:

1. Экскаватор на широких гусеницах болотного исполнения;
2. ГТА, параметры которого выбираются исходя из условий многократности проезда по слабому грунту рабочей площадки карьера [34].

Стоит отметить, что выемочно-транспортный комплекс, состоящий из экскаватора и ГТА для эффективной работы должен подчиняться принципу согласования, т.е. кузов транспортного средства должен заполняться за 3-6 выемочных циклов (ковшей) экскаватора [72].

В основу методики проведенного исследования положен ряд интенсивных принципов формирования структуры мобильного комплекта технологического оборудования [9, 44, 51, 55].

1. Как типы, так и технические характеристики машин комплекта должны полностью соответствовать условиям функционирования, характеру технологического процесса (принцип соответствия). Например, высота разгрузки ковша выемочного экскаватора должна быть не меньше высоты кузова тракторного прицепа.

2. Структура и состав комплекта должны обеспечивать непрерывность технологического потока или основных технологических операций (принцип непрерывности). Так, для выемочно-транспортных комплектов непрерывным должен быть поток торфяного сырья от места выемки до места выгрузки в отвал.

3. Принцип согласования работы машин в комплекте по производительности. Техническая производительность является главным параметром обоснования структуры комплектов машин. Поэтому для реализации производительности ведущей машины (которая должна без простоев функционировать на основной операции) производительность вспомогательных машин, как правило, должна быть равной или несколько превышать ее (на 10...15 %).

4. При высоких требованиях к уровню организационно-технологической надежности комплексно-механизированных работ применяются резервные машины [90]. При этом резервные машины могут использоваться на второстепенных работах с возможностью их быстрого перебазирования при сбоях в работе комплекта.

5. Принцип выбора параметров торфяных машин, исходя из физико-механических свойств и характеристик торфяной залежи и торфяного сырья, является основным при формировании структуры комплексов оборудования. Конструктивные, кинематические и энергетические параметры, а также режимы эксплуатации машин выбираются исходя из размерно-массовых и прочностных свойств залежи как опорной поверхности и экскавированного торфяного сырья как перевозимого груза [53].

Изложенные принципы и условия комплектования конкретизируются в расчетных моделях формирования комплексов и систематизируют достаточно широкий диапазон приемов и методов комплексного обоснования структуры парков торфяных машин, ускоряющих поиск наилучших решений. В зависимости от поставленной механико-технологической задачи можно пользоваться всеми принципами одновременно или частью из них [53].

Части выемочно-транспортного комплекса неразрывно связаны между собой – насколько эффективно ГТА осуществляет перевозку торфяного сырья, настолько же эффективен и сам процесс осуществления открытой разработки месторождения. Поэтому, конструктивно ГТА должен быть спроектирован в соответствии с условиями эксплуатации для обеспечения эффективности функционирования выемочно-транспортного комплекта.

Основным преимуществом полуприцепов с несколькими осями является повышенная их проходимость по слабым грунтам при ограничении грузоподъемности прочностными свойствами грунта. Большинство полуприцепов имеют оси со сдвоенными колесами. Недостаток полуприцепов с несколькими осями — боковое проскальзывание (или боковой увод) шин при движении на поворотах не существенно сказывается при передвижении по слабым грунтам.

Исходя из основных требований и анализа горно-геологических условий проходимости ГТА по слабым грунтам, реальным становится определение основных размерных параметров полуприцепа.

По расчетной схеме (рисунок 15) модели полуприцепа ГТА возможно определить длину дышла, руководствуясь при этом ГОСТ 10000-2017 [22].

Для определения зависимости нагрузки на сцепное устройство у модели полуприцепа установлено неподвижное дышло, нагрузка распределяется частично на оси полуприцепа, частично – на навеску трактора.

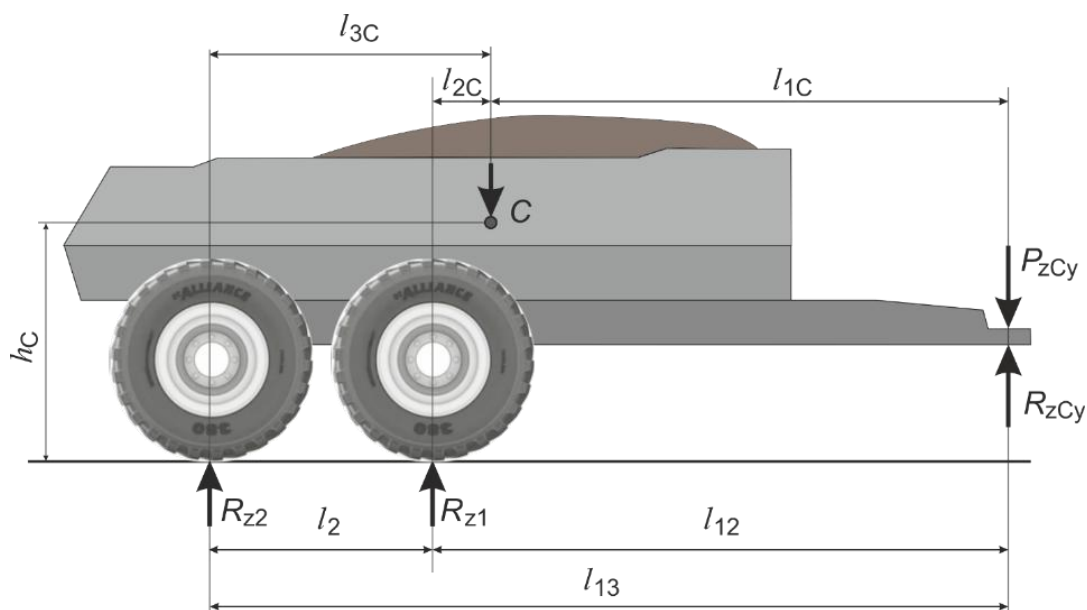


Рисунок 15 – Расчетная схема полуприцепа

База полуприцепа l_2 (рисунок 15) определяется из условия обеспечения допустимых нагрузок на сцепное устройство и на оси с соблюдением регламентированного ГОСТ 12105-74 радиуса габарита передней части полуприцепа, определяющего передний свес [18].

В работе [91] показано, что при типовых параметрах движителей колесного оборудования на слабонесущих грунтах машины массой более 10 т образуют колею более 0,1 м. Потеря опорной проходимости у колесных машин на слабонесущем грунте происходит при массе машины свыше 11,5 т [91].

Исходя из анализа тракторных транспортных устройств, средняя собственная масса полуприцепа составляет 2500 кг (без учета массы колес - 1585 кг), масса груза определяется исходя из его насыпной плотности и

занимаемого им объема в кузове. Насыпная плотность экскавированного торфяного сырья равна 800 кг/м^3 [78].

Объем кузова колесного прицепа из условий проходимости определяется как (10)

$$V = \frac{0,1N_{Di}nB_k - a_k}{K_H K_\gamma \gamma (b_k + 1)}, \quad (10)$$

где N_{Di} – рекомендуемая М. Танклевским [79] нагрузка на колесо диаметром D_i , Н;

n – количество колес на прицепе;

B_k – ширина колеса, м;

a_k и b_k – конструктивные статистические параметры уравнения для определения массы колесного прицепа ($a_k = 1500 \text{ кг}$, $b_k = 0,3$) [44].

Рекомендуемым соотношением при выборе типоразмера ковша экскаватора и кузова тракторного полуприцепа является условие погрузки кузова в 3-6 ковшей (циклов экскавации) [82]. Также, объем кузова полуприцепа ГТА определяется по графику (рисунок 16) [44]. Объем ковша экскаватора, работающего в связке с ГТА равен $1,0 \text{ м}^3$ [24]. Следовательно, объем кузова V_k полуприцепа ГТА составляет 5-6 м^3 .

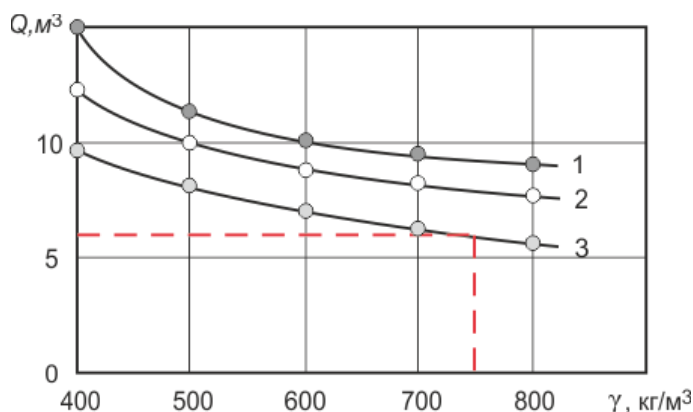


Рисунок 16 – Зависимость объема кузова полуприцепа от насыпной плотности торфяного сырья из условия проходимости: 1 – верховая залежь ($\tau = 40 \text{ кПа}$); 2 – верховая залежь ($\tau = 35 \text{ кПа}$); 3 – верховая залежь ($\tau = 30 \text{ кПа}$) [44]

Таким образом, масса экскавированного груза в объеме кузова полуприцепа равна 4000 кг.

Исходя из расчетной схемы определены основные параметры схемы агрегатирования и компоновки полуприцепа, показанных на рисунках 17 и 18.

Расстояние между осью седельно-сцепного устройства и осью колес полуприцепа: для многоосного полуприцепа указывается дополнительно сумма расстояний между соседними осями.

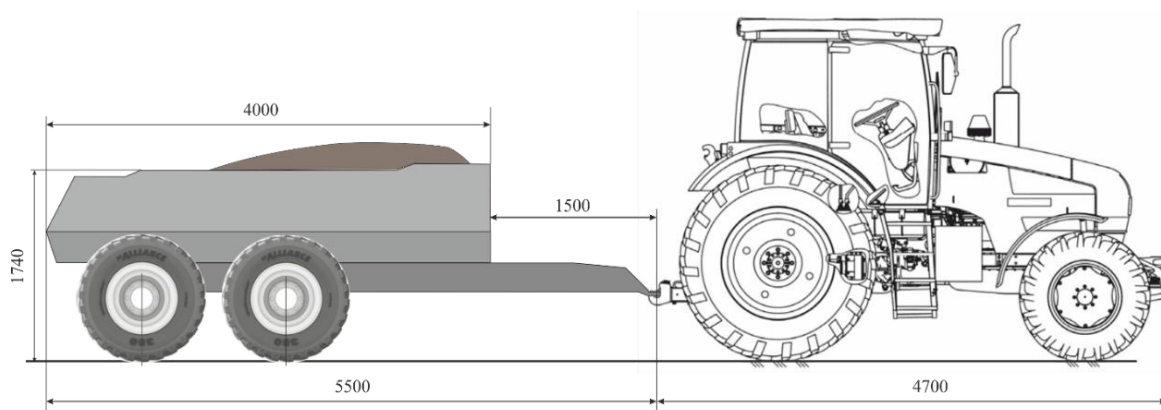


Рисунок 17 – Схема агрегатирования трактора и полуприцепа

Преимущество такой компоновки звеньев ГТА состоит в снижении количества колес, влияющих на снаряженную массу агрегата, и распределение нагрузки между тяговым и сцепным устройствами агрегата.

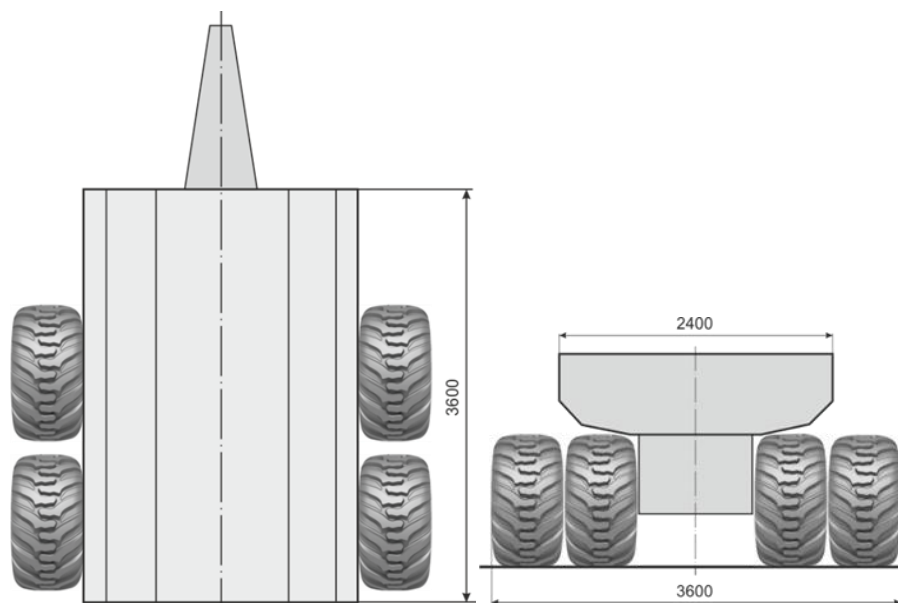


Рисунок 18 – Схема полуприцепа

Исходными данными для определения основных параметров компоновки полуприцепа являются: техническая характеристика основного тягача и заданная полная масса полуприцепа.

Определение снаряженной массы и грузоподъемности полуприцепа при заданной полной массе, а также количества осей, осуществляют исходя из предельно допустимых осевых нагрузок на грунт.

Габаритные размеры полуприцепа (рисунок 17) при внутримассивной эксплуатации при транспортировке торфяного сырья не ограничиваются. Габаритная длина ограничивается в составе транспортно-тракторного агрегата. Дорожный просвет должен быть для полуприцепа не меньше, чем у основного тягача.

Учитывая полезную мощность двигателя трактора и силу сопротивления движению агрегата можно найти рациональное значение рабочей скорости трактора. Saarilahti, M. [135] предположил, что минимальная теоретическая рабочая скорость составляет около 0,10–0,05 м/с (3,6 км/ч) (11)

$$N_e/F_T \geq 0,1, \quad (11)$$

где N_e – полезная мощность двигателя трактора-тягача, кВт;

F_T – суммарное сопротивление движению ГТА, кН.

2.2 Анализ условий проходимости горнотранспортного агрегата по слабым грунтам

Выбор параметров ГТА напрямую зависит от условий эксплуатации, ограничивающих диапазон его применения и режимы эксплуатации. Ограничением для проезда транспортных средств при карьерной добыче торфяного сырья является прочностные характеристики торфяного месторождения как основания. Требуемая проходимость колесного транспортного оборудования на влажных слабых грунтах может быть обеспечена путем снижения удельного давления на площадке контакта шины колеса с грунтом. Среднее удельное давление шины на опорную поверхность колеблется в пределах 0,05...0,18 МПа [89, 145].

Подвижность транспортного средства на слабых грунтах можно описать двумя элементами: характеристиками торфяной залежи и характеристиками транспортного средства [135]. Взаимодействие между этими двумя элементами происходит через колесо или гусеницу. Пользователи системы дают следующие три размера каждого колеса: диаметр, ширина и давление накачивания [83, 137].

Прогиб шины – это разница между ненагруженным и нагруженным колесом [136]. Прогиб можно рассчитать с помощью следующей модели (12):

$$\delta = \left(0,365 + \frac{170}{p_i}\right) \frac{W_i}{1000}, \quad (12)$$

где δ – прогиб шины, м;

p_i – давление накачивания, кПа;

W_i – нагрузка на колесо, кН [136].

Давление шины в пятне контакта можно рассчитать по формуле Маклорена (13) [112]:

$$q = \frac{W_i}{B^{0,8} D^{0,8} \delta^{0,4}}, \quad (13)$$

где q – давление шины в пятне контакта, кПа;

d – диаметр ненагруженной шины, м.

Осадка трактора является результатом динамической нагрузки, которая носит временный характер. Средняя начальная осадка прямоугольного штампа (14)

$$z = \frac{qB}{E}, \quad (14)$$

где z – начальная осадка (проседание шины), м;

q – давление на основание (давление прилегания к шине), кПа;

B – ширина основания (или шины), м;

E – модуль Юнга грунта, кПа [107].

Наиболее полно физико-механический анализ условий проходимости машин по торфяной залежи отображает формула, обоснованная С.С. Корчуновым (15) [39]

$$P = A + B(\Pi/F), \quad (15)$$

где P – несущая способность торфяной залежи, кПа;

A – удельное сопротивление поверхности залежи сжатию, кПа;

B – удельное сопротивление торфяной залежи срезу по периметру штампа, кН/м;

Π – периметр штампа, м;

F – площадь основания штампа, м (отпечатка опорной поверхности колеса, соприкасающейся с грунтом) [75].

Контактное давление колес транспортного средства определяется как упругими деформациями нагруженного колеса (характеристики шины, давление воздуха), так и упруго-пластическими деформациями грунта (прочность, влажность) [127].

Ряд исследователей анализировали формулы для выражения давления транспортного средства на грунт, для прогноза проходимости транспортного средства на этапе проектирования оборудования. Имеющиеся в литературе результаты исследований касаются экспериментальных исследований шин, предназначенных для движения по слабым грунтам [101].

Среди основных методов прогнозирования величины давления колеса на грунт следует отметить следующие.

1. Номинальное давление на грунт (NGP) [123, 136] рассматривает площадь контакта как произведение ширины B на диаметр D колеса (16)

$$NGP = G/BD, \quad (16)$$

где G – нагрузка на колесо, кН.

2. Выражение для NGP соответствует среднему давлению колесного движителя на почву q_k по ГОСТ 58656-2019 (17) [23]

$$q_k = G/F_{кп}, \quad (17)$$

где $F_{кп}$ – контурная площадь контакта протектора шины, м².

3. Более точный метод основан на использовании эффективной площади контакта (18) [123]

$$NGP = G/2B\sqrt{R_k^2 - (R_k - \delta - z)^2}, \quad (18)$$

где δ – прогиб шины в зависимости от приложенной нагрузки, м;

$R_k = D/2$ — радиус колеса, м;

z – осадка шины в грунт, м.

4. Концепция среднего максимального давления (ММР), предложенная Д. Роландом (19) [132]

$$MMP = \frac{1,18W_{TW}}{2mb\sqrt{dh}}, \quad (19)$$

где W_{TW} – вес машины с грузом, кН;

m – количество осей, шт.;

b – ширина колеса, м;

d – диаметр колеса, м;

h – высота профиля колеса, м.

5. Контактное давление шины с грунтом можно определить по выражению Maclaurin E. с учетом прогиба шины δ (20) [112]

$$MMP = \frac{G_i}{B^{0,8}D^{0,8}\delta^{0,4}}, \quad (20)$$

где MMP – среднее максимальное давление на грунт, кПа;

G_i – нагрузка на колесо, кН;

D – диаметр ненагруженной шины, м;

δ – прогиб нагруженного колеса, м.

Выражение MMP для колесных транспортных средств дает возможность анализировать характеристики, по сравнению с другими транспортными средствами или колесами, а не реальный прогноз давления на грунт [101].

Простая модель для оценки площади контакта шины (21) – это отношение нагрузки на колесо к среднему максимальному давлению на грунт [112]

$$S_k = \frac{G_i}{MMP} = B^{0,8} D^{0,8} \delta^{0,4}, \quad (21)$$

отсюда длина пятна контакта шины (22)

$$L_k = \frac{S_k}{B} = \frac{D^{0,8} \delta^{0,4}}{B^{0,2}}. \quad (22)$$

Результаты экспериментов [101] по измерению прогиба шины показывают, что выражение (23)

$$L = \sqrt{r^2 - (r - \delta)^2} \cong \sqrt{\delta d} \quad (23)$$

дает достаточное для практики описание статического поведения шины.

Для длины пятна контакта колесного движителя с деформируемой опорной поверхностью получено уравнение (24) [2]

$$L = \sqrt{dh_z - h_z^2} + \sqrt{d(h + h_z) - (h_z + h)^2}, \quad (24)$$

где d – диаметр колеса, м,

h_z – радиальная деформация колеса, м [92].

Радиальную деформацию колеса необходимо определять с учетом деформации опорной поверхности по приближенным выражениям для определения радиальной деформации через параметры колеса и его осадку h на деформируемой опорной поверхности (25) [92]

$$h_z = 0,0645 \sqrt[3]{\frac{BG_w^2}{h^{0,75} dp_w^2}}. \quad (25)$$

6. Инженерными исследованиями армии США предложен показатель конусного индекса (VCI) для количественной оценки проходимости транспортных средств по слабым грунтам. Международное общество систем наземных транспортных средств (ISTVS) определяет VCI как минимальную прочность грунта в критическом слое с точки зрения индекса конусности, требуемую для определенного количества проходов транспортного средства, обычно один проход (VCI_1) или 50 проходов (VCI_{50}) [138].

Эмпирический метод экспериментальной станции водных путей WES [96], разработанный для прогнозирования характеристик колесных

транспортных средств, сначала включает расчет индекса мобильности MI данного транспортного средства. Мобильность – общая способность транспортного средства перемещаться с места на место, сохраняя при этом свою способность выполнять свою основную задачу [115]. MI определяет показатели VCI транспортных средств на связных грунтах (26). Он состоит из ряда параметров тяги, влияющих на характеристики транспортного средства [95].

$$MI = (P_k G_f / T_f) + WL_f - C_f, \quad (26)$$

где P_k – давление в контакте (lbf/ft^2);

G_f – фактор веса (lbf);

T_f – фактор ширины шин (In);

WL_f – фактор нагрузки на шину (lb);

C_f – фактор клиренса (In).

Давление колеса в контакте с основанием (27)

$$P_k = \frac{2G}{BDw_k}, \quad (27)$$

где G_m – нагрузка, кН;

B – ширина колеса, м;

D – диаметр колеса м;

H – высота профиля, м;

w_k – общее число колес машины, шт.

Фактор ширины шин (28)

$$T_f = \frac{10 + B}{100}. \quad (28)$$

Фактор нагрузки на шину (29)

$$WL_f = G/2m, \quad (29)$$

где m – количество осей, шт.

Фактор клиренса полуприцепа (30)

$$C_f = 0,1h_c, \quad (30)$$

где h_c – высота клиренса машины, h_c .

VCI представляет собой минимальную прочность, которой должен обладать грунт в своем критическом слое, чтобы транспортное средство успешно выполнило определенное количество проходов, обычно выражаемое как один проход или 50 проходов. В эмпирическом методе MI колесной машины используется для расчета VCI . Значения VCI для одного и 50 проходов могут быть получены из значений MI на основе эмпирических уравнений, разработанных Rula и Nuttall [133]. Для значения $MI < 115$ используются следующие формулы для расчета VCI для 1 (31) и 50 (32) проходов [130]:

$$VCI_1 = 11,48 + 0,2MI - \left(\frac{39,2}{MI + 3,74} \right); \quad (31)$$

$$VCI_{50} = 28,83 + 0,43MI - \left(\frac{92,67}{MI + 3,67} \right). \quad (32)$$

Модель индекса конусности транспортных средств (VCI), и концепция среднего максимального давления (MMP) [132, 133, 148] являются двумя широко используемыми практическими методами.

Параметр MMP относится к характеристикам слабых грунтов и обеспечивает минимальную проходимость по удельному давлению на грунт путем получения среднего значения максимального давления на каждом колесе и связан с размерами колеса, а также с массой транспортного средства. Оценка проходимости с помощью MMP включает в себя предварительное определение размерно-массовых характеристик колес и их количества.

Оценка проходимости ГТА по показателю MMP является надежной, точной и простой, в сравнении с другими способами определения давления колес на грунт [111, 136].

Взаимосвязь показателей MMP и VCI_{50} описывает выражение, эмпирически полученное для связных грунтов. VCI_{50} соответствует пятидесяти проходам транспортного средства по слабому грунту (33) [148]

$$VCI_{50} = 0,27 MMP. \quad (33)$$

Для полуприцепа ГТА с двумя осями на сдвоенных колесах с флотационными шинами модель среднего максимального давления на грунт (кПа) может быть определена как (34)

$$MMP = \frac{1,18G_m}{(m + w_k/2)B\sqrt{DH}} \quad (34)$$

где G_m – вес машины с грузом, кН;

m – количество осей, шт.;

B – ширина колеса, м;

D – диаметр колеса м;

H – высота профиля шины, м;

w_k – общее число колес машины, шт.

Техническим пределом ситуации проходит/не проходит является – 1 проход [52]. Условия многократной проходимости могут быть классифицированы, как хорошие, если возможны 50 проходов машины по колее. Для определения многократной проходимости колесной техники необходимо руководствоваться сравнением расчетного значения MMP с допустимыми значениями удельных давлений, представленных по материалам анализа источников.

Эксплуатационная эффективность транспортных машин улучшается, как функция количества ожидаемых проходов, и таким образом, от 2 до 5 предельных проходов могут быть установлены, как самый низкий экономический предел проходимости ГТА по слабым грунтам (таблица 6) [52].

Таблица 6 – Классификация проходимости колесного оборудования, основанная на количестве проходов [52]

Количество проходов	Технический предел	Условия проходимости
1-3	Невозможно	неудовлетворительно
3-5	–	неудовлетворительно
6-10	Возможно, экономично	удовлетворительно
11-25	–	хорошо
≥ 25	Возможно, экономично, благоприятно для окружающей среды	отлично

Условия многократной проходимости могут быть классифицированы, как хорошие, если возможны 25 проходов машин по колее [138].

В зависимости от условий эксплуатации ГТА на слабых грунтах Д. Роулэндом рекомендованы значения среднего максимального давления для машин высокой проходимости (таблица 7) [132].

Таблица 7 – Рекомендуемые значения среднего максимального давления (ММР) для машин высокой проходимости

Грунтовые условия	Среднее максимальное давление (ММР), кПа		
	Для многократных проходов		Для одного прохода
	идеальное значение	удовлетворительное значение	
Торфяники	30	50	60
Тундра и европейские болота	5	10	15
Снег	10	25...30	40

В рамках исследования модель индекса конусности полуприцепа (VCI_{50}), определена на основе модели А. Rula и J. Nuttall [133] с анализом индекса мобильности полуприцепа MI и поправочным коэффициентом для учета влияния прогиба шины δ с низким давлением накачивания на характеристики VCI_{50} (35) [128]

$$VCI_{50} = \left[28,83 + 0,43MI - \left(\frac{92,67}{MI + 3,67} \right) \right] \left(\frac{0,15H}{\delta} \right)^{0,25} \quad (35)$$

Для учета влияния прогиба шины δ с низким давлением накачивания на характеристики VCI_{50} введен поправочный коэффициент прогиба (36) [128]

$$k_{\delta} = \left(\frac{0,15H}{\delta} \right)^{0,25} \quad (36)$$

где δ – средний прогиб шины на твердой поверхности, м;

H – средняя высота профиля шины (накачанной; без нагрузки), м.

Величина соотношения δ/h зависит в первую очередь от жесткости шины и давления воздуха в шине [140]. Для предварительных расчетов можно принять:

- $\delta/h = 0,18$ – для номинального давления (чтобы обеспечить номинальную скорость при номинальной нагрузке на основе);
- $\delta/h = 0,25$ – для пониженного давления (для условий бездорожья с ограниченной скоростью) примерно до 70 % номинального давления;
- $\delta/h = 0,35$ – при пониженном давлении (для преодоления сложных участков) примерно до 30 % номинального давления.

Методы *WES VCI* и *MMP/CI* направлены на определение проходимости транспортного средства на различных типах грунтов. Параметры, используемые этими двумя методами, показывают, что площадь контакта колес с грунтом играет очень важную роль в проходимости. Методология *WES VCI* обеспечивает лучшее разрешение для количества проходов, которые конкретно транспортное средство может сделать по определенной местности, по сравнению с методом *MMP*. Таким образом, методология *WES VCI* будет более полезной при проведении подробного анализа проходимости, чтобы определить, можно ли использовать конкретную платформу для конкретных условий применения. *MMP*, с другой стороны, обеспечивает более простое сравнение и может использоваться в качестве первого сравнения между различными платформами [132, 148].

Представленные методы оценки проходимости по слабым грунтам основаны на эмпирических данных и получение надежных результатов расчетов и анализа зависит от требований [140]:

1. все значения выражены в указанных единицах;
2. конструктивные решения анализируемых транспортных средств и их компоновки существенно не отклоняются от типовых решений.

Получены эмпирические данные по взаимодействию движителей колесного полуприцепа на слабых грунтах.

Представляется, что в настоящее время наиболее надежный метод, основанный на эмпирических данных оценки проходимости по слабым грунтам, представляет собой модель ММР с четкой базой приложений на момент его создания [140]. Несмотря на то, что ММР имеет большое количество формул, он дает более надежную информацию для принятия решений, поскольку учитывает больше переменных параметров шин.

При изучении воздействия колесного движителя машин на поверхности слабого грунта поверхности требуется:

- формализация описания процессов, описывающих взаимодействие движителей со слабым грунтом с позиций механики грунтов;
- экспериментальная проверка, верификации результатов теоретических исследований по взаимосвязи значений конусного индекса и физико- механических свойств слабых грунтов;
- интерпретации результатов исследований и их применения на практике.

Диапазоны минимальных значений VCI_1 и VCI_{50} характеризуют транспортные средства по категориям, представленным в таблице 8.

Таблица 8 – Классификация условных категорий транспортных средств в соответствии с минимальными требованиями CI (VCI_1 и VCI_{50}) [125]

Категория	Диапазон		Транспортные средства
	VCI_1	VCI_{50}	
1	<12	<29	Легкие средства с низким удельным давлением (< 13,8 кПа)
2	12-21	30-49	Специальные тракторы со сравнительно широкими гусеницами и низким удельным давлением
3	21-26	50-59	Тракторы со средним удельным давлением, прицепные машины с очень низким удельным давлением
4	26-30	60-69	Тракторы со всеми ведущими колесами, прицепные машины с низким удельным давлением
5	31-35	70-79	Большинство тракторов со всеми ведущими колесами, прицепные машины
6	35-44	80-99	Большинство тракторов, прицепные машины

В результате статистического анализа данных по оценке проходимости торфяных машин с учетом несущей способности торфяной залежи верхового типа [4] определены предельные значения прочности торфяного основания $[\tau] = 13,9$ кПа и $[q] = 146$ кПа. Также, многократная проходимость машин, подготовленных к эксплуатации в условиях торфяного карьера, практически возможна при значении $MMP = 30-50$ кПа. Для сравнения, известно, что широко используемое максимальное давление на поверхность грунта при проведении лесохозяйственных работ на торфяных грунтах составляет 50 кПа [134]. Также следует, что при осуществлении разработки торфяных месторождений большинство тракторов с прицепными устройствами относятся ко 2 категории по классификации таблицы 3, где $12 < VCI_1 < 21$ и $30 < VCI_{50} < 49$.

Для определения многократной проходимости колесного транспортного оборудования по торфяной залежи необходимо руководствоваться сравнением расчетного значения MMP с допустимыми значениями удельных давлений, а также выявлением взаимосвязи MMP с VCI_{50} , представленным по материалам анализа проходимости машин по слабым грунтам.

Исходя из осуществленного анализа, следует, что основным показателем, влияющим на величину погружения пневматического колеса в деформируемое опорное основание, является величина давления в пятне контакта шины с торфяной залежью. Снизить величину давления колеса на грунт возможно путем увеличения площади пятна контакта за счет уменьшения давления воздуха в шинах колес до 100 кПа, а также путем сдвигания колес на осях [36].

2.3 Обоснование размерно-массовых параметров колесного хода транспортного полуприцепа

В настоящее время для тракторных прицепов созданы флотационные низкопрофильные шины с отношением высоты профиля к его ширине $H/B =$

0,4-0,6. Применение таких шин при снижении давления накачивания до 100 кПа существенно позволяет снизить удельное давление на грунт, приближая этот показатель к максимально допустимому по ГОСТ 7057-2001 [19, 61]. Преимущества радиальных шин над диагональными:

- меньшее сопротивление качению (на 25...30 %) и, соответственно, меньший расход топлива (до 10 %);
- большая грузоподъемность шин одного размера с диагональными (на 15...25 %);
- значительно более высокие износостойкость (в 1,5...1,7 раза) и срок службы (в 1,5...2,5 раза);
- более высокая стойкость к проколам (за счет использования металлокорда в брекерном поясе) [57].

Комплектация шинами вносит значительный вклад в общие эксплуатационные расходы транспортного средства из-за потерь энергии во время движения, определяемых сопротивлением качению, и стоимости самих шин. Задача выбора шин имеет ряд ограничений, связанных с производительностью, и эксплуатационными расходами, которые варьируются от структуры транспортных средств, горно-геологических условий и воздействия окружающей среды [109]. Чтобы оценить проходимость ГТА по слабым грунтам с помощью показателя ММР необходимо определить массу полуприцепа и перевозимого груза.

На основе анализа ряда работ [10, 84, 1, 8] следует, что увеличение размеров шины (диаметра D и ширины B) при одинаковой вертикальной нагрузке G на нее приводит к улучшению ее тягово-сцепных свойств (уменьшается сопротивление $F_{\text{пер}}$ перекачиванию вследствие образования колеи и смятия грунта колесом, увеличивается площадь опорной поверхности) и улучшается проходимость (уменьшение давления на грунт q_x). Однако, шины больших размеров имеют и большую стоимость и массу.

По мнению А.В. Гуськова [25] рациональный выбор шин может быть представлен алгоритмом решения обратной задачи: при заданной

вертикальной нагрузке полуприцепа $G = \text{const}$ определить рациональные параметры колеса (D, B, p_k) для $F_{\text{пер}} \rightarrow \min$ и $q_x \rightarrow \min$.

Для полуприцепа постоянной конструктивной массы и загрузки кузова сырьем можно подобрать шину определенного типоразмера для обеспечения лучшей проходимости (таблица 9). Выбор лучших образцов шин по ряду показателей, включая геометрические размеры и массу, влияет на процесс функционирования технологического оборудования и повышение энергоэффективности горных процессов. Для анализа получен ряд флотационных шин с широким диапазоном размерно-массовых и стоимостных параметров. Задача выбора рациональных образцов для комплектования транспортного полуприцепа представляет определенную сложность и является актуальной, учитывая стоимость инновационных решений по выбору оборудования.

К числу оценочных параметров колес относятся: наружный диаметр D , ширина шины B , посадочный диаметр, максимально допустимая нагрузка на колесо G_k и соответствующее этой нагрузке давление воздуха в шине. В зависимости от величины наружного диаметра D колеса подразделяют на: малогабаритные ($D < 0,8$ м); среднегабаритные ($D = 0,8 \dots 1,5$ м) и крупногабаритные ($D = 1,5 \dots 3,0$ м) [58].

Представляется, что в настоящее время наиболее надежный метод, основанный на эмпирических данных оценки проходимости по слабым грунтам, представляет собой модель *ММР* с четкой базой приложений на момент его создания [140]. Метод *ММР* дает более надежную информацию для принятия решений, поскольку учитывает больше переменных параметров шин.

Оценка проходимости с помощью *ММР* включает в себя предварительное определение размерно-массовых характеристик колес и их количества [138]. В таблице 9 представлено сравнение расчетных значений показателя *ММР* ряда радиальных флотационных шин. В рамках анализа проведено сравнение расчетных значений показателя *ММР* ряда радиальных

флотационных шин полуприцепа (16 типоразмеров $D=1045-1270$ мм; $B=500-700$ мм) при массе груза в кузове 4000 кг и массе полуприцепа без учета массы колес 1585 кг.

Выбор рациональных образцов шин по ряду показателей, включая геометрические размеры и массу, влияет на процесс функционирования транспортного оборудования и повышение энергоэффективности транспортного процесса. Задача выбора рациональных размеров шин для комплектования транспортного полуприцепа представляет определенную сложность и является актуальной, учитывая стоимость инновационных решений по выбору оборудования.

Таблица 9 – Показатели радиальных флотационных шин для комплектования двухосного полуприцепа со сдвоенными колесами

Типоразмер шин	Ширина B , м	Диаметр D , мм	Высота профиля H , мм	Вес прицепа с грузом G_m , кН	Среднее максимальное давление MMP , кПа	Индекс мобильности MI	Индекс конусности транспортного средства (VCI), psi	
							VCI_1	VCI_{50}
500/45R 22.5	500	1045	225	52,71	42,50	26,79	13,31	31,42
500/50R 22.5	500	1070	250	52,79	40,15	26,27	13,19	31,15
500/60R 22.5	503	1172	300	54,20	35,74	23,79	12,67	30,03
550/45R 22.5	550	1070	248	53,58	37,63	24,95	12,93	30,57
550/60R 22.5	537	1232	330	54,73	31,42	21,47	11,93	28,95
560/45R 22.5	543	1076	252	55,54	37,24	24,35	12,82	30,33
560/60R 22.5	567	1247	330	55,38	29,95	21,19	12,12	29,18
600/50R 22.5	631	1172	315	56,32	28,89	20,29	11,90	28,32
600/55R 22.5	600	1230	330	56,64	26,27	20,65	12,00	28,53
700/40R 22.5	700	1170	280	58,13	28,58	19,44	11,72	27,84

Продолжение таблицы 9

650/50R 22.5	650	1222	325	58,75	29,58	20,26	11,92	28,34
710/45R 22.5	700	1270	320	59,93	26,41	19,15	11,63	27,71
650/40R 22.5	640	1085	256	60,48	35,26	22,99	12,49	29,62
620/50R 22.5	610	1185	305	56,09	30,08	20,64	11,98	28,50
620/40R 22.5	610	1080	244	55,30	34,73	21,48	12,17	28,92
600/40R 22.5	600	1100	240	56,24	35,88	24,58	12,58	30,40

Оснащение транспортных средств колесами зависит от типоразмеров шин и конструктивных параметров, допустимых нагрузок и соответствующим давлением воздуха в шинах для установления допустимого статического прогиба шины в различных условиях эксплуатации при номинальной контурной площади пятна контакта шины с жестким опорным основанием [47].

Дополнительные шины большего размера также улучшат проходимость в условиях слабых грунтов. Чем больше диаметр, тем меньше потребное тяговое усилие трактора-тягача [100].

2.4 Анализ движения ГТА при транспортировании экскавированного торфяного сырья в условиях карьера

Для перевозки торфа из карьеров на склады хранения или перерабатывающие предприятия используются колесные тягачи. Тракторная транспортная единица представляет собой комбинацию силовой установки (тягача) и транспортной единицы (полуприцепа) [55]. Транспортные операции относятся к технологическим операциям, обычно они связаны с перемещением материала без изменения его состояния.

Эффективности движения тракторной транспортной единицы при добыче торфа способствуют ее проходимость и управляемость. Одним из важнейших эксплуатационных свойств тракторной транспортной единицы,

влияющих на ее производительность, является ее управляемость [149]. Характеристики управляемости автомобиля на мокром торфянике существенно зависят от его конструкции, размеров и массы элементов, характера их соединения, законов управления осями, характеристик шин, режимов и условий движения [116].

Энергетической характеристикой тракторной транспортной единицы является ее способность развивать определенную мощность двигателя и тяговое усилие трактора. Динамика трактора связана с механическим моделированием, а также с математическим описанием и анализом систем трактора [126, 147].

Общая эффективность работы тракторной транспортной единицы зависит от эффективности работы ее составных частей. В процесс обоснования количественного состава тракторной транспортной единицы должны быть включены основные характеристики как трактора, так и полуприцепа как отдельных объектов испытаний [116].

Предметом исследования является анализ движения тракторной транспортной единицы, используемой при добыче торфа и состоящей из сельскохозяйственного трактора и полуприцепа. Динамические модели тракторов являются важным инструментом исследований и разработок в горнодобывающей промышленности [124].

Задачей работы является моделирование движения тракторной транспортной единицы в условиях эксплуатации с целью выбора конструктивных параметров, соответствующих состоянию и режимам работы на слабых грунтах.

Транспортная единица трактора представляет собой механическую навеску, состоящую из шарнирно-сочлененных транспортных элементов. Основные кинематические и динамические свойства агрегата зависят от физических явлений, происходящих при его движении, которые, в свою очередь, определяются его структурой. При укрупнении тракторно-транспортной единицы ее энергетическая характеристика не имеет

принципиального значения в определении количественного состава машин в агрегате, выборе режимов их работы (в частности, скоростных) и т.д. Основным фактором является проходимость.

Способность движения по слабым грунтам без образования бульдозерного эффекта и буксования ГТА определяется проходимостью. Основным критерием при оценке проходимости агрегата является прицепная масса (прицепная масса) трактора m_{tw} (G_{tw}) – часть массы трактора, создающая нормальные нагрузки на ведущие колеса трактора [40].

При изучении режимов движения агрегата можно сделать ряд допущений, позволяющих упростить уравнение движения и получить формулы и критерии, определяющие основные параметры маневренности тракторно-транспортного агрегата с постоянной нагрузкой на крюк. Анализ маневренности выполняется на малых скоростях без учета динамических эффектов, то есть с точки зрения кинематики движения. Транспортная единица трактора моделируется состоящей из двух сочлененных твердых тел, движущихся в горизонтальной плоскости с постоянной скоростью движения [146].

На первом этапе решения задачи в условиях малых скоростей и боковых ускорений можно пренебречь влиянием упругости шин (бокового заноса) на траекторию движения тракторной транспортной единицы. Движение тракторной транспортной единицы предполагается плоским, параллельным неподвижной опорной плоскости Q , без учета вертикального перемещения ее частей. Движение каждого сегмента блока описывается движением фигуры, представляющей собой проекцию сегмента на опорную плоскость, на которой жестко закреплена система координат OXY . Силы веса тягача и полуприцепа G_{tr} и G_{st} приложены к центрам тяжести этих сегментов.

Упрощение реальных динамических систем должно базироваться на трех основных принципах: цели исследования, режимы работы и динамические свойства исследуемой системы [42].

Получить математическую модель колесной машины можно традиционными методами, используя уравнение Лагранжа второго рода на основе аналитической модели. Для анализа динамических параметров рассматриваемого тягача, его конструктивных особенностей, а также исследования задачи взаимодействия колесного тягача и полуприцепа предлагается схема (рисунок 19), где тягач и полуприцеп идеализируются как два абсолютно твердых тела с собственными центрами тяжести.

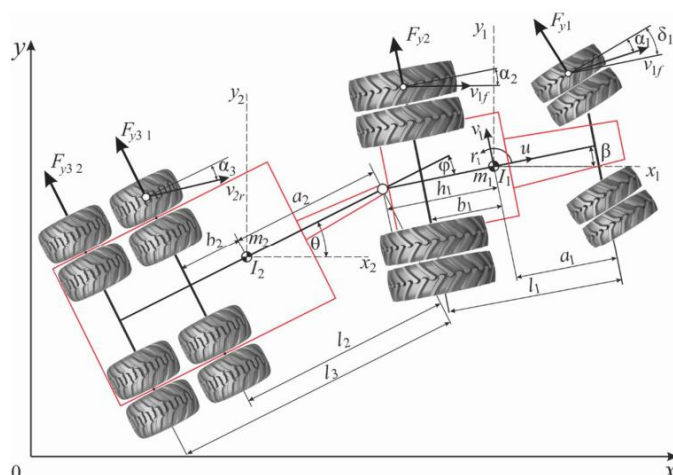


Рисунок 19 – Система координат математической модели криволинейного движения ГТА

Корпуса в агрегате сочленены с одностепенным шарниром и установлены на упругих основаниях, податливых в поперечном, продольном и горизонтальном угловом направлениях [99, 110]. Его динамика описывается моделью, представляющей движения полуприцепа и тягача с отклонением их от курса [146]. Согласно рисунку 19 локальные системы координат (x_1, y_1) и (x_2, y_2) центрированы в центрах тяжести тягача и полуприцепа соответственно [141].

При составлении уравнений движения рассматриваемой системы необходимо прибегнуть к допущениям [99]:

- тягач и полуприцеп в составе ГТА движется жестко, устойчиво, по ровной горизонтальной поверхности, без каких-либо колебаний;
- трактор симметричен в своей продольной плоскости;
- поступательная скорость агрегата постоянна;

- колеса находятся в непрерывном движении без бокового заноса;
- жесткость шин как тягача, так и его полуприцепа постоянна;
- левая и правая сдвоенные шины на осях тягача и полуприцепа могут быть объединены в равноценные шины;
- изгиб и угол скольжения шин малы, уравнения движения линейны;
- на транспортную единицу трактора не действуют аэродинамические силы.

Предположение об установившемся движении системы без поступательных колебаний распространено при изучении устойчивости движения и управляемости транспортных средств [141].

Математическое описание движения звеньев ГТА выполнено с помощью уравнения Лагранжа 2-ого рода на основании расчетной схемы (рисунок 19).

Положение ГТА относительно введенной системы координат определяется курсовым углом направляющего звена и координатами точек основных траекторий прицепного звена, которые находятся в функциональной зависимости от положения управляемых колес трактора и скорости его движения [117].

Кинетическая энергия системы может быть выражена как (37)

$$\begin{aligned}
 T &= 0,5 m_1(\dot{x}^2 + \dot{y}_1^2) + 0,5m_2(\dot{x}^2 + \dot{y}_2^2) + 0,5I_1\dot{\beta}^2 + 0,5I_2\dot{\theta}^2 = \\
 &= 0,5(m_1 + m_2)(\dot{x} + \dot{y}_1^2) + 0,5m_2(h_1^2\dot{\beta}^2 - 2h_1\dot{y}_1\dot{\beta}) + \\
 &+ 0,5m_2(a_2^2\dot{\theta}^2 - 2\dot{y}_1a_2\dot{\theta} + 2h_1\beta\dot{a}_2\dot{\theta}) + 0,5I_1\dot{\beta}^2 + 0,5I_2\dot{\theta}^2.
 \end{aligned} \quad (37)$$

Обобщенные силы получены с использованием виртуальной работы (38)

$$\begin{aligned}
 \Delta W &= (-F_{y1}\delta_1 - F_{y3}\varphi - F_{y4}\varphi)\Delta x + F_{y1}\Delta(y_1 + a_1\beta) + \\
 &+ F_{y2}\Delta(y_1 - b_1\beta) + F_{y3}\Delta(y_1 - h_1\beta - l_2\theta) + \\
 &+ F_{y4}\Delta(y_1 - h_1\beta - l_3\theta).
 \end{aligned} \quad (38)$$

Обобщенные силы для каждого положения ГТА (39)

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= -F_{y1}\delta_1 - F_{y31}\varphi - F_{y32}\varphi \\ Q_{y1} &= F_{y1} + F_{y2} + F_{y31} + F_{y32} \\ Q_\beta &= a_1F_{y1} - b_1F_{y2} - h_1F_{y31} - h_1F_{y32} \\ Q_\theta &= -l_2F_{y31} - l_3F_{y32} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Силы на шинах выражены в местных координатах (40)

$$\left. \begin{aligned} F_{y1} &= -[C_1(v_1 + a_1r_r)/u] + C_1\delta_1; \\ F_{y2} &= -C_2(v_1 - b_1r_r)/u; \\ F_{y31} &= -[C_{31}(v_1 - h_1r_r - l_2\dot{\theta})/u] + C_{31}\varphi; \\ F_{y32} &= -[C_{32}(v_1 - h_1r_r - l_3\dot{\theta})/u] + C_{32}\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Уравнения движения ГТА (41)

$$\begin{aligned} &(m_1 + m_2)(\dot{v}_1 + ur_1) - [m_2(h_1 + a_2)]\dot{r}_1 - m_a a_2 \varphi'' = \\ &= -\{(C + C_t)v_1 + [C_{s_1} - C_{31}(h_1 + l_2) - C_{32}(h_1 + l_3)r_1]\}/u + C_1\delta_1 - \\ &- hm_2(\dot{v}_1 + ur_1) + [I_1 + m_2h_1(h_1 + a_2)]\dot{r}_1 + m_2h_1a_2\ddot{\varphi} = \\ &= -\{(C_{s_1} - C_t h_1)v_1 + [C_{q_1^2} + C_{31}h_1(h_1 + l_2) + C_{32}h_1(h_1 + l_3)]r_1 + \\ &+ (C_{31}h_1l_2 + C_{32}h_1l_3)\dot{\varphi} + C_t h_1 u \varphi\}/u + C_1 a_1 \delta_1 - m_2 a_2 (\dot{v}_1 + ur_1) + \\ &+ [I_2 + m_2 a_2 (h_1 + a_2)]\dot{r}_1 + (I_2 + m_2 a_2^2)\ddot{\varphi} = \\ &= -\{-(C_{31}l_2 + C_{32}l_3)v_1 + [C_{31}l_2(h_1 + l_2) + C_{32}l_3(h_1 + l_3)]r_1 + \\ &\quad + [C_{31}l_2^2 + C_{32}l_3^2\dot{\varphi} + (C_{31}l_2 + C_{32}l_3)u\varphi]\}/u. \end{aligned} \quad (41)$$

где v_1 – боковая скорость в центре тяжести трактора, м/с;

r_1 – скорость рыскания трактора ($r_1 = \dot{\beta}$), м/с;

φ – относительный угол между трактором и полуприцепом, °. Угол поворота полуприцепа определяется как θ , где $\theta = \beta + \varphi$.

Математическая модель, описывающая движение ГТА, позволяет рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующих на ГТА. Полученные при анализе маневренности ГТА зависимости могут быть использованы при исследовании эксплуатационно-технических свойств ГТА в качестве основы для определения траекторий движения звеньев ГТА.

Проведен анализ условий проходимости тракторной транспортной единицы с целью оценки параметров шин трактора и полуприцепа. Функции, полученные при анализе маневренности транспортного средства, могут быть

использованы при исследованиях эксплуатационно-технических свойств транспортных средств в качестве расчетных формул для определения траекторий движения его составных частей при транспортировке торфяных материалов в торфяных карьерах. Такой аналитический подход обеспечил понимание процесса движения агрегата и основание для последующего компьютерного моделирования процесса.

2.5 Анализ производительности ГТА

Вопросам обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) на карьерах посвящено большое количество работ, что связано с определяющей ролью этого оборудования в себестоимости добычи полезных ископаемых, темпах развитии горных работ и др. Решение задач в этой области требуется в двух аспектах [27]:

- теоретические исследования, связанные с поиском рациональных параметров горных и транспортных машин;
- прикладные расчеты для определения типов, моделей и количества горного оборудования при проектировании карьеров или их техническом перевооружении.

Одним из важных вопросов является правильный подбор выемочно-транспортных комплексов по набору взаимоувязанных факторов: соотношению вместимости ковша экскаватора и кузова прицепа (массовый и объемный модули ЭАК по Кулешову А.А. [27], количеству ГТА, обслуживающих экскаватор, их грузоподъемности. При этом следует учитывать скорость движения машины и массу груза в кузове [6]. Так как поступательная скорость транспортного агрегата низкая, и минимальна масса перевозимого груза, следовательно, производительность на транспортных работах становится низкой [52].

При функционировании выемочно-транспортных комплексов типа экскаватор-самосвал в горной промышленности одним из показателей, влияющих на производительность является коэффициент согласования MF

(Match Factor), как отношение производительности экскаватора к производительности самосвала (парка самосвалов) (рисунок 20) [142].

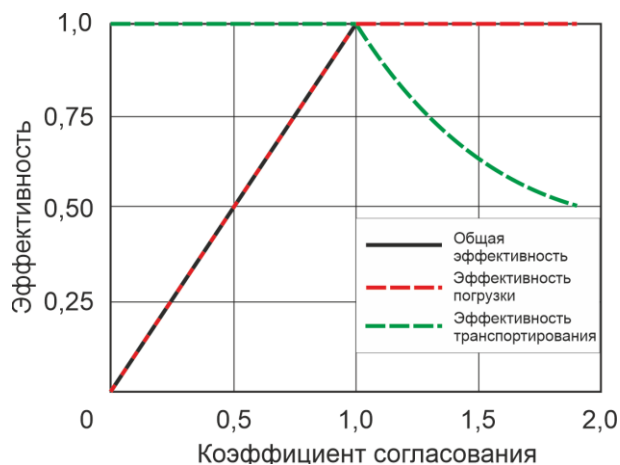


Рисунок 20 – Эффективность проведения выемочно-транспортных операций от величины коэффициента согласования [142]

При значении $MF < 0,5$ производительность экскаватора недостаточна (самосвалы простаивают в ожидании погрузки), при $MF > 1$ парк самосвалов меньше, чем это необходимо (экскаватор простаивает в ожидании погрузки). Рациональный размер парка самосвалов следует определять с учетом коэффициента согласования [142].

Анализ продолжительности рабочего цикла ГТА показывает, что величина $t_{ц}$ зависит от снаряженной массы полуприцепа и дальности транспортирования, что подтверждается графиком, приведенным на рисунке 21 [9].

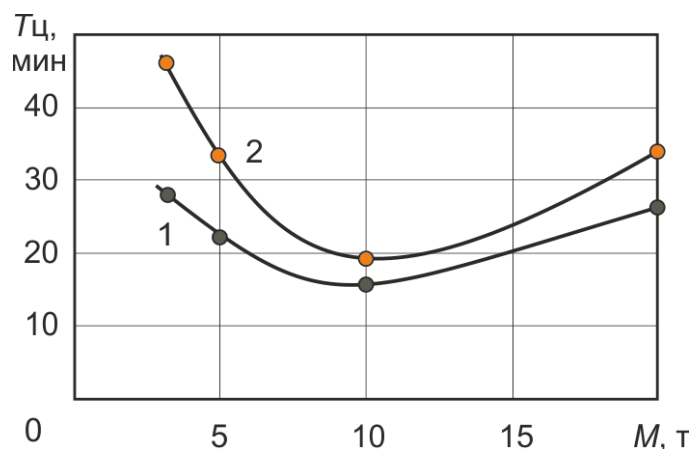


Рисунок 21 – Продолжительность рабочего цикла ГТА в зависимости от полной массы полуприцепа M и дальности транспортирования l_p : 1 – $l_p = 5$ км; 2 – $l_p = 10$ км

Для обеспечения бесперебойного функционирования одного выемочного экскаватора следует определить необходимое количество горнотранспортных агрегатов. Определение необходимого количества оборудования для рационального функционирования выемочно-транспортного комплекса в условиях комплексно-механизированного карьера помещено в Приложение Б [55].

2.6 Выводы по главе 2

Основным показателем, влияющим на величину погружения пневматического колеса в деформируемое опорное основание, является величина давления в пятне контакта шины с торфяной залежью. Снизить величину давления колеса на грунт возможно путем увеличения площади пятна контакта за счет уменьшения давления воздуха в шинах колес до 100 кПа, а также путем сдваивания колес на осях.

Методы *WES VCI* и *MMP/CI* направлены на определение проходимости транспортного средства на различных типах грунтов. Методология *WES VCI* будет более полезной при проведении подробного анализа проходимости, чтобы определить, можно ли использовать конкретную платформу для конкретных условий применения. *MMP*, с другой стороны, обеспечивает более простое сравнение и может использоваться в качестве первого сравнения между различными платформами и учитывает больше переменных параметров шин.

Представленные методы оценки проходимости по слабым грунтам основаны на эмпирических данных и получение надежных результатов расчетов и анализа зависит от требований:

1. все значения выражены в указанных единицах;
2. конструктивные решения анализируемых транспортных средств и их компоновки существенно не отклоняются от типовых решений;

Получены эмпирические выражения по взаимодействию движителей колесного полуприцепа на слабых грунтах. Математическая модель,

описывающая движение ГТА, позволяет рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующих на ГТА. Полученные при анализе маневренности ГТА зависимости могут быть использованы при исследовании эксплуатационно-технических свойств ГТА в качестве основы для определения траекторий движения звеньев ГТА.

При изучении воздействия колесного движителя машин на поверхности слабого грунта поверхности требуется:

- формализация описания процессов, описывающих взаимодействие движителей со слабым грунтом с позиций механики грунтов;
- экспериментальная проверка, верификации результатов теоретических исследований по взаимосвязи значений конусного индекса транспортного средства и физико-механических свойств слабых грунтов;
- интерпретации результатов исследований и их применение на практике.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований

На основе анализа научно-технической литературы, в соответствии с поставленной целью и задачами диссертации разработана программа экспериментальных исследований:

1. Заготовка натуральных образцов торфяного сырья верхнего слоя торфяного месторождения и отбор проб для проведения лабораторных исследований.
2. Определение прочностных характеристик несущего слоя торфяной залежи.
3. Проведение анализа физико-механических характеристик исследуемого торфяного сырья и определение способа проведения штамповых испытаний.
4. Проведение штамповых испытаний на твердой поверхности контакта.
5. Определение осадки колесного штампа при моделировании проезда полуприцепа на отобранном натуральном монолите слабого грунта.
6. Проведение экспериментальных исследований адгезионных свойств и угла соскальзывания торфяного сырья при моделировании разгрузки кузова.
7. Обоснование формы кузова полуприцепа.
8. Обобщение полученных результатов и определение рекомендаций по совершенствованию характеристик ГТА и его агрегатированию в зависимости от условий эксплуатации.

На первом (подготовительном) этапе при подготовке к экспериментальным исследованиям в полевых условиях было выбрано торфяное месторождение для отбора образцов.

Разработаны методы проведения экспериментальных исследований в полевых и лабораторных условиях. Осуществлены экспедиции на торфяные месторождения, где были проведены отбор проб и заготовка образцов верхнего слоя торфяной залежи.

На втором этапе проводилось планирование и последующее проведение экспериментов в лабораторных условиях в порядке, определяемом наличием исходных данных для определения взаимодействия колеса со слабым грунтом [16]. С учетом определения параметров многократной проходимости при создании математической модели была определена физическая модель колесного хода полуприцепа ГТА.

На заключительном этапе были определены зависимости показателей многократной проходимости модели колесного хода на образце несущего слоя торфяной залежи от количества повторов приложения нагрузки на ось физической модели. После этого проводились необходимые измерения.

3.2 Разработка методики проведения экспериментальных исследований

Для определения физико-механических свойств залежи необходимо провести испытания верхнего слоя торфяной залежи на сдвиг и смятие в полевых условиях, в ходе которых получены данные необходимые для оценки несущей способности торфяного основания [15].

Для оценки многократной проходимости по выбранному слабому грунту необходимо проведение штамповых испытаний модели колеса на верхнем слое торфяной залежи различной влажности в лабораторных условиях.

3.2.1 Методика проведения экспериментальных исследований в полевых условиях

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 выемочный (лопата, совок, нож, кольцо-пробоотборник) и измерительный (линейка). Также для отбора проб необходимы емкости в виде целлофановых пакетов и таза объемом 65л.

2. Определение ровного участка для отбора торфяного сырья верхнего несущего слоя залежи.

3. Разделить выбранный участок отбора проб на три части. В первой при помощи лопаты произвести отделение верхнего растительного слоя от торфообразующего органогенного слоя в пределах размеров 0,5 x 0,5 м.

4. Произвести отбор образца верхнего слоя торфяной залежи кольцом-пробоотборником. Повторить три раза. Образцы поместить в герметичные целлофановые пакеты.

5. Во второй части выбранного участка торфяной залежи без нарушения несущего слоя залежи произвести испытания на сдвиг на глубину 1 м с шагом 0,1 м. Измерения произвести в трех точках участка и записать в протокол испытаний.

6. В неповрежденном месте второго участка произвести испытания пенетрометром Eijkelkamp 0601SA в трех разных местах участка. Результаты записать в протокол.

7. В третьем участке при помощи лопаты и измерительного инструмента очертить контур монолита. Произвести выемку монолита верхнего слоя торфяной залежи и поместить в таз размерами 670x370x300 мм.

8. Провести штамповые испытания колесом в грунт с измерением и записью в протокол глубины проникновения колеса в грунт (осадки).

3.2.1.1 Нарботка опытных образцов торфяного сырья

Торфяная залежь месторождения Озерное Всеволожского района Ленинградской области, кадастровый номер 665 сложена верховым

пушицево-сфагновым торфом средней степени разложения $R=10\%$ (рисунок 22).

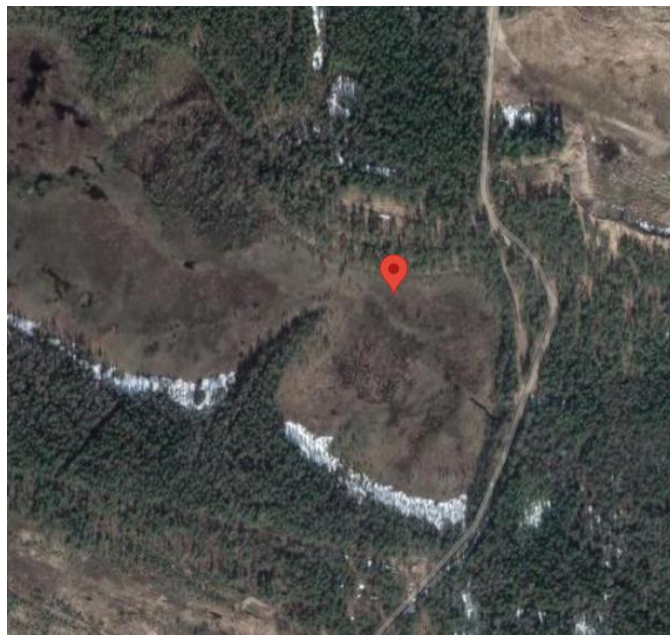


Рисунок 22 – Месторождение Озерное Всеволожского района Ленинградской области

Проведена заготовка натуральных монолитов ненарушенного верхнего слоя торфяной залежи размером 670x370x300 мм (рисунок 23).

Выемка монолита образца верхнего слоя торфяной залежи производилась следующим образом. С помощью лопаты и емкости, в который будет помещен монолит образца, очерчивается его контур. После по периметру очерченного контура на ширину лопаты выкапывается слой грунта глубиной, равной глубине емкости. Перед выемкой монолит срезается в основании при помощи ножа и лопаты. Далее по периметру внешнего контура нетронутой поверхности необходимо выложить опору в виде брусков или сучьев. При помощи рычага производится выемка минимум двумя лопатами одновременно без нарушения структуры образца. Перевернуть образец травянистым слоем вниз, надеть сверху таз вверх дном, перевернуть таз с торфяным монолитом внутри дном вниз. Если образец не помещается в требуемую емкость, его следует выровнять ножом в нижнем торфяном слое без нарушения верхнего слоя.



Рисунок 23 – Подготовка монолита торфяной залежи

Образцы были доставлены в Горный университет для проведения лабораторных исследований.

3.2.1.2 Методика отбора образцов торфяной залежи и торфяного сырья

Для определения плотности торфяного образца в лабораторных условиях необходим отбор пробы с помощью цилиндрического пробоотборника (кольцо с заостренными кромками и известным объемом) [7]. Верхнюю зачищенную плоскость грунта выравнивают, срезая излишки грунта ножом, устанавливают на ней режущий край кольца и вдавливают с вращением в торфяную залежь (рисунок 24) фиксируя границу образца для испытаний. Затем грунт снаружи кольца обрезают на глубину 5-10 мм ниже режущего края кольца, формируя столбик диаметром на 1-2 мм больше наружного диаметра кольца. После заполнения кольца грунт подрезают на 8-10 мм ниже режущего края кольца и отделяют его.



Рисунок 24 – Кольцо-пробоотборник

Грунт, выступающий за края кольца, срезается косым движением ножа, затем, поверхность грунта выравнивается по краям кольца. Вынутый вместе с кольцом торфяной монолит зачищается острым ножом по торцу пробоотборника, выдавливается из пробоотборника и взвешивается. Масса образца торфа, деленная на объем, дает плотность торфа в залежи. Для получения достоверного результата число измерений должно быть не менее пяти [7].

3.2.1.3 Методика определения физико-механических свойств грунта

Для испытаний при зондировании торфяных залежей используется сдвигомер-крыльчатка конструкции Калининского политехнического института СК-10 для испытания слабых грунтов [7].

Сдвигомер-крыльчатка СК-10 (рисунок 25) 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.

Деформация пластины при повороте рукоятки с призмой фиксируется индикатором часового типа, который неподвижен по отношению к упору [7].

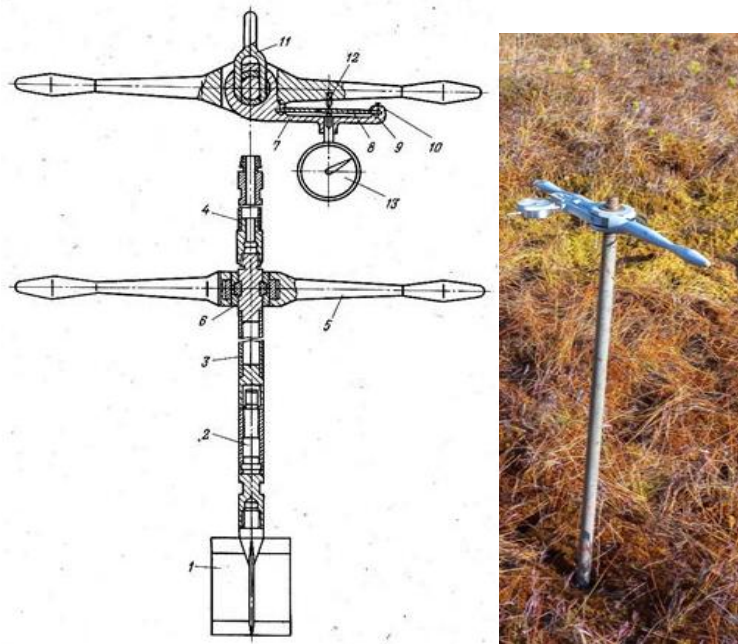


Рисунок 25 – Сдвигомер-крыльчатка СК-10: 1 – крыльчатка; 2 – корпус; 3 – штанга; 4 – втулка крепления; 5 – рукоятка; 6 – втулка; 7 – корпус динамометра; 8 – плоская пружина; 9 – призма; 10 – крепление пружины; 11 – вилка для фиксации корпуса динамометра на штанге; 12 – нажимное устройство; 13 – индикатор часового типа.

Испытание заключается в измерении максимального крутящего момента, возникающего при срезе грунта во время вращения в нем крестообразной лопасти [7]. Методика зондирования торфяной залежи сдвигомером-крыльчаткой СК-10 заключается в следующем (рисунок 25). Измерительная головка надевается на переходник, в отверстие переходника и упора завинчивается стопорный винт. Затем при помощи рукоятки крыльчатка погружается в торфяную залежь на нужную глубину. Проверяется положение стрелки индикатора, и циферблат устанавливается на нуль. После указанных операций и проверки вертикального положения штанг, обеими руками осуществляется поворот измерительной головки по часовой стрелке. По мере роста угла поворота отклонение стрелки индикатора возрастает. В процессе поворота следят за стрелкой индикатора до тех пор, пока не прекратится ее отклонение и не начнется спад. Положение стрелки, соответствующее началу ее обратного движения,

представляет собой искомое значение. Эта величина записывается в журнал. Обычно разрушение грунта происходит при углах поворота от 20 до 60°.

Предварительно в лабораторных условиях была проведена тарировка упругой пластины сдвигомера-крыльчатки СК-10. Тарировочный график представлен на рисунке 26.

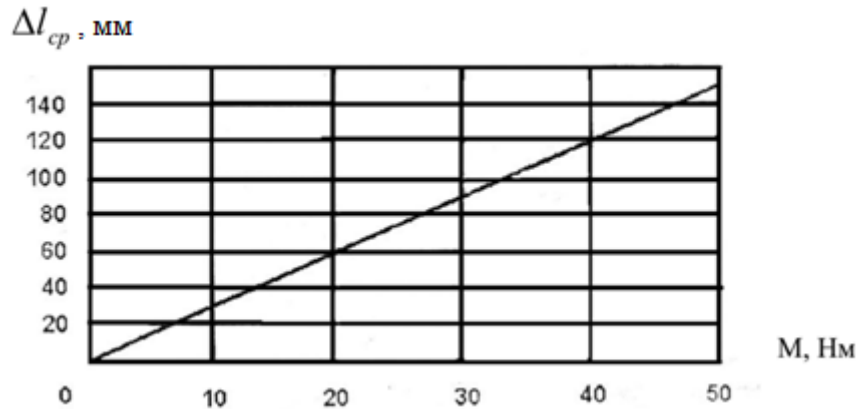


Рисунок 26 – Тарировочный график упругой пластины сдвигомера-крыльчатки СК-10

Постоянная упругой пластины сдвигомера-крыльчатки СК-10 составила 3,0 дел/Н (42)

$$n = \frac{\Delta l}{M}. \quad (42)$$

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

Постоянная крыльчатки определяется как выражение K составляет (43)

$$K = \frac{\pi d^2}{2} \cdot \left(\frac{d}{a} + h \right), \quad (43)$$

где a – постоянный параметр, принимаемый равным 3 при сдвиге на поверхности грунта и 6 в его толщине;

h – высота крыльчатки, $h=0,10$ м;

$d=0,054$ м – диаметр крыльчатки.

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

Формула для расчета сопротивления грунта сдвигу (в Па) (44)

$$\tau = \frac{M}{K} = \frac{\Delta l}{Kn}, \quad (44)$$

где M – крутящий момент, Н/м;

Δl – показания индикатора сдвигомера-крыльчатки СК-10;

n – постоянная упругой пластины;

K – постоянная крыльчатки, м³.

Измерения сопротивления грунта q проникновению [28] (показатель конусности) были выполнены с помощью пенетрометра Eijkelkamp 0601SA (рисунок 27) с коническим наконечником с площадью основания 40 см², с углом конуса 60°. Измерения проводились до глубины 1,0 м с шагом 0,1 м.



Рисунок 27 – Сдвигомер-крыльчатка СК-10 и пенетрометр Eijkelkamp 0601SA
Значение удельного сопротивления грунта (45)

$$q = \frac{F}{S}, \quad (45)$$

где F – сила, измеренная динамометром пенетрометра Eijkelkamp 0601SA;

S – площадь боковой поверхности конуса.

3.2.1.4 Методика определения осадки колеса в слабое основание

Установление глубины колеи при приложении многократной нагрузки на слабое основание торфяной залежи, сопоставимой созданию моделью колеса с шиной R330/88 давления в пятне контакта 30 кПа, позволило

предварительно оценить характер увеличения осадки при штамповых испытаниях моделью колеса [32].

Для определения осадки колеса в слабое основание необходимо подготовить ровную площадку без растительного слоя на торфяной залежи размерами, сопоставимыми с размерами штампа и базовыми опорами. Базовые опоры, необходимые для установки точки отсчета глубины колеи, размещают симметрично с края от пятна контакта шины с грунтом перпендикулярно оси модели колеса (рисунок 28).



Рисунок 28 – Определение осадки методом штамповых испытаний модельным колесом с шиной R330/88

Затем на ось колеса прилагают нагрузку, равную 900 Н, создаваемую массой человека, после чего производят измерение осадки с помощью планки, устанавливаемой на базовые опоры, и линейки. Опыт повторяют 10 раз.

3.2.2 Методика проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях

Целью лабораторных экспериментальных исследований является определение характера поведения осадки сдвоенных колес в грунт вариативной влажности, определение влияния числа нагружений на

величины площади пятна контакта колеса с грунтом и его уплотнения и установление формы кузова, позволяющей наиболее быстро осуществлять разгрузку влажного торфяного сырья.

- Проектирование и создание лабораторного стенда штамповых испытаний на натуральном образце торфяной залежи.
- Проведение штамповых испытаний на натуральном образце торфяной залежи.
- Проектирование и создание лабораторного стенда для определения угла соскальзывания торфяного сырья с поверхности кузова.
- Определение угла соскальзывания торфяного сырья с поверхности кузова.

На подготовительном этапе был выбран рациональный комплект оборудования, в который входят: штамп в виде сдвоенных колес с типом шин R330/88, размеры которых соизмеримы с размерами торфяного монолита, средства измерения в виде линейки и штатива с рейсшиной и шкалой деления. Была выбрана создаваемая нагрузка на сдвоенные колеса – 900 Н, соответствующая давлению 30 кПа, необходимого для моделирования аналитически выбранного типоразмера шин 600/50R22.5 при значении $MMP=28,89$ кПа и $VCI_{50}=28,32$ psi. Давление в шине принято атмосферное, для моделирования максимального прогиба шины с учетом установки предельной минимизации ее жесткости.

Для определения угла соскальзывания торфяного сырья с поверхности кузова был определен стандартный метод проведения испытаний соскальзывания формованного куска торфяного сырья естественной влажности 89 % с моделей поверхности кузова, в поперечном сечении повторяющих существующие формы кузова, а также форму предложенного технического решения. Эксперименты проводились как на гладких, так и на перфорированных моделях кузова. В состав оборудования входят: штатив со штангой с винтовой передачей, крюк, штангенциркуль, плоскость с зацепом.

3.2.2.1 Лабораторный стенд для штамповых испытаний

Для оценки количества проходов и глубины осадки ГТА со сдвоенными колесами в торфяной грунт проведено физическое моделирование процесса проезда колесного транспорта по слабому грунту. Модель грунта – 2 натуральных монолита естественной влажности $w=89\%$ и $w=84\%$, извлеченных из торфяной залежи без нарушения деятельного верхнего слоя (акротелм) размерами 670x370x300 мм (торфяное месторождение Озерное Всеволожского района Ленинградской области, кадастровый номер 665).

Модель колеса – сдвоенные на оси колеса, тип шины R330/88. Давление в шине принято атмосферное, для моделирования максимального прогиба шины с учетом ее жесткости (рисунок 29).

В эксперименте моделировался процесс нагрузки, создаваемой сдвоенными колесами двух последовательно расположенных осей – двойное нагружение штампа подряд, имитируя проезд двухосного полуприцепа. При этом нагружение и деформирование верхнего слоя торфяной залежи происходит в течение долей секунды.



Рисунок 29 – Лабораторный стенд для штамповых испытаний

Нагрузка на сдвоенные колеса принята постоянной – 900 Н, соответствующая созданию давления, равного 30 кПа, необходимого для моделирования аналитически выбранного типоразмера шин 600/50R22.5 при значении $MMP=28,89$ кПа и $VCI_{50}=28,32$ psi. После двух циклов нагружения происходила выдержка (3 мин.) грунта без нагрузки до стабилизации величины его осадки.

3.2.2.2 Лабораторный стенд для определения угла соскальзывания торфяного сырья с поверхности кузова

Угол ссыпания зависит от коэффициента трения материала о плоскость ссыпания, от структуры поверхности, по которой происходит ссыпание (поверхность может быть гладкой, шероховатой, ребристой и т. д.), а также от влажности самого материала.

Определение угла соскальзывания:

1. Уложить на подъемной доске прямоугольный образец материала.
2. Медленно вращая вал, привести подъемную доску в наклонное положение.
3. Когда материал начнет соскальзывать, прекратить подъем доски и записать угол ее наклона.

Измерение сопротивления скольжению осуществлялось упрощенным сравнением с помощью стандартного метода наклонной плоскости, реализующего обычный эксперимент в механической физике, в котором край платформы наклоняется до точки, в которой происходит соскальзывание материала с поверхности. Угол наклона плоскости в этой точке равен коэффициенту трения покоя.

Описание установки. Для определения угла соскальзывания влажного торфяного сырья с плоскости, выполненной из разных материалов, создан прибор, состоящий из стойки и маховика с фрикционной передачей, прицепного устройства, подъемной доски, и угломера 4, установленного у оси вращения подъемной доски (рисунок 30).

При определении угла соскальзывания используется натуральное торфяное сырье при разных значениях массовой доли влаги.

Условия эксперимента: насыпная плотность торфяного сырья $\rho=837 \text{ кг/м}^3$; влажность торфяного сырья 88 %; масса параллелепипеда торфяного сырья $m_{\text{тс}}=0,48 \text{ кг}$; площадь контакта параллелепипеда с основанием $S_{\text{тс}}=0,0074 \text{ м}^2$; давление материала на основание $p_{\text{тс}}= 636,3 \text{ Па}$.



Рисунок 30 – Лабораторный стенд для определения угла соскальзывания торфяного сырья с поверхности кузова

Результаты эксперимента записывались в лабораторный журнал.

3.3 Методика определения характеристик образцов торфяного сырья

От каждого монолита необходимо отрезать ножом четверть, все их соединить в одну пробу; раздробить ножом и все перемешать; положить в мешок с zipером, закрыть герметично и определить относительную влажность торфа (w , %).

Измерение влажности экскавированного и обогащенного образцов торфяного сырья проводилось посредством анализатора влажности AND MF-50 (рисунок 31).

Влажность образцов торфа определялась как (46) [7]

$$w_k = (m_b - m_c)100/m_b, \quad (46)$$

где m_b , m_c - соответственно, масса образцов во влажном и высушенном состоянии, г.



Рисунок 31 – Анализатор влажности AND MF-50

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

Плотность – одна из важнейших характеристик торфяной залежи. Плотностью торфа называется масса торфа в единице объема образца ($\text{кг}/\text{м}^3$)

(47)

$$\rho = m/V, \quad (47)$$

где m и V – соответственно масса (кг) и объем (м^3) образца.

Необходимое оборудование:

- кольцо-пробоотборник;
- лабораторные весы по ГОСТ 53228-2008;
- штангенциркуль по ГОСТ 166-89;
- нож.

Плотность торфа в залежи определялась методом режущего кольца.

Размеры пробоотборника: $D=90$ мм; $H=20$ мм.

Объем пробоотборника $V=127234,5 \text{ мм}^3 = 0,000127 \text{ м}^3$

3.4 Методика определения пятна контакта шин на твердом основании

Свойства опорной проходимости шин характеризуются площадью пятна контакта [76]. Определение давления на грунт основано на площади пятна контакта шин на жестком основании. Экспериментальное определение

площади пятна контакта шин на жестком основании дает точные значения для конкретных шин (рисунок 32). Определения статических характеристик модельных шин на жестком основании проводились в лабораторных условиях. Фиксировались отпечатки шин на бумаге при изменении нагрузки и давления в шине.



Рисунок 32 – Модели колес (слева) R330/88, R300/85 и R250/80.

Для экспериментов были отобраны колеса с типоразмерами шин R330/88, R300/85 и R250/80. С данными колесами возможно применять небольшую нагрузку на ось при достижении требуемого давления на опорную поверхность, что определяет их выбор для проведения лабораторных исследований взаимной деформации грунта и колеса.

Фиксировались отпечатки шин на бумаге при изменении нагрузки и давления в шине.

3.5 Методика определения нормальных напряжений сжатия слабого грунта под колесом

При проведении исследований наряду с глубинным используют и поверхностное зондирование. Для этого применяют микропенетrometer ВСЕГИНГЕО МВ-2 (рисунок 33). Он предназначен для опробования пород в обнажениях, выделения грунтов с низкой прочностью. Усилия, передающиеся на конус, зависят только от параметров пружины, и, как следствие, не влияют на результаты измерений, в отличие от других приборов.

По данным испытаний определяют величину предельного сопротивления (48)

$$P_m = \frac{P}{h^2} \quad (48)$$

где P — нагрузка на конус, кН; h — глубина погружения конуса, м.

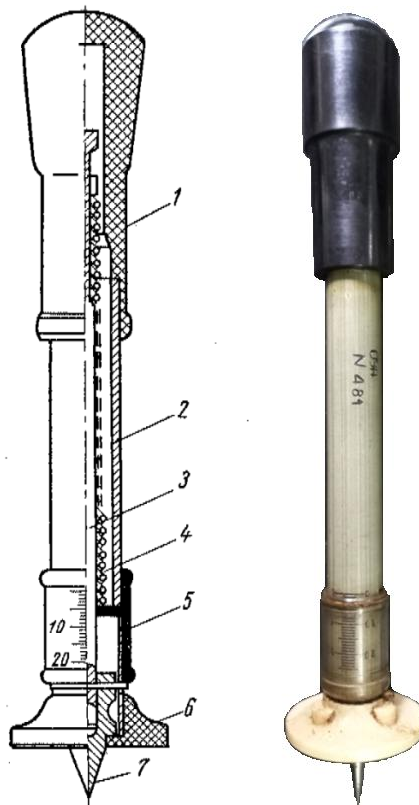


Рисунок 33 – Микропенетрометр ВСЕГЕНГЕО МВ-2. 1 – ручка; 2 – корпус, 3 – шток; 4 – пружина; 5 – движок; 6 – опорная плита; 7 – сменный конус

Прочность оценивают по удельному сопротивлению пенетрации (49)

$$q = \frac{P}{h^2} \quad (49)$$

где q – удельное сопротивление грунта пенетрации, кПа;

P – сила сопротивления, измеренная по пенетрометру, кН;

h – глубина погружения конусного наконечника от поверхности грунта, м.

Перед испытанием зачищают дно шурфа лопатой, ножом или шпателем, добиваясь. Устанавливают на плоской горизонтальной поверхности грунта наконечник ручного пенетрометра, нажимая на его

ручку, погружают до ограничительной муфты или до шайбы и считывают показания силоизмерителя (рисунок 31).

На одной площадке делают не менее 6-ти уколов конусом микропенетromетра с измерением глубины его погружения.

Рассчитывают среднее значение, среднее квадратическое отклонение от среднего и коэффициент вариации по формулам (50), (51), (52) [64]:

$$X_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad (50)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_n - X_i)^2}; \quad (51)$$

$$V = \frac{S}{X_n}, \quad (52)$$

где X_n и X_i – среднее арифметическое и частные значения ($i=1/\dots/n$) измеряемой величины, соответственно;

n – число определений;

S и V – среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации измеряемой величины.

Если коэффициент вариации больше 0,3, то число измерений увеличивают, добиваясь снижения коэффициента вариации до значения, не превышающего 0,3, что соответствует нормальному распределению.

Перед замерахми проведена тарировка микропенетromетра (рисунок 34).

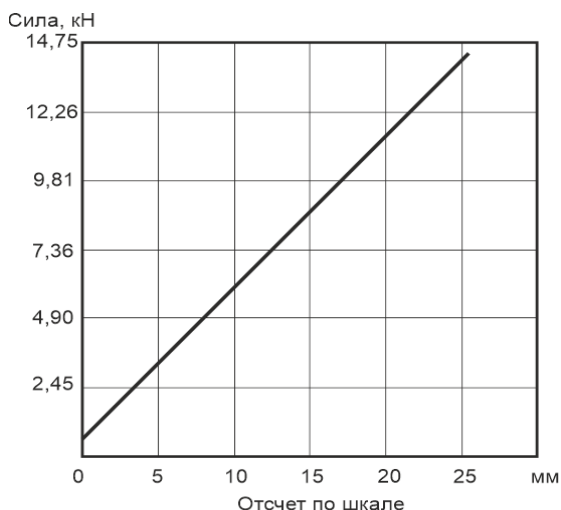


Рисунок 34 – Тарировочный график микропенетromетра

3.6 Методика планирования дробного факторного эксперимента

С помощью дробного факторного эксперимента можно найти математическое описание этого процесса в окрестности точки факторного пространства с координатами X_1 (мм), X_2 (мм) и X_3 (кН) с целью введения коррекции по данным параметрам (нейтрализации их влияния) [63].

В качестве исходных данных приняты данные из таблицы 9. Описание данного процесса в окрестности (·) факторного пространства с координатами [26]:

$$x_{10} = 550; \quad x_{20} = 1170; \quad x_{30} = 56.$$

Математическая модель в виде уравнения регрессии (53) [26]

$$y = \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 \tilde{x}_1 + \tilde{b}_2 \tilde{x}_2 + \tilde{b}_3 \tilde{x}_3; \quad (53)$$

где $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3$ – кодированные значения факторов и коэффициентов.

Интервалы варьирования:

$$\Delta x_1 = 50 \text{ мм}; \quad \Delta x_2 = 100 \text{ мм}; \quad \Delta x_3 = 4 \text{ кН};$$

т.е.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{10} \pm \Delta x_1 = 550 \pm 50 \text{ мм}; \\ x_2 &= x_{20} \pm \Delta x_2 = 1170 \pm 100 \text{ мм}; \\ x_3 &= x_{30} \pm \Delta x_3 = 56 \pm 4 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Верхние и нижние уровни факторов:

$$x_{1\text{в}} = 600 \text{ мм}; \quad x_{2\text{в}} = 1270 \text{ мм}; \quad x_{3\text{в}} = 60 \text{ кН};$$

$$x_{1\text{н}} = 500 \text{ мм}; \quad x_{2\text{н}} = 1070 \text{ мм}; \quad x_{3\text{н}} = 52 \text{ кН};$$

$$\tilde{x}_{1\text{в}} = \frac{x_{1\text{в}} - x_{10}}{\Delta x_1} = \frac{600 - 550}{50} = +1;$$

$$\tilde{x}_{1\text{н}} = \frac{x_{1\text{н}} - x_{10}}{\Delta x_1} = \frac{500 - 550}{50} = -1;$$

$$\tilde{x}_{2\text{в}} = \frac{x_{2\text{в}} - x_{20}}{\Delta x_2} = \frac{1270 - 1170}{100} = +1;$$

$$\tilde{x}_{2\text{н}} = \frac{x_{2\text{н}} - x_{20}}{\Delta x_2} = \frac{1070 - 1170}{100} = -1;$$

$$\tilde{x}_{3\text{в}} = \frac{x_{3\text{в}} - x_{30}}{\Delta x_3} = \frac{64 - 60}{4} = +1;$$

$$\tilde{x}_{3\text{н}} = \frac{x_{3\text{н}} - x_{30}}{\Delta x_3} = \frac{54 - 60}{4} = -1;$$

Полная реплика содержит $N=2^k=8$ опытов. Полуреплика содержит $N=2^{k-1}=4$ опыта для проведения дробного факторного эксперимента.

Для воспроизводимости процесса и уменьшения погрешность модели, каждый из четырех опытов выполняется трижды и для каждой серии реализации определенного опыта вычисляется среднее значение (54) [26]

$$\bar{y}_i = \frac{y_{j1} + y_{j2} + y_{j3}}{3}. \quad (54)$$

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 10.

Таблица 10 - Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_1 , мм	X_2 , мм	X_3 , кН
1	-1	-1	-1	500	1070	52
2	+1	-1	+1	600	1070	60
3	-1	+1	+1	500	1270	60
4	+1	+1	-1	600	1270	52

3.7 Определение адгезии экскавированного торфяного сырья к кузову полуприцепа

Для определения адгезии (липкости) торфяного сырья разработан прибор (рисунок 35) с электронным динамометром (максимальная нагрузка, 45 кг, точность измерения – 10 г) и круглым штампом – стальной диск Ø30 мм, толщиной 5 мм, вдавливаемый в материал под нагрузкой 1 кг в течение 30 с. Постепенно и непрерывно маховиком увеличивается сила пока не произойдет отрыв. По результатам трех определений определяется среднеарифметическое значение удельного усилия.



Рисунок 35 – Прибор для определения адгезии торфяного сырья по способу постепенного нормального отрыва

Адгезия (липкость) определяется экспериментально в качестве удельной силы нормального отрыва или сдвига и обуславливает величину усилия внешнего трения (55)

$$F_a = P_o/S_o, \quad (55)$$

где P_o – сила отрыва, Н;

S_o – геометрическая площадь пластины, м².

3.8 Методика обработки результатов экспериментов

В целях снижения энергозатрат в процессе исследования с учетом времени и средств на проведение экспериментов за счет сокращения их количества был принят метод теории планирования эксперимента [63]. При этом за переменные факторы принимали ширину шин B (мм), диаметр шин D (мм) и полный вес груженого полуприцепа G (кН).

Предварительная обработка экспериментальных данных, вычисление эмпирических распределений и проверка гипотезы нормальности проводится методами математической статистики с использованием компьютерных программ. Полученные данные рассчитывались и обрабатывались на персональном компьютере с использованием программ Microsoft Excel, MathCad, графического редактора CorelDRAW и систем трехмерного проектирования КОМПАС-3D и AutoCAD.

3.9 Выводы по главе 3

Программа и методика экспериментальных исследований исходят из направления теоретических исследований. В соответствии с поставленными задачами определены методики проведения экспериментальных исследований. Задачи экспериментальных исследований решаются на основе разработанных методик, основывающихся на элементах действующих стандартов по колесному транспортному оборудованию и рекомендаций для проведения лабораторно-полевых и полевых экспериментов.

Для проверки поведения верхнего несущего слоя торфяной залежи после многократного приложения нагрузки на поверхность контакта

колесным ходом полуприцепа ГТА был проведен анализ торфяных месторождений и определены места сбора образцов торфяного сырья и заготовки монолита несущего слоя в соответствии с разработанной программой экспериментальных исследований в полевых условиях, разработаны методы отбора проб и проведения предварительных штамповых испытаний.

По разработанной программе экспериментальных исследований в лабораторных условиях были разработаны методы определения формы кузова и его материала в зависимости от влажности перевозимого торфяного сырья, а также методы определения упругой и пластической осадок при штамповых испытаниях на торфяном монолите. Подобрана используемая при проведении эксперимента контрольно-измерительная аппаратура.

Для проведения экспериментов разработаны и сконструированы, по разработанным программам и методам, лабораторные стенды по определению адгезии торфяного сырья к кузову, угла соскальзывания торфяного сырья в зависимости от его влажности, величины осадки колесного хода при многократном нагружении.

Выбран и обоснован план проведения многофакторного эксперимента, исследуемые факторы и уровни их варьирования, количество повторных экспериментов.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты определения прочностных свойств торфяной залежи

Требования к проходимости ГТА возрастают с увеличением влажности торфяной залежи, что может быть связано с более высоким сопротивлением уплотнению верхнего слоя колесами и большей связностью. В основном это связано с наличием у растительного слоя на поверхности грунта. Полученные значения индекса конусности и прочности на сдвиг торфяной залежи, измеренные в этом исследовании, совпадают с многочисленными материалами по исследованию физико-механических свойств торфяных залежей. При оценке проходимости торфяных машин усредненные значения предела прочности залежи на сдвиг $\tau=13,9$ кПа и величины удельного сопротивления грунта статическим зондированием $q=146$ кПа [4].

В рамках проведения полевого эксперимента при помощи кольцевого пробоотборника были отобраны пробы и в камеральных условиях определены величины плотности и влажности верхнего слоя торфяной залежи (таблица 11).

Таблица 11 – Плотность и влажность торфяной залежи

Проба	Количество монолитов	Влажность, %	Средняя масса пробы, 10^{-3} кг	Объем пробы, 10^{-5} м ³	Плотность залежи, кг/м ³
1	3	91,2	6,76	38,17	531,27
2	3	91,8	6,74	38,17	600,67
3	3	92,6	8,51	38,17	690,50

Результаты полевого эксперимента по оценке величины удельного сопротивления грунта q статическим зондированием и значений предела прочности залежи на сдвиг τ методом вращательного среза приведены на рисунке 36. Зондирование проводилось до глубины 1,0 м с шагом 0,1 м.

Значения этих параметров характеризуют условия прочности грунта, преобладавшие в верхнем слое неосушенной торфяной залежи в период проведения исследований. Торфяная залежь на исследованном участке

представлена верховым фускум торфом степенью разложения $R=10\%$, $w=91\%$.

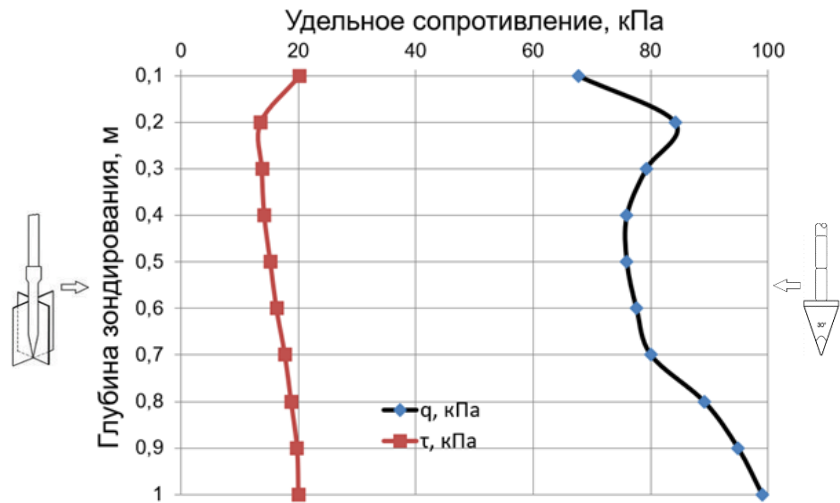


Рисунок 36 – Изменение параметров прочности верхнего слоя неосушенной торфяной залежи по глубине верхнего слоя

В таблицах 12-13 приведены данные полевых исследований сопротивления сдвигу и результаты измерений пенетрометром Eijkelkamp 0601SA (рисунок 34).

Таблица 12 – Результаты полевых исследований сопротивления сдвигу

№ эксп.	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	25	34	40	45	46	46	40	36	30
1.2	55	22	31	42	40	46	44	42	35	35
1.3	55	21	35	34	35	42	44	33	30	32
Ср.	53,33	22,66	33,3	38,7	40,0	44,7	44,7	38,3	33,7	32,3
τ, кПа	32,9	13,99	20,6	23,9	24,7	27,6	27,6	23,7	20,8	20,0

Таблица 13 – Результаты полевых исследований пенетрометром Eijkelkamp 0601SA

№ эксп.	Глубина зондирования, м									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	200	280	360	340	280	310	440	400	450	450
2	400	440	280	280	360	320	270	320	300	370
3	220	300	320	300	280	310	260	360	400	380
Ср.	273,3	340,0	320,0	306,7	306,7	313,3	323,3	360,0	383,3	400,0
q, кПа	67,6	84,1	79,2	75,9	75,9	77,5	80,0	89,1	94,9	99,0

В таблице 14 приведены данные по последовательному нагружению модельного колеса в торфяную залежь в полевых условиях.

Таблица 14 – Последовательное нагружение модельного колеса в торфяную залежь в полевых условиях

Количество воздействия нагрузки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Осадка h , мм	25	35	40	50	55	60	61	62	65	65

Отмечен рост глубины осадки колеса и ее постепенная стабилизация от многократности нагружения, что подтверждает общие тенденции по изменению глубины осадки на слабых грунтах [80].

Результаты полевых исследований подтвердили, что экспериментальные методы к описанию проходимости транспортных средств по поверхности исследуемых связных слабых грунтов сходным образом описывают условия проходимости и являются основой для разработки методик оценки проходимости транспортных агрегатов.

4.2 Результаты анализа выбора шин

Математическая модель является математическим отображением наиболее существенных сторон изучаемой системы. Среднее максимальное давление ММР определяется в основном шириной шин B (мм), диаметром шин D (мм) и полным весом груженого полуприцепа G (кН). Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в таблице 15 [26].

Таблица 15 – Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_1 , мм	X_2 , мм	X_3 , кН	Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	\bar{Y}_i	S_i^2
1	-1	-1	-1	500	1070	52	39,86	40,33	40,29	40,16	0,068
2	+1	-1	+1	600	1070	60	38,59	38,48	38,17	38,33	0,062
3	-1	+1	+1	500	1270	60	36,19	36,81	36,23	36,41	0,246
4	+1	+1	-1	600	1270	52	27,60	27,72	28,09	27,80	0,186

Вычисление оценки дисперсии для каждой серии реализаций отдельного опыта, которая определяет разброс значений функции отклика от среднего $m=3$ [26]

$$S_{y_1}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{n=1}^m (y_{n1} - \bar{y}_1)^2 =$$

$$= \frac{1}{3-1} [(39,86 - 40,16)^2 + (40,33 - 40,16)^2 + (40,29 - 40,16)^2] = 0,068$$

$$\begin{aligned}
S_{y_2}^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{n=1}^m (y_{n1} - \bar{y}_1)^2 = \\
&= \frac{1}{3-1} [(38,59 - 38,33)^2 + (38,48 - 38,33)^2 + (38,17 - 38,33)^2] = 0,062 \\
S_{y_3}^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{n=1}^m (y_{n1} - \bar{y}_1)^2 = \\
&= \frac{1}{3-1} [(36,19 - 36,41)^2 + (36,81 - 36,41)^2 + (36,23 - 36,41)^2] = 0,246 \\
S_{y_4}^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{n=1}^m (y_{n1} - \bar{y}_1)^2 = \\
&= \frac{1}{2-1} [(27,60 - 27,80)^2 + (27,72 - 27,80)^2 + (28,09 - 27,80)^2] = 0,186.
\end{aligned}$$

Дисперсия воспроизводимости

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{y_i}^2 = \frac{1}{4} (0,068 + 0,062 + 0,2455 + 0,186) = 0,108.$$

Число степеней свободы для S_y^2 при $R=N$

$$f_y = R(m-1) = 4(3-1) = 8.$$

Коэффициенты регрессии (в качестве y_i берется \bar{y}_i)

$$\begin{aligned}
\tilde{b}_0 &= \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} = \frac{1}{4} (40,16 + 38,33 + 36,41 + 27,80) = 35,675. \\
\tilde{b}_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \tilde{x}_{ji} . \\
\tilde{b}_1 &= \frac{1}{4} [y_1 \cdot (-1) + y_2 \cdot (+1) + y_3 \cdot (-1) + y_4 \cdot (+1)] \\
&= \frac{1}{4} (-40,16 + 38,33 - 36,41 + 27,80) = -2,61 \\
\tilde{b}_2 &= \frac{1}{4} [y_1 \cdot (-1) + y_2 \cdot (-1) + y_3 \cdot (+1) + y_4 \cdot (+1)] \\
&= \frac{1}{4} (-40,16 - 38,33 + 36,41 + 27,80) = -3,57 \\
\tilde{b}_3 &= \frac{1}{4} [y_1 \cdot (-1) + y_2 \cdot (+1) + y_3 \cdot (+1) + y_4 \cdot (-1)] \\
&= \frac{1}{4} (-40,16 + 38,33 + 36,41 - 27,80) = 1,7.
\end{aligned}$$

Дисперсия коэффициентов модели

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{N} = \frac{0,107875}{4} \cong 0,027.$$

Среднеквадратичная ошибка в определении коэффициентов модели

$$S_b = \sqrt{S_b^2} = 0,164.$$

При доверительной вероятности $P=0,95$; числе степеней свободы для $S_y^2 - f_y = 8$, значимость коэффициентов регрессии по табличному значению коэффициента Стьюдента $t = 2,31$ [26].

Истинные значения коэффициентов находятся в доверительном интервале

$$|\Delta b| = S_b \cdot t = 0,164 \cdot 2,31 = 0,379.$$

Для оценки значимости коэффициентов регрессии проводится анализ соотношения

$$|b_0| = 35,68 > |\Delta b|;$$

$$|b_1| = -2,61 > |\Delta b|;$$

$$|b_2| = -3,57 > |\Delta b|;$$

$$|b_3| = 1,7 > |\Delta b|.$$

Так как, приведенные равенства выполняются, то коэффициенты регрессии и факторы считаются значимыми [26].

Уравнение полученной модели (56)

$$\hat{y} = 35,7 - 2,61\tilde{x}_1 - 3,57\tilde{x}_2 + 1,7\tilde{x}_3. \quad (56)$$

Для последующего проведения проверки адекватности модели находятся расчетные значения функции отклика по полученной регрессионной формуле [26]

$$\hat{y}_1 = 35,7 - 2,6(-1) - 3,6(-1) + 1,7(-1) = 40,2$$

$$\hat{y}_2 = 35,7 - 2,6(+1) - 3,6(-1) + 1,7(+1) = 38,4$$

$$\hat{y}_3 = 35,7 - 2,6(-1) - 3,6(+1) + 1,7(+1) = 36,4$$

$$\hat{y}_4 = 35,7 - 2,6(+1) - 3,6(+1) + 1,7(-1) = 27,8$$

Оценка дисперсии адекватности [26]

$$S_{aq}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{\underbrace{4-3}_{f_{aq}=1}} [(40,16 - 40,155)^2 + (38,33 -$$

$$38,335)^2 + (36,41 - 36,415)^2 + (27,8 - 27,795)^2,$$

$$\begin{aligned}
 S_{\hat{a}q}^2 &= \frac{1}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{\underbrace{4-3}_{f_{aq}=1}} [(0,04)^2 + (0,07)^2 + (0,01)^2 + (0,02)^2] = \\
 &= \frac{1}{\underbrace{4-3}_{f_{aq}=1}} [(0,32)^2 + (0,17)^2 + (0,18)^2 + (0,32)^2] = 0,0066
 \end{aligned}$$

Расчетное значение критерия Фишера для проверки адекватности модели

$$F_p = \frac{\max(S_{\hat{a}q}^2, S_y^2)}{\min(S_{\hat{a}q}^2, S_y^2)} = \frac{0,107875}{0,0066} = 16,34$$

С числителем данного выражения связано 8 степеней свободы ($f_y = 8$ [это f_1]), а со знаменателем – 1 степень свободы [26]

$$f_{aq} = N - l = 4 - 3 = 1 \text{ (это } f_2\text{)}.$$

Табличное значение критерия Фишера при $f_1=8$ и $f_2=1$ $F_{табл} \approx 235$.

Поскольку $F \leq F_{табл}$, модель регрессии считается адекватной. Для получения модели в натуральном виде подставим в нормированное уравнение преобразованные значения коэффициентов. При этом модель примет натуральный вид (57) [26]

$$y = b_0 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (57)$$

$$\text{где } b_0 = \tilde{b}_0 - \sum_{j=1}^K \frac{\tilde{b}_j x_{j0}}{\Delta x_j};$$

x_{j0} – исходные уровни факторов;

Δx_j – интервал варьирования факторов;

k – число факторов.

$$\hat{y} = 35,7 - 2,6\tilde{x}_1 - 3,6\tilde{x}_2 + 1,7\tilde{x}_3$$

$$b_0 = \tilde{b}_0 - \left(\frac{\tilde{b}_1 x_{10}}{\Delta x_1} - \frac{\tilde{b}_2 x_{20}}{\Delta x_2} \right) = 35,7 - \frac{-2,6 \cdot 550}{50} - \frac{-3,6 \cdot 1170}{100} - \frac{1,7 \cdot 56}{4} = 82,52;$$

$$b_j = \frac{\tilde{b}_j}{\Delta x_j};$$

$$b_1 = \frac{-2,6}{50} = -0,052;$$

$$b_2 = \frac{-3,6}{100} = -0,036;$$

$$b_3 = \frac{1,7}{4} = 0,425.$$

Таким образом, окончательно получена модель в натуральном виде, все члены которой значимы, а сама модель адекватна описываемому процессу (58) [26]

$$MMP = 82,5 - 0,05B - 0,04D + 0,43G. \quad (58)$$

Созданная трехмерная модель (рисунок 37) позволяет предварительно оценить среднее максимальное давление, создаваемое груженым полуприцепом на слабое основание при использовании ряда типоразмеров шин.

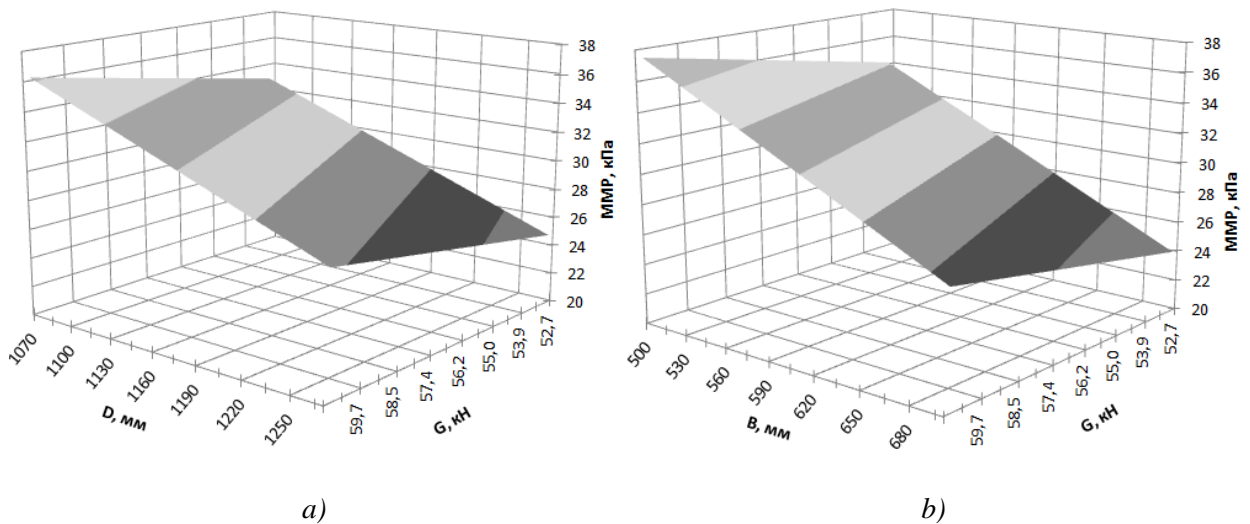


Рисунок 37 – Трехмерные графики функции MMP для тракторного полуприцепа со сдвоенными колесами на флотационных шинах: *a)* в зависимости от наружного диаметра; *b)* в зависимости от ширины шины

Широкая флотационная шина создает увеличенную площадь контакта и меньшее проникновение в грунт, что увеличивает проходимость ГТА. Полуприцепы оборудуются шинами одного типоразмера, а на наиболее нагруженных осях устанавливают сдвоенные колеса. Метод сдваивания колес на осях также улучшают проходимость ГТА по слабому грунту. Увеличение диаметра шины, способствует снижению тягового усилия на перекатывание полуприцепа.

Для каждого из типоразмеров радиальных флотационных шин приведенных в таблице 9 были определены ММР, VCI_1 и VCI_{50} и получены графики зависимости ММР от основных параметров шин (рисунок 38).

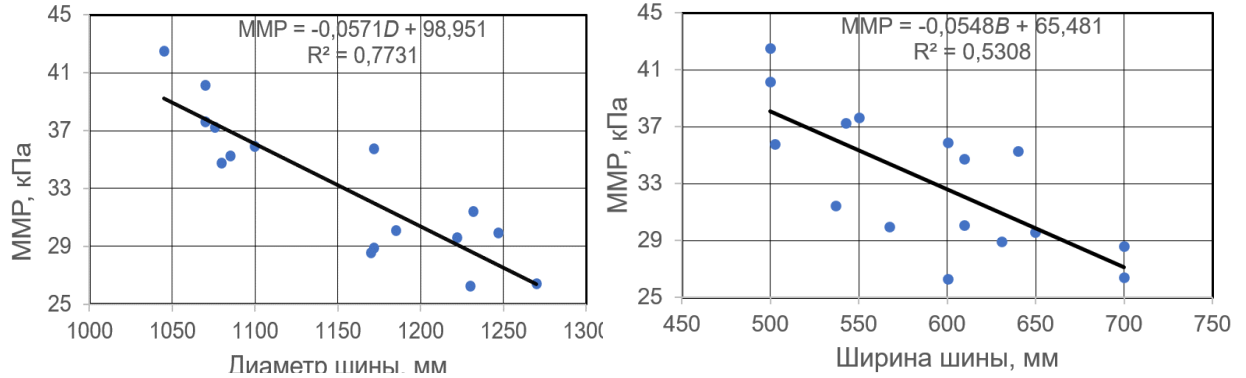


Рисунок 38 – Значения ММР для тракторного полуприцепа со сдвоенными колесами на флотационных шинах: а) в зависимости от наружного диаметра; б) в зависимости от ширины шины

На рисунке 39 показана связь между ММР и значениями VCI_{50} для торфяных грунтов.

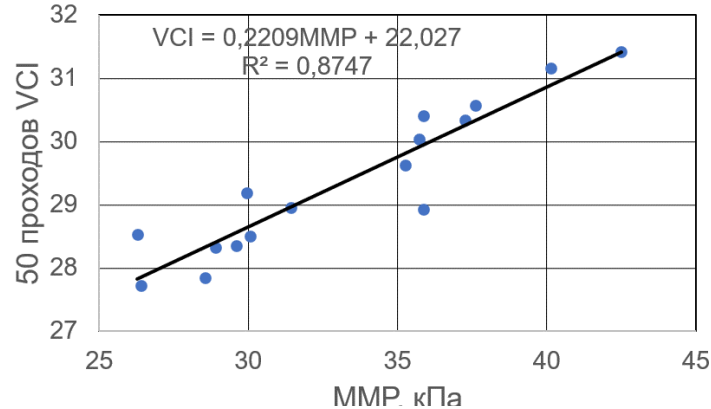


Рисунок 39 – Связь индекса конусности транспортного средства и среднего значения максимального давления на каждом колесе VCI_{50}

Для оценки многократной проходимости ГТА необходимо рассматривать параметр VCI_{50} . Для торфяного тракторного полуприцепа получено эмпирическое выражение (59), связывающее индекс конусности транспортного средства и значение среднего максимального давления на каждом колесе полуприцепа

$$VCI_{50} = 22 + 0,22MMP \quad (59)$$

Исходя из проведенного анализа предельных значений прочности торфяных грунтов, можно наглядно изобразить диапазон возможности многократного проезда ГТА по торфяным залежам с разной степенью осушенности. На рисунке 40 приведена классификация условий проходимости полуприцепа ГТА по торфяному основанию с диапазоном оценки вероятности движения [125, 148].

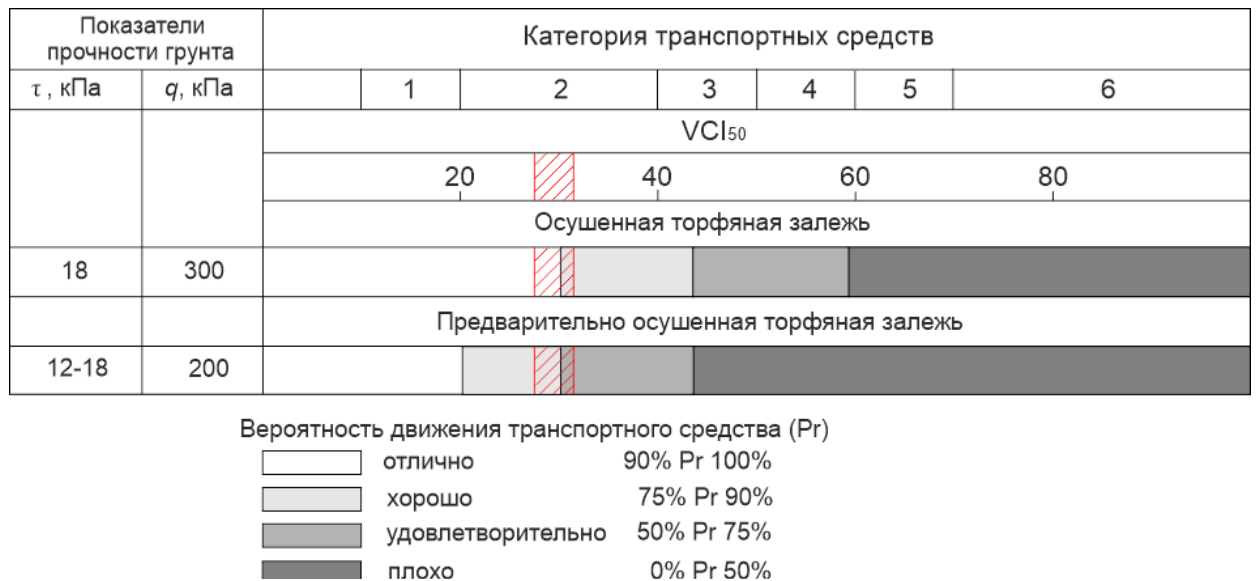


Рисунок 40 – Классификация условий проходимости транспортных средств по торфяному основанию

Заштрихованная зона на рисунке 40 показывает вероятность многократной проходимости исследуемого полуприцепа в диапазоне 75-90 % по предварительно осушенной торфяной залежи.

С учетом уточненного диапазона высокой вероятности многократной проходимости полуприцепа по торфяным месторождениям сравнительная оценка типоразмера шин тракторного полуприцепа с применением метода «матрица принятия решений» (матрица Pugh) [129] позволила систематизировать ряд факторов, влияющие на выбор (размеры, масса и стоимость шин) и оценить весомость каждого из них. В итоге для рациональной комплектации полуприцепа шинами определена радиальная флотационная шина типоразмера 600/50R22.5 при значении величин $MMP=28,89$ кПа и $VCI_{50}=28,32$ psi.

Для выбора рационального комплекта шин полуприцепа ГТА проведен сравнительный анализ данных по методу Pugh (таблица 16).

Таблица 16 – Сравнительный анализ данных по методу Pugh

	Параметры шины										Рейт инг влия ния	Среднее макси- мальное давление ММР, кПа
	Ширина, мм		Диаметр, мм		Масса, кг		Высота профиля, мм		Стоимость, тыс. руб.			
Весово й коэфф ициент	4		5		3		1		2			
Типор азмер	Матрица влияния											
500/45 R22.5	500	12	1045	15	60,8	15	225	3	41,0	10	55	46,16
500/50 R22.5	500	12	1070	15	62	15	250	3	38,91	10	55	43,34
500/60 R22.5	503	12	1172	15	80	12	300	5	44,92	10	52	38,50
550/45 R22.5	550	12	1070	15	72	15	248	3	41,00	10	55	40,14
550/60 R22.5	537	12	1232	20	87	9	330	5	48,16	10	56	33,86
560/45 R22.5	543	12	1076	15	97	6	252	3	59,75	8	44	41,55
560/60 R22.5	567	12	1247	20	95	6	336	5	46,94	10	53	31,92
600/50 R22.5	631	20	1172	20	95	6	300	5	58,60	8	59	31,18
600/55 R22.5	600	16	1230	20	99	6	330	5	88,05	4	51	31,31
700/40 R22.5	700	20	1170	20	110	3	280	4	69,69	8	55	30,64
650/50 R22.5	650	20	1222	20	126	3	325	5	87,45	4	52	30,22
710/45 R22.5	700	20	1270	20	133	3	320	5	92,01	4	52	28,28
650/40 R22.5	640	20	1085	15	148	3	256	4	88,34	4	46	37,71
620/50 R22.5	610	16	1185	20	92	6	310	5	83,02	4	51	32,06
620/40 R22.5	610	16	1080	15	82	12	248	3	78,51	6	49	37,06
600/40 R22.5	600	16	1100	20	94	6	240	3	58,09	8	53	40,45

Суммирование всех оценок позволяет отобрать рациональный вариант решения [129]. В результате определяется рациональный выбор шин для колес тракторного полуприцепа в составе ГТА с лучшими технико-экономическими показателями, что позволяет избежать необоснованных экономических затрат. Кроме того, шины являются дорогостоящей продукцией. Стоимость комплекта шин для грузового автомобиля составляет около 25 % от его первоначальной стоимости [89].

4.3 Результаты штамповых испытаний в лабораторных условиях

Опорные свойства полуприцепа зависят как от свойств грунта, так и от веса полуприцепа и размерно-массовых характеристик шин, которые определяют площадь пятна контакта и величину давления на грунт.

Процесс взаимодействия пневматического колеса со слабым грунтовым основанием в первую очередь связан со взаимной деформацией колеса и основания. Этим определяется форма и размеры пятна контакта, от которых зависит сопротивление качению и проходимость транспортного средства. [36].

При контакте шины с твердой площадью пятна контакта зависит от величины нормальной нагрузки на колесо G_k и радиальной жесткости шины $c_{ш}$, определяемой давлением воздуха в ней. На рисунке 41 показано соотношение размеров пятна контакта шины с изменением этих показателей. Пятно контакта шины с опорным основанием представляет собой эллипс.



Рисунок 41 – Относительное изменение площади пятна контакта шины с изменением нагрузки от 0,2 до 0,6 кН и давления накачивания от 0,1 до 0,2

Трехкратное соотношение площадей пятен контакта показывает диапазон регулирования сочетанием нагрузки и давления в шине приняв деформацию шины (60)

$$\delta = \lambda D_K, \quad (60)$$

где λ – коэффициент сочетания нагрузки и давления в шине $[\lambda]=0,025$ [43].

На рисунке 42 показана зависимость давления в контакте от давления в модельных шинах при разных нагрузках

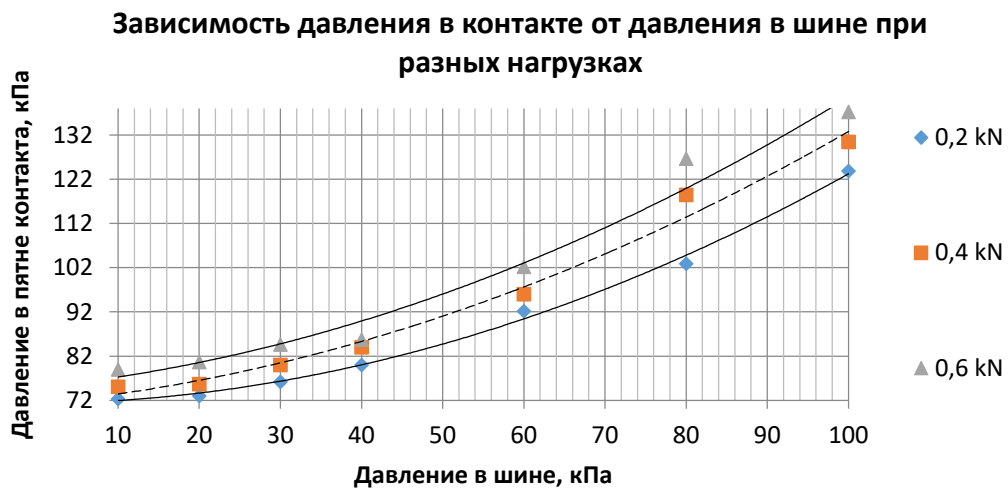


Рисунок 42 – Зависимость давления в контакте от давления в модельных шинах при разных нагрузках

Результаты измерений осадки и параметров пятна контакта приведены в таблицах 17 и 18.

Таблица 17 – Результаты измерения осадки монолита верхнего слоя торфяной залежи влажностью $w=89\%$ и параметров пятна контакта

№ опыта	Осадка колес, мм			Пятно контакта шин			
	h_{\max}	$h_{\text{кон}} (30 \text{ с})$	$h_{\text{кон}} (3 \text{ мин.})$	$a_{\text{п}}, \text{ мм}$	$b_{\text{п}}, \text{ мм}$	$a_{\text{л}}, \text{ мм}$	$b_{\text{л}}, \text{ мм}$
1	21,0	25,7	26,6	21,0	8,0	21,0	8,0
2	20,5	25,4	25,9	22,5	10,0	23,0	9,0
3	20,3	25,4	25,9	22,5	11,0	23,0	10,5
4	20,1	24,4	25,5	24,0	11,5	24,0	10,5
5	19,8	23,8	25,5	24,0	12,0	25,0	11,0
6	19,5	23,3	25,3	26,0	12,0	26,0	11,0
7	18,9	23,4	25,1	26,5	12,0	26,0	11,0

Таблица 18 – Результаты измерения осадки монолита верхнего слоя торфяной залежи влажностью $w=84\%$ и параметров пятна контакта

№ опыта	Осадка колес, мм			Пятно контакта шин			
	h_{\max}	$h_{\text{кон}} (30 \text{ с})$	$h_{\text{кон}} (3 \text{ мин.})$	$a_{\text{п}}$	$b_{\text{п}}$	$a_{\text{л}}$	$b_{\text{л}}$
1	20,0	25,7	26,5	23,0	10,0	23,0	10,0
2	19,9	25,4	26,3	24,5	11,0	24,5	11,0
3	19,9	25,4	26,3	24,5	11,0	24,5	11,0
4	19,5	24,4	26,2	25,5	11,2	25,0	11,2
5	19,2	23,8	26,1	25,5	11,5	25,5	11,5
6	19,3	23,3	26,0	26,5	12,0	26,0	12,0
7	19,3	23,4	25,9	26,5	12,0	26,	12,0

В связных грунтах глубина колеи увеличивается в зависимости от количества двойных проходов колес, как видно из рисунков 41-44. Колесо погружается до тех пор, пока не наступит равновесие между силами, определяющими прочность основания, и вертикальной нагрузкой.

В этом случае модель материала отражает деформационную анизотропию в условиях линейного растяжения-сжатия (эффект Баушингера). Другими важными свойствами материала, отражающими его сопротивление малоцикловой нагрузке, являются циклическая нестабильность (изменение ширины петли пластического гистерезиса в процессе нагружения) и одностороннее накопление во времени пластических деформаций. Такой постепенный спад во времени напряжений (релаксация) характерен для этой грунтовой системы; при этом происходит диссипация энергии на вязком элементе, запасенной на упругом элементе, что делает поведение системы в таком режиме механически необратимым.

Для испытательного стенда с моделью колес многопроходность – это осадка или глубина колеи, наблюдаемая после определенного числа проходов одного колеса по одному и тому же испытательному треку.

Исследования влияния частоты транспортных проходов на уплотнение слабого грунта [80] показывают, что основная часть уплотнения грунта происходит во время первых нескольких проходов транспортного средства

(рисунок 41). Последующие проходы дают меньший эффект [104], но могут увеличить плотность и уменьшить некапиллярную пористость грунта [97].

При приложении давления общая осадка грунта может быть разделена на восстанавливающуюся (упругую) h_e и остаточную (пластическую) h_p . При этом, как правило, $h_e \gg h_p$ (рисунки 43-46). В опытах при $w=89\%$ h_e в 4 раза больше, чем h_p , а при $w=84\%$ h_e в 8 раз больше, чем h_p .

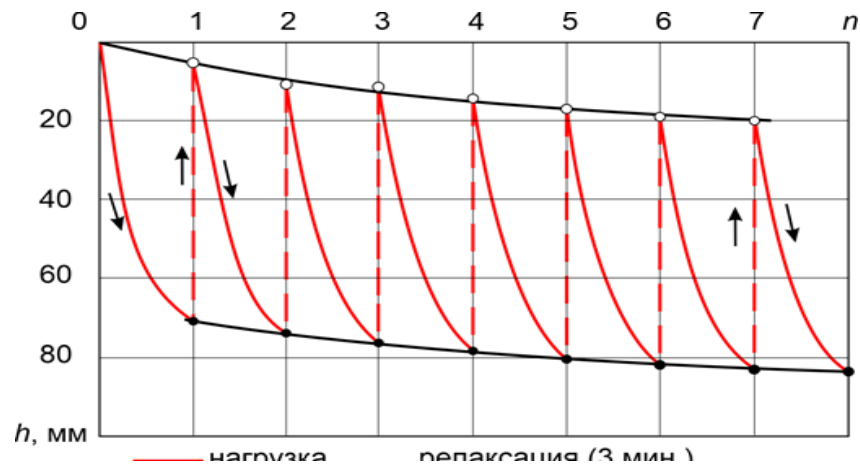


Рисунок 43 – Характер нагружения грунта с изменением глубины осадки от количества двойных проходов n сдвоенных колес по неосушенной торфяной залежи ($w=89\%$)

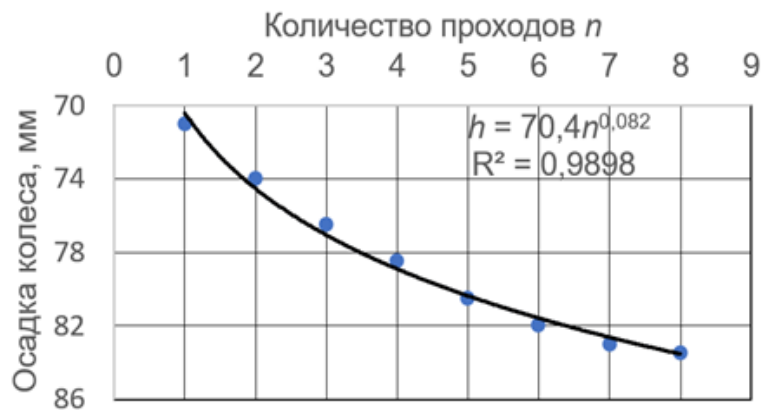


Рисунок 44 – Изменение глубины осадки от количества двойных проходов сдвоенных колес по неосушенной торфяной залежи ($w=89\%$)

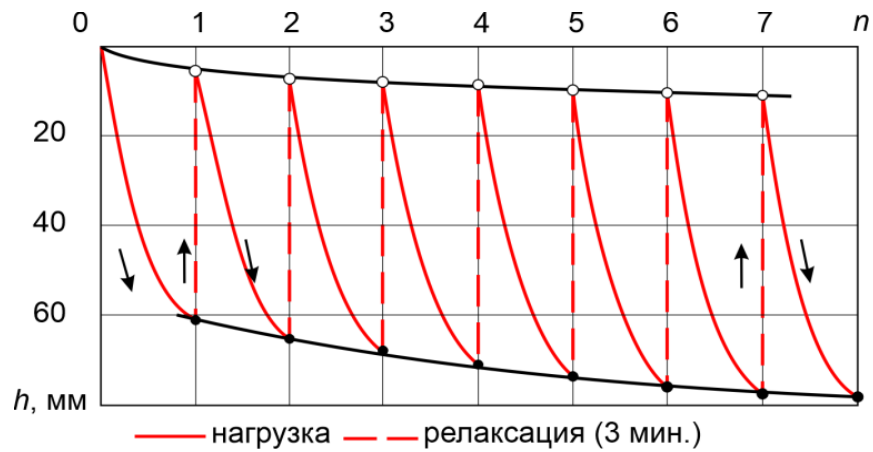


Рисунок 45 – Характер нагружения грунта с изменением глубины осадки от количества двойных проходов n сдвоенных колес по осушенной торфяной залежи ($w=84\%$)

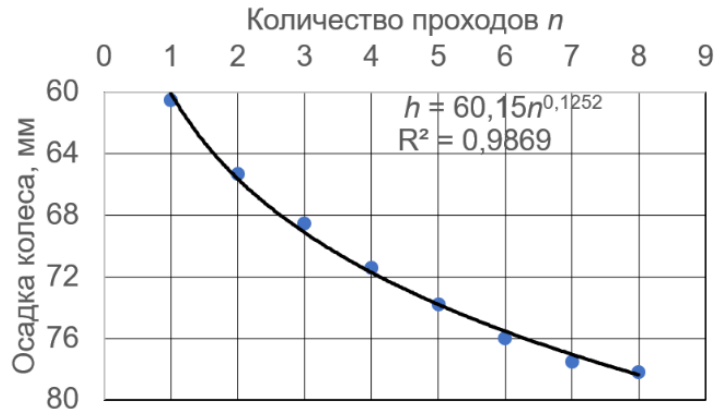


Рисунок 46 – Изменение глубины осадки от количества двойных проходов сдвоенных колес по неосушенной торфяной залежи ($w=89\%$)

На рисунке 46 изменение глубины осадки в зависимости от количества двойных проходов сдвоенных колес по торфяной залежи достаточно точно аппроксимируется показательной функцией.

На рисунке 47 показан процесс формирования следа на поверхности после нагружения монолита торфяной залежи сдвоенными колесами.

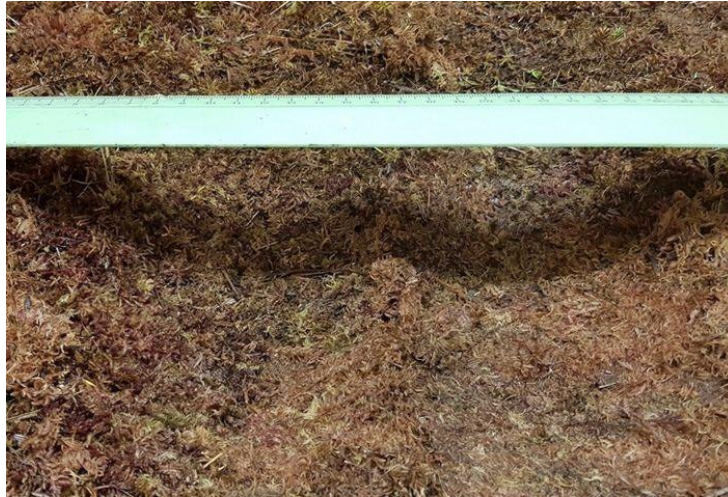


Рисунок 47 – Формирование следа на поверхности после нагружения монолита торфяной залежи сдвоенными колесами (тенью от измерительной линейки показана форма осадки)

В значительной степени проходимость транспортных средств по поверхности торфяной залежи зависит от структуры торфяной залежи – волокнистой и губчатой, свойственной всем сфагновым торфам малой степени разложения, слагающим верхние слои залежей. Структура торфа и его текстурные особенности определяют прочность верхнего торфогенного слоя, образованного волокнами переплетения (срастания) растений-торфообразователей и их корнями и корневищами, который является несущим и наиболее прочным слоем залежи [29, 85]. Подвижность транспортного средства зависит от его способности эффективно использовать прочность этого растительного мата без разрывов [139].

Соответственно, требования по ограничению массы ГТА и снижению сил сопротивления при передвижении обуславливают максимально допустимую глубину колеи h_k после первого прохода в пределах $h_k=0,1$ м с учетом упругого восстановления слоя залежи. Таким образом, после 7-го нагружения глубина колеи h_k стабилизируется, и не превышает значения предела глубины колеи, что предотвращает бульдозерный эффект колес [73]. На неосушенном монолите торфяной залежи величина осадки модельного колеса увеличивается в 1,1 раза, по сравнению с осушенным.

Деформацию грунта, накопленную при повторных нагружениях, можно найти по эмпирическому выражению (61) [41]

$$h_n = h_1(1 + \beta \lg n), \quad (61)$$

где h_1 и h_n – остаточная деформация грунта соответственно при 1-м и n -м нагружениях;

β – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

По экспериментальным данным НАТИ при одинаковой повторной нагрузке на штамп коэффициент β имеет для основных типов грунтов следующую величину: [41]

- песчаные почвы $\beta = 0,3...0,5$;
- болото с дерновым покровом $\beta = 0,5...0,6$;
- суглинок $\beta = 1,2...1,5$;
- торфяник (меньшие значения при большей влажности) $\beta = 0,9...2,1$.

Увеличение несущей способности слабого грунта при быстром протекании процесса нагрузка–осадка учитывают с помощью коэффициента динамичности нагрузки (62)

$$k_d = t/(t + t_p), \quad (62)$$

где t – время воздействия колес на грунт;

t_p – время релаксации напряжений в грунте.

По Агейкину Я.С. (63) [2]

$$t_p = k_p/\varphi_0, \quad (63)$$

где k_p – коэффициент релаксации, $k_p = 0,5^\circ \cdot c$;

φ_0 – угол внутреннего трения грунта, град.

Динамическое давление p_d в этих условиях связано со статическим p (64)

$$p_d = k_d p. \quad (64)$$

На самом деле при проезде колеса увеличивается модуль деформации грунта E , а не снижается давление p на грунт.

На рисунке 48 показано изменение площади контакта сдвоенных колес и удельного сопротивления грунта на поверхности следа колес. Удельное сопротивление уплотняемого грунта по следу колес определялось при помощи микропенетromетра МВ-2 [13, 94].

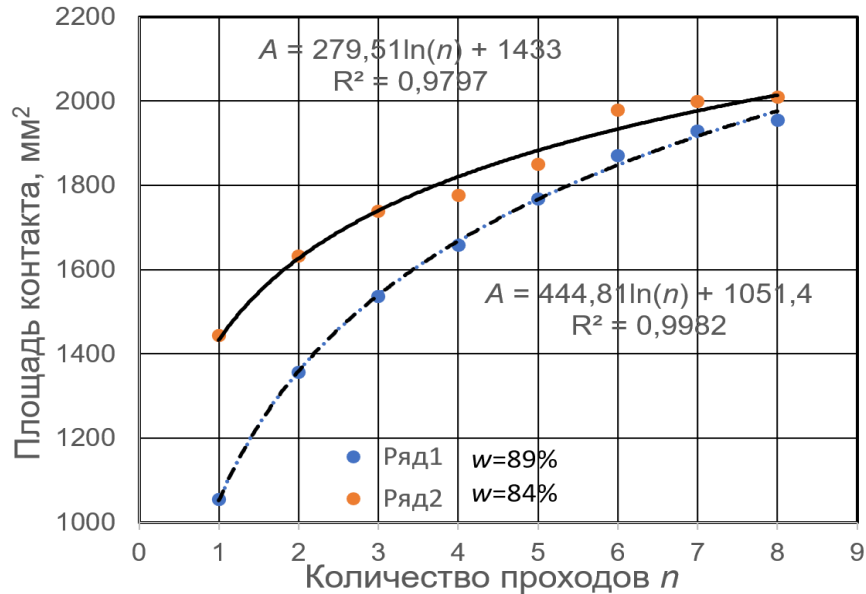


Рисунок 48 – Изменение площади контакта сдвоенных колес в зависимости от количества двойных проходов по ненарушенной торфяной залежи: 1 – влажность залежи $w=89\%$; 2 – влажность залежи $w=84\%$

При определении сопротивления пенетрации на поверхности следа колес отсчитывали глубину погружения конуса микропенетromетра с точностью до 0,5 мм, повторность измерений 10-кратная при $h < 12$ мм.

Результаты исследования представлены на рисунке 49.

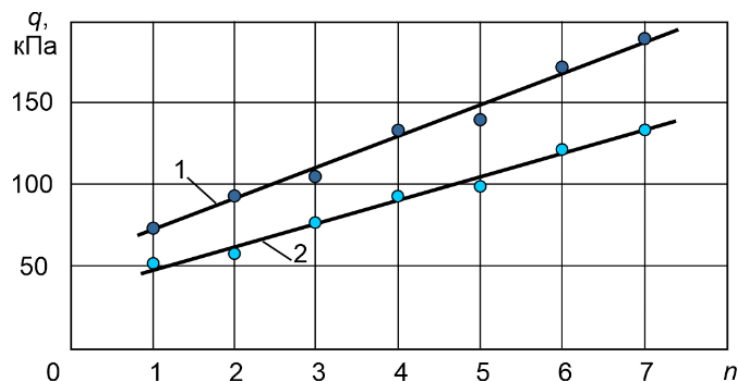


Рисунок 49 – Изменение удельного сопротивления грунта на поверхности следа колес в зависимости от количества двойных проходов n по ненарушенной торфяной залежи: 1 – влажность залежи $w=89\%$; 2 – влажность залежи $w=84\%$

Для многократного проезда транспортного оборудования по слабым грунтам воспрещен бульдозерный эффект. При данном условии осадка колес в грунт не должна превышать 0,1 м [73].

Уплотнение грунта по следу колеи при многократном нагружении монолита сдвоенными колесами достигает 200 кПа для залежи влажностью 89 % и 140 кПа для залежи влажностью 84 %. При достижении уже 7 нагружений на поверхность торфяного монолита влажностью 84 и 89 % установлено, что величина осадки стабилизируется, а площадь пятна контакта с залежью и удельное сопротивление грунта на поверхности следа колес увеличиваются, что определяет возможность осуществления многократной проходимости ГТА при использовании двухосного полуприцепа со сдвоенными радиальными флотационными шинами типоразмера 600/50R22.5 при значениях величин $MMP=28,89$ кПа и $VCI_{50}=28,32$ psi.

Проведенные исследования показали, что моделирование контакта пневматического колеса с деформируемым основанием отражает реальную картину взаимодействия.

4.4 Результаты определения адгезионных свойств и угла соскальзывания торфяного сырья при разгрузке

Прилипание обнаруживается у торфяного сырья, имеющего пластичный тип консистенции (при влажности 75-90 %) [7].

При загрузке кузова экскавированным торфяным сырьем возникает адгезионное взаимодействие в контакте с поверхностью кузова. Влажные композитные материалы, имеет более высокое трение, чем сухие материалы. Этот феномен является результатом «прихватывания» или «эффекта рывка» на влажных поверхностях, который возникает вследствие капиллярной природы торфяных материалов.

Происходит растекание жидкого связующего по поверхности кузова и его смачивание, что является обязательным условием формирования

эффективной клеевой пленки на поверхности. При разгрузке кузова преодолевается сопротивление разъединения материала и поверхности.

Адгезия при этом обусловлена действием в зоне контакта межмолекулярных Ван-дер-Ваальсовых сил различной природы, а также ионно-электростатических взаимодействий, водородных и химических связей. Работа на преодоление адгезии (65)

$$A_a = A_a^d + A_a^h + A_a^{ch}, \quad (65)$$

где индексы соответственно d – дисперсионное взаимодействие;

h – водородная связь;

ch – химическая связь.

Ван-дер-Ваальсовые дисперсионные взаимодействия приводят к физической адсорбции при закреплении связующего на поверхности при определенной роли гуминового комплекса и битумов, специфическим водородным и химическим связям [38].

Адгезия торфяного сырья зависит от влаги. Это влияние в зоне контакта с поверхностью кузова проявляется в виде капиллярной силы и расклинивающего давления тонкого слоя жидкости.

Адгезия упруговязкопластического торфяного сырья определяется экспериментально путем отрыва от поверхности под действием внешней силы на единицу площади контакта сырья с поверхностью [59].

В таблице 19 приведены значения силы отрыва в зависимости от влажности торфяных образцов.

Таблица 19 – Значения силы отрыва в зависимости от влажности торфяных образцов.

№ опыта	Влажность торфяного образца, %				
	80,00	83,80	86,12	87,00	89,00
	Сила отрыва стальной пластины, Н				
1	1,91	2,01	3,02	4,71	4,71
2	1,81	2,80	2,84	5,79	4,41
3	1,81	2,40	3,04	5,10	3,92
	Сила адгезионного прилипания, Н				
	0,38	0,93	1,49	3,73	2,88
	Напряжение адгезионного прилипания, Па				
	515,14	1276,64	2047,11	5106,58	3941,92

На рисунке 50 показаны результаты опытов на ангезиометре постепенного нормального отрыва при разной влажности торфяного сырья.

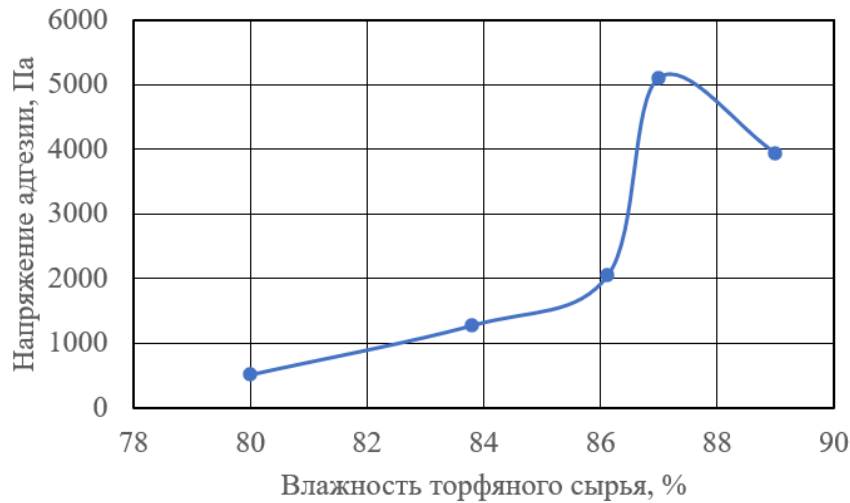


Рисунок 50 – Напряжение адгезии торфяного сырья к материалу поверхности кузова (сталь Ст3) с изменением влажности

При анализе влияния влажности торфяного сырья верхового типа на силу адгезии установлено, что величина напряжения адгезии имеет максимум (рисунок 50), что согласуется с данными проф. Самсонова Л.Н. [74].

Закон прочности Кулона-Мора для площадки сдвига торфяного сырья также может быть применен для механики разгрузки кузова полуприцепа.

Твердая поверхность кузова действует на давящее на нее экскавированное торфяное сырье силой нормальной реакции основания N , при этом сила трения $F_{тр}$ препятствует перемещению массы по днищу кузова при разгрузке в тангенциальном направлении. При выполнении транспортной операции присутствует сила трения покоя $F_{п}$. Эта сила имеет предельное значение, величина которого связана с силой нормальной реакции опоры соотношением (66)

$$F_{п} = \mu N, \quad (66)$$

где μ – коэффициент трения покоя.

В эксперименте (рисунок 51) исследуется простейший случай: кроме реакции днища кузова на торфяное сырье действует сила тяжести $G_{тс}=m_{тс}g$.

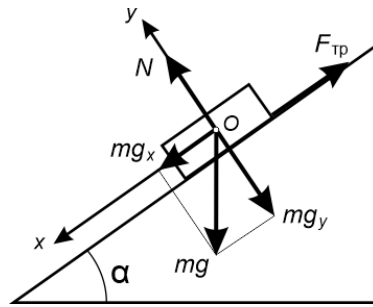


Рисунок 51 – Схема к анализу соскальзывания массы сырья с наклонной плоскости

В транспортном положении материал находится в состоянии покоя (67)

$$m_{\text{ТС}}g + N + F_{\text{тр}} = 0. \quad (67)$$

В проекции сил на оси x и y уравнение принимает вид (68)

$$\begin{cases} m_{\text{ТС}}g \sin \alpha - F_{\text{тр}} = 0; \\ N - m_{\text{ТС}}g \cos \alpha = 0. \end{cases} \quad (68)$$

Сила трения покоя отсюда (69)

$$F_{\text{тр}} = m_{\text{ТС}}g \sin \alpha. \quad (69)$$

При подъеме кузова полуприцепа для разгрузки сила трения покоя принимает значение, равное силе трения скольжения (70)

$$F_{\text{ск}} = \mu m_{\text{ТС}}g \cos \alpha. \quad (70)$$

В итоге, получаем выражение (71)

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha, \quad (71)$$

где μ – коэффициент трения, определяющий предельный угол равновесия тела на наклонной плоскости кузова полуприцепа (угол соскальзывания).

На рисунке 52 показаны условия проведения опытов с наклонной плоскостью.

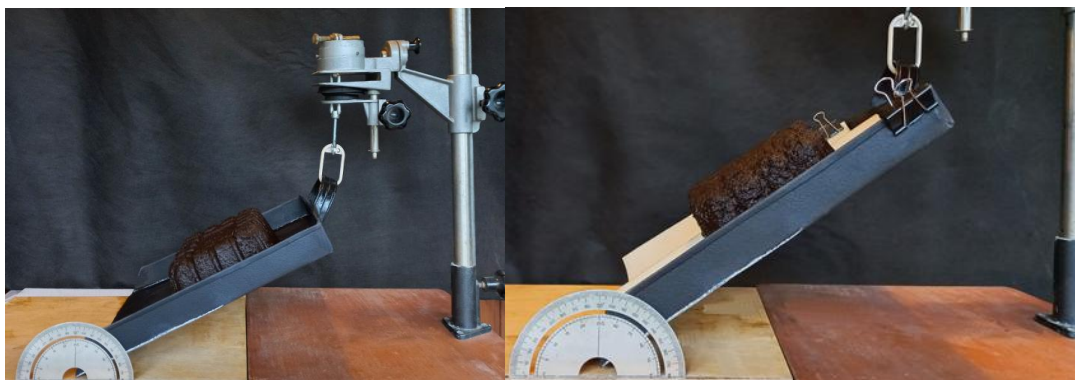


Рисунок 52 – Определение угла соскальзывания бруска торфяного сырья на моделях поверхности кузова

На рисунке 53 показано расположение бруска торфяного сырья на модели поверхности с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe).

Следует отметить локальное выпрессовывание влаги в месте контакта торфяного сырья с материалом кузова с наибольшим гидростатическим давлением, что приводит к образованию сплошной жидкостной пленки на поверхности контакта, что вызывает уменьшение адгезионных сил, так как происходит когезионный разрыв жидкостной пленки [37].



Рисунок 53 – Определение угла соскальзывания торфяного бруска на модели поверхности с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe)

При загрузке материала отмечается перераспределение массы на 2 половины.

В таблице 20 приведены результаты эксперимента по определению угла соскальзывания массы торфяного сырья в зависимости от формы кузова и материала основания.

Таблица 20 – Результаты измерения угла соскальзывания формованного торфяного сырья естественной влажности 87 % по типовым материалам модели поверхности кузова

Профиль поверхности	Материал поверхности	Угол соскальзывания α , °	
		α	$\text{tg}\alpha$
Плоская	Стекло	86	14,3
	Полипропилен РР-Н	52	1,28
	Органическое стекло	49	1,15
	Оцинкованная сталь	51	1,23
С полуэллиптическим поперечным сечением (half-pipe)	Оцинкованная сталь с перфорацией в виде просечки	48	1,11
	Полиуретан	49	1,15
С двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe)	<i>Полиуретан</i>	46	1,04

Результаты эксперимента по определению угла соскальзывания торфяного сырья с поверхности дна кузова полуприцепа при его разгрузке показали, что на значение угла соскальзывания материала оказывает влияние адгезия материала и форма сечения кузова. Так, наименьший коэффициент трения оказался у модели кузова с полиуретановым двойным полуэллиптическим поперечным сечением, что меньше, чем у гладкой стеклянной поверхности в 13,75 раза.

4.5 Обоснование формы кузова полуприцепа

Кузовы самосвальных транспортных средств – прицепов и полуприцепов тракторного транспорта подвержены налипанию влажных грузов к днищу кузова, особенно в стыках между боковыми бортами и днищем кузова [12, 93].

На форму кузова и размеры самосвального полуприцепа влияют транспортные свойства навалочного материала: плотность, влажность, липкость, структура и пр.

Кузова самосвалов имеют разные формы:

- прямоугольная с низко расположенным центром тяжести и самым большим полезным объемом. Эта форма удобная в эксплуатации и устойчивая, но углы плохо очищаются при разгрузке после транспортирования влажных и липких грузов;
- полуэллипс (half-pipe). Такие кузова удобны с точки зрения очистки углов. Недостатки – высокий центр тяжести и относительно небольшой полезный объем;
- корытообразная. Удобная форма без четких углов, обеспечивающая рациональное использование внутреннего объема.

Для понижения центра тяжести навалочного груза и рассредоточения нагрузки по ширине кузова предложена форма без углов, обеспечивающая рациональное использование внутреннего пространства кузова.

Техническая сущность предлагаемого решения заключается в том, что поворотный самосвальный кузов грузового полуприцепа состоит из днища выполненного из двух полутрубных корыт постоянного сечения, приваренных спереди к передней плоской стенке расположенной под наклоном к оси кузова, и сваренных с одной стороны вдоль между собой и с нижним несущим листом основания кузова, а с другой стороны с пластинами вертикальных бортов кузова, образуя при этом жесткую пространственную конструкцию. Специальная конструкция позволяет изготовить днище кузова из двух цельных листов металла, с полый трубой жесткости треугольного сечения на днище, что значительно влияет на прочность кузова.

Каждое из двух полутрубных корыт выполнено из стального листа, изогнутого по брахистохроне, известной в математике, как кривая наименьшего спуска, для наилучшей самоочистки при разгрузке кузова [60].

Такая двуховальная форма конструкция кузова и наклонный передний борт обеспечивает более быструю разгрузку и предотвращает налипание влажной горной породы.

В нижней части передней наклонной стенки кузова и на его днище выполнены отверстия для стока излишков воды, образующихся при транспортировании влажного торфяного сырья [60].

При перевозке влажной горной породы кузов имеет относительно небольшой полезный объем, ограниченный пределом проходимости ГТА по слабым грунтам.

Использование: для перевозки тракторным транспортом влажной горной массы, которая навалом загружается экскаватором непосредственно в кузов грузового прицепа, а выгружается методом опрокидывания кузова назад.

При загрузке кузова одноковшовым экскаватором, первый ковш с влажной горной породой разгружается в переднюю часть кузова на разделительную грань между полутрубными днища кузова, которая является одновременно ребром жесткости кузова. Вода, которая находилась в ковше

экскаватора попадает на дно кузова и стекает, через отверстия в передней стенке 5 и днище 6. Экскавированное торфяное сырье распределяется в кузове равномерно между боковыми бортами кузова. При подъеме кузова для разгрузки назад порода, разделенная ребром жесткости, соскальзывает с наименьшим сопротивлением по днищу кузова. Кузов устанавливают на шасси полуприцепа, снабженного подъемным гидроцилиндром с выдвижным штоком [60].

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет повысить скорость разгрузки кузовов ГТА при транспортировке влажной горной массы и, как следствие, уменьшить эксплуатационные затраты.

На рисунке 54 показана тектоника кузова самосвального транспортного средства в аксонометрии.

Под тектоникой кузова понимается зримое выражение в форме конструктивной основы, несущей способности, жесткости кузова и его отдельных частей, что позволяет судить о характере взаимодействия конструкции кузова и перевозимой горной массы [60].

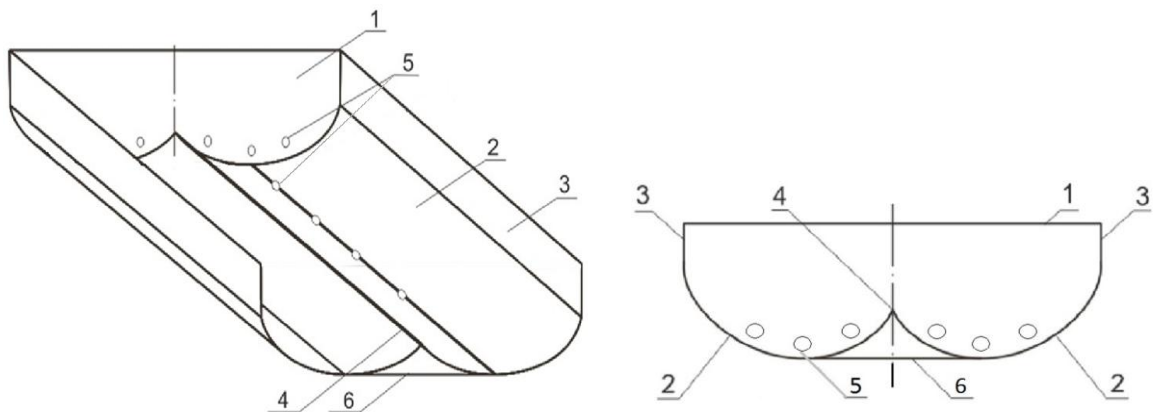


Рисунок 54 – Техническое решение формы кузова полуприцепа с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe): 1 – передняя стенка кузова; 2 – днище кузова; 3 – борта; 4 – ребро жесткости; 5 – перфорация в передней стенке и в днище кузова; 6 – основание кузова

На рисунке 52 показана объемно-пространственная структура кузова самосвального транспортного средства с учетом двух основных компонентов: объема и пространства. Важнейшей из закономерностей

организованной объемно-пространственной структуры является органичность связей между отдельными элементами или частями структуры.

Важным условием целостности объемно-пространственной структуры кузова самосвального транспортного средства является ее общая упорядоченность, что делает структуру кузова гармоничной, т.е. работоспособной.

Кузов самосвального транспортного средства (рисунок 52) содержит передний 1 и боковые борта 3 и днище 2. Днище образовано из двух полуовальных корыт 2, сваренных вдоль между собой, и приваренных к передней плоской стенке 1 и нижнему несущему листу основания 6, который образует жесткий канал треугольного сечения между днищем (2) и листом [60].

Форма брахистохроны в сечении кузова является кривой наискорейшего спуска и при образовании композиции днища кузова использована для сокращения времени при разгрузке торфяного сырья.

Для достижения композиционной целостности объемной формы кузова основные формообразующие элементы симметрично соподчинены с целью наиболее активной закономерности композиции – соответствия композиционной основы функционально-конструктивной характеристике самосвального полуприцепа. Форма кузова представляет собой структуру взаимосвязанных в пространстве элементов. Равенство двух частей основания кузова характеризует относительную статичность его формы на основе модульных пропорций относительно продольной линии кузова.

При наложении проекций поперечных сечений вариантов кузова (рисунок 55) следует, что при одинаковых геометрических размерах кузов с прямоугольным поперечным сечением имеет наибольший объем, и центр тяжести прямоугольного кузова расположен ниже по сравнению с остальными вариантами [60].

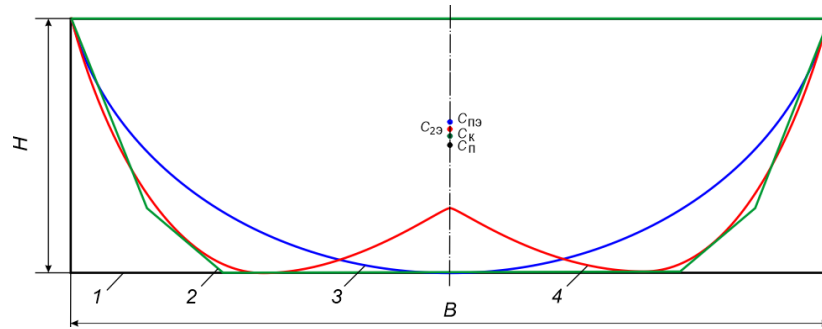


Рисунок 55 – Наложение проекций поперечных сечений вариантов кузова: 1 – кузов с прямоугольным поперечным сечением; 2 – кузов корытообразного сечения; 3 – кузов с полуэллиптическим поперечным сечением (half-pipe); 4 – кузов с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe)

В таблице 21 показаны относительные параметры анализируемых полуприцепов.

Таблица 21 – Относительные параметры вариантов кузова

Поперечное сечение кузова	Относительная площадь сечения кузова, м ²	Объем кузова, м ³	Коэффициент грузоемкости	Относительная высота центра тяжести, мм
Прямоугольное 	1,0	7,0	1,26	$H/2,0$
Корытообразное 	0,87	6,1	1,10	$H/1,89$
Двойное полуэллиптическое (double half-pipe) 	0,81	5,7	1,03	$H/1,76$
Полуэллиптическое (half-pipe) 	0,72	5,0	0,90	$H/1,70$

Наличие прямых углов у кузова с прямоугольным поперечным сечением плохо сказываются на его самоочищаемости. Отсутствие прямых углов у корытообразного кузова способствует улучшению самоочищения при разгрузке.

Отсутствие углов способствует лучшей самоочищаемости кузовов с полуэллиптическим поперечным сечением (half-pipe) и с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe).

В процессе транспортирования экскавированного торфяного сырья в кузове транспортного средства, очевидно, что насыпная плотность материала несколько меняется. Встряхивание транспортного средства, давление верхних слоев грунта приводят к уплотнению материала в кузове. Видимый объем насыпного материала уменьшается. Коэффициент уплотнения учитывает во сколько раз насыпной материал уплотнился (следовательно, уменьшился и его видимый объем) при перевозке.

В лабораторных условиях на моделях кузова полуприцепа проведен эксперимент по исследованию уплотнения торфяного сырья объемно-весовым методом при имитации процесса транспортирования методом встряхивания модели в течении 5 мин. В таблице 22 показано изменение насыпной плотности экскавированного торфяного сырья в кузове транспортного средства в зависимости от формы кузова и наличия перфорации для отвода воды.

Таблица 22 – Изменение насыпной плотности экскавированного торфяного сырья в кузове транспортного средства

Условия	Влажность образца, %	Объем образца средний, м ³	Масса образца средняя, кг	Насыпная плотность, кг/м ³	Коэффициент уплотнения
После загрузки кузова	91,0	0,000420	0,377	897,62	-
После перевозки в кузове прямоугольного поперечного сечения без перфорации	91,0	0,000341	0,376	1102,64	1,228
После перевозки в кузове с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe) с перфорацией	90,75	0,000367	0,366	997,27	1,11

При транспортировании экскавированного торфяного сырья в стандартном кузове происходит большее уплотнение по сравнению с кузовом по техническому решению с перфорацией. Средняя выпуклая часть кузова с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe) препятствует образованию плотного единого монолита торфяного сырья при вибрации в процессе транспортирования, а перфорация днища кузова способствует отводу излишков воды из кузова при перевозке (снижение влажности с 91,00 % до 90,75 %).

По данным таблицы 5 коэффициент снижения уплотнения торфяного сырья, зависящий от формы кузова и наличия перфорации составляет (72)

$$k_{cy} = \frac{\gamma_{н1} - \gamma_{н2}}{\gamma_{н1}} 100 \%, \quad (72)$$

$$k_{cy} = \frac{1102,64 - 997,27}{1102,64} 100\% = 9,6 \% \cong 10 \%$$

Таким образом, в эксперименте отмечено снижение уплотнения экскавированного торфяного сырья при его транспортировании в кузове с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (double half-pipe) и наличием перфорации по сравнению с кузовом прямоугольного поперечного сечения примерно на 10 %.

4.6 Выводы по главе 4

Проведен анализ прочностных характеристик слабых грунтов в условиях карьерной добычи торфяного сырья. Определены пределы прочности торфяного основания $[\tau] = 13,9$ кПа и $[q] = 146$ кПа для оценки транспортирования торфяного сырья по слабым грунтам.

В результате физического моделирования процесса многократной проходимости модели сдвоенных колес на натуральном монолите торфяной залежи верхового типа выявлены закономерности изменения осадки колес при стабилизации ее величины после 7-го прохода и эффекта релаксации напряжений за счет упругой составляющей на 75-85 % в зависимости от влажности слоя залежи.

Кроме того, наблюдается рост площади пятна контакта колеса с увеличением осадки и уплотнение поверхности колеи с увеличением числа проходов колес, что положительно влияет на проходимость транспортного средства.

Значение угла соскальзывания торфяного сырья с поверхности дна кузова полуприцепа при его разгрузке зависит от влияния адгезия материала и формы сечения кузова. Минимальный угол соскальзывания 46° соответствует модели кузова с полиуретановым двойным полуэллиптическим поперечным сечением и обеспечивает минимальный коэффициент трения образцов экскавированного торфяного сырья.

Исходя из анализа форм поперечных сечений кузовов было установлено, что форма двойного полуэллиптического днища кузова (double half-pipe) обеспечивает рациональное сочетание объема кузова, центра тяжести и самоочищаемости. При выборе данного типа кузова наблюдается сравнительное снижение уплотнения торфяного сырья при погрузке и транспортировке. Запатентованная полезная модель кузова самосвального транспортного средства представлена в Приложении Д.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Рекомендации по функционированию оборудования в условиях комплексно-механизированного карьера

В условиях комплексно-механизированного карьера с одним выемочно-погрузочным экскаватором проходку при выемке торфяного сырья из залежи следует осуществлять зигзагообразно, поскольку данный метод обеспечивает максимальную производительность экскаватора. Ширина рабочей площадки при обеспечении минимума маневров ГТА составляет 30 м, что соответствует ширине рабочей площадки при добыче кускового торфа [5, 55].

Поскольку выемка и транспортировка торфяного сырья производится в условиях проходимости по слабым грунтам в работе выбрано наиболее приспособленное к данным горно-геологическим условиям оборудование для расчета наихудшего сценария производства.

Проведенный анализ комплектации парка выемочно-транспортным оборудованием при карьерной добыче торфяного сырья показал возможность использования, в качестве выемочного оборудования серийный экскаватор, модели E160C на широких гусеницах и, в качестве транспортного оборудования, трактор Беларус-1221.4 с полуприцепом на сдвоенном колесном ходу [55].

Эксплуатация в осенне-весенний период будет сопровождаться быстрым разрушением растительного слоя и образованием глубокой колеи при многократных проходах машины. Движение транспортных средств на карьере требует рациональной организации с правильным выбором маршрутов движения. Маятниковым называется такой маршрут, при котором путь следования транспортных средств в прямом и обратном направлениях проходит по той же трассе.

На схеме выемки и транспортировки торфяного сырья (рисунок 54) показана кратность проходов ГТА по рабочей площадке карьера.

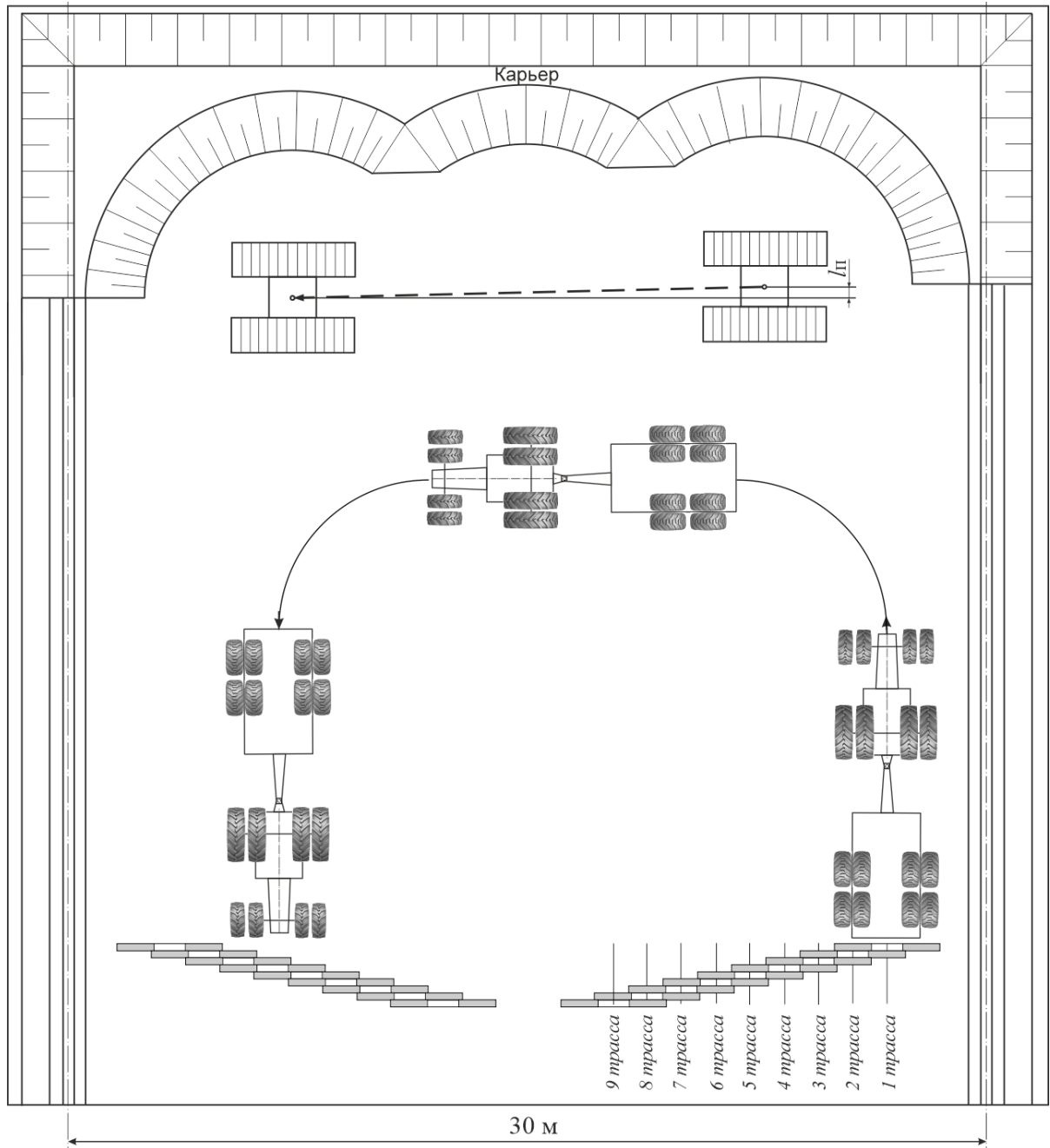


Рисунок 56 – Технологическая схема выемки и транспортирования для обоснования кратности проходов ГТА на торфяной залежи

Рабочая площадка ограничена с боков водоотводящими канавами шириной 1,2 м и с учетом ширины двух приканавных полос имеет рабочую ширину 26,8 м.

Размеры основной рабочей площадки карьера: $V_{рп}=26,8$, $L_{рп}=217$ м. Полезный объем торфяной залежи $V_{птз} = 23\ 262\ м^3$. Если в кузов ГТА помещается 6 ковшей экскаватора, то число проходов составляет 3 877 раз.

В прямом и обратном направлении в ширину рабочей площадки можно вписать по 9 трасс со смещением на ширину ГТА.

Таким образом, необходимо осуществлять проезды ГТА:

- каждый раз со смещением на соседнюю трассу;
- после прохода по всем 9 трассам менять направление движения.

Учитывая, что холостой проход по трассе не оказывает такого давления на грунт как под полной нагрузкой, то количество условных трасс при одном условном проходе может быть увеличено до 45.

Если применять схему поочередной смены колеи, то каждая полоса движения «релаксирует» по 3,3 часа. За это время залежь в месте проезда ГТА частично восстановится.

Экспериментально доказано, что каждая трасса движения «отдыхает» по 3,3 ч после смещения на соседнюю трассу.

При 50 кратном запасе проходимости по одной трассе, смещении фронта работ вдоль рабочей площадки и функционировании ГТА в течение 50 дней в сухие периоды сезона растет вероятность удовлетворительной проходимости ГТА до 90 %.

5.2 Характеристики горнотранспортного агрегата

Выбор параметров ГТА осуществляется исходя из массы груза, дальности транспортных операций, горно-геологических и природно-климатических условий торфяного карьера [55] с обеспечением энергоэффективной и безопасной работе на карьере.

При агрегатировании машин необходимо руководствоваться [54]:

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

По условиям обеспечения проходимости колесного агрегата по поверхности торфяной залежи, в зависимости от состояния поверхности при неблагоприятных погодных условиях, принимаются ГТА в составе: колесный трактор и полуприцеп.

Учитывая, что в разработке торфяного месторождения применяется схема карьерный метод добычи торфяного сырья с его экскавированием и последующим транспортированием в отвал, то агрегатирование ГТА на площадке разработки карьера может осуществляться тракторами типа BELARUS 1221.4 (рисунок 5) со сдвоенными колесами [11, 33].

Трактор приспособлен для работы в различных климатических зонах и на разных видах грунтов, в том числе и с низкой несущей способностью; передний мост – ведущий. Замена задних шин на 520/70R38 для увеличения пятна контакта со слабым грунтом. При сдваивании давление в шинах наружных колес должно быть в 1,20-1,25 раза ниже, чем во внутренних.

На физической модели полуприцепа (рисунок 57) исследована длина неподвижного дышла, при котором нагрузка распределяется частично на оси полуприцепа, частично – на навеску трактора (таблица 23).

Таблица 23 – Параметра модели полуприцепа

Параметр	Единица измерения	Величина
Снаряженная масса модели полуприцепа $m_{мп}$	кг	4,0
Масса груза в кузове полуприцепа $m_{гп}$	кг	9,5
Полная масса $m_{мпг}$	кг	13,5
Грузоподъемность	кТ	12
Вместимость	м ³	0,012
Длина кузова	мм	500
Ширина кузова	мм	300
Глубина кузова	мм	80
Размер шин:		
диаметр	мм	140
ширина	мм	60



Рисунок 57 - Определение рациональной длины дышла на модели полуприцепа

Статическая нагрузка, действующая вертикально вниз на сцепное устройство трактора от прицепного устройства полуприцепа 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 [22].

Допустимая нагрузка на задний мост трактора составляет 60 кН [84].

Длина дышла выбирается из условия обеспечения зазора между трактором и полуприцепом не менее 50 мм при повороте агрегата с минимальным заданным радиусом поворота.

В таблице 24 приведены данные по определению длины дышла на модели полуприцепа и на полуприцепе.

Таблица 24 – Распределение нагрузки на сцепное устройство в зависимости от длины дышла

Длина дышла, м (модель/агрегат)	Нагрузка на сцепное устройство (модель), Н	Нагрузка на сцепное устройство (агрегат), кН
0,13/1,3	14,5	1,45
0,14/1,4	13,4	1,34
0,15/1,5	11,8	1,18
0,16/1,6	10,9	1,09

При анализе агрегатирования трактора и полуприцепа была принята длина дышла 1,5 м в качестве рационального размера. Эксперимент на модели подтвердил стандартные размеры длины дышла у типовых полуприцепов подобного класса.

Перечень основных технических параметров для полуприцепов тракторных согласно ГОСТ 28307-2013 включает в себя: [21]:

- тип (прицеп/полуприцеп);
- агрегатируемость (тяговый класс тракторов);
- максимальную транспортную скорость (км/ч);
- массу снаряженного полуприцепа (кг);
- полную массу полуприцепа (кг);
- распределение полной массы по опорам.

При известных значениях коэффициента сцепления колес на слабом грунте μ и общего коэффициента сопротивления движению ψ торфяной залежи условие проходимости тракторной транспортной единицы с полуприцепом, полная масса которого $M_{ст}$ и прицепная масса трактором M_{tw} выражается неравенством (73) [40]

$$\frac{M_{т.сц}}{M_{п}} \geq \frac{\psi}{\mu}. \quad (73)$$

Для трактора BELARUS-1221.4 на сдвоенных колесах с полуприцепом в агрегате (рисунок 58) общей массой $M_{п} = 13800$ кг при сцепной массе трактора $M_{т.сц} = 7540$ кг соотношение $M_{т.сц} / M_{п} = 0,55$, что больше соотношения $\psi/\mu = 0,4$.

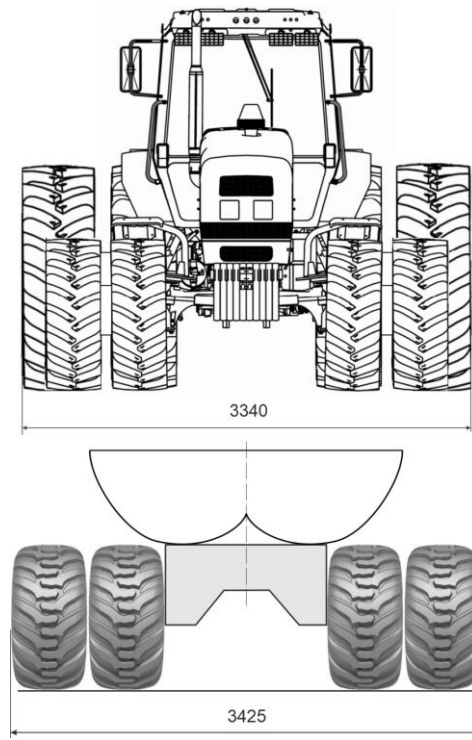


Рисунок 58 – Ширина звеньев ГТА

В Приложении В приведены рекомендуемые технические параметры тракторного полуприцепа в составе ГТА

На рисунке 59 приведена схема агрегатирования трактора и полуприцепа в составе ГТА.

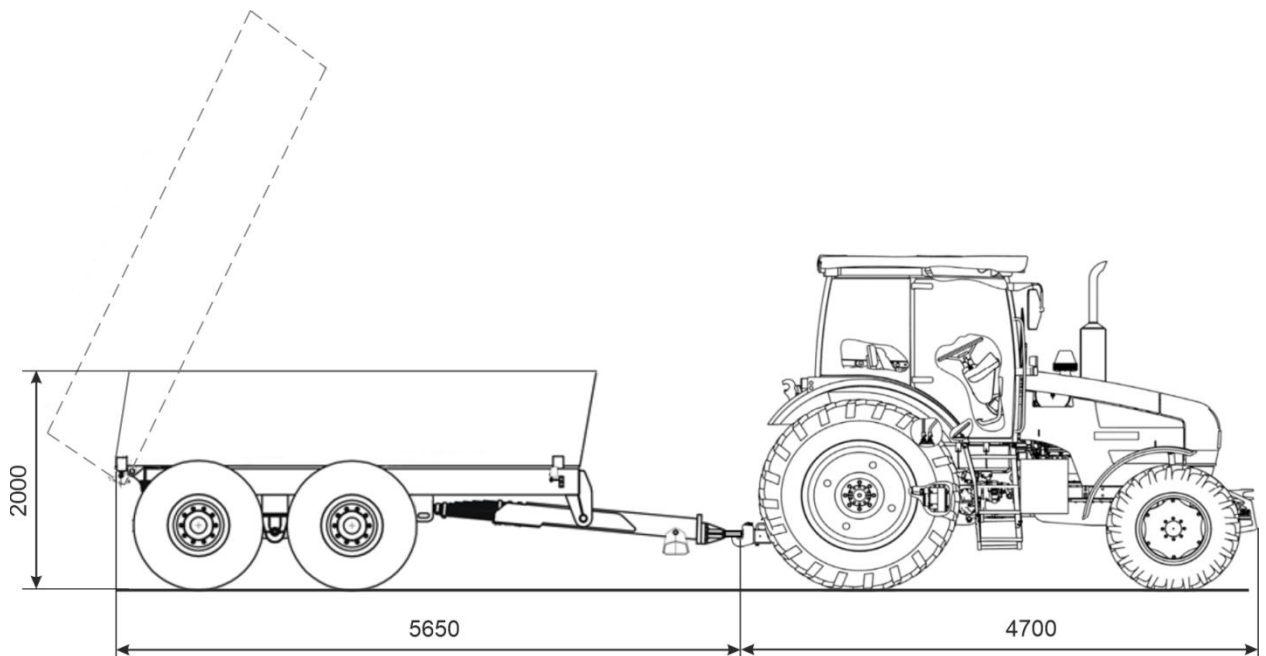


Рисунок 59 – Схема агрегатирования трактора и полуприцепа в составе ГТА

5.3 Выводы по главе 5

При выемке торфяного сырья из залежи проходку экскаватора следует осуществлять зигзагообразно, что обеспечивает его максимальную производительность. Ширина рабочей площадки при обеспечении минимума маневров горнотранспортных агрегатов составляет 30 м, что соответствует ширине рабочей площадки при добыче кускового торфа.

Проведенный анализ комплектации парка выемочно-транспортным оборудованием при карьерной добыче торфяного сырья показал возможность использования, в качестве выемочного оборудования серийный экскаватор, модели E160C на широких гусеницах и, в качестве транспортного оборудования, трактор BELARUS-1221.4 с полуприцепом на сдвоенном колесном ходу.

Исходя из тягово-сцепных характеристик ГТА, установлены функциональные и размерно-массовые значения параметров полуприцепа, позволяющих осуществлять многократный проезд по слабым грунтам.

В весенне-осенний сезоны с обильным выпадением атмосферных осадков полуприцеп рекомендуется оснащать дополнительным комплектом шин для сдваивания колес при эксплуатации в тяжелых погодных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе результатов проведенных исследований изложено научно обоснованное техническое решение актуальной задачи по выбору и обоснованию структуры и параметров полуприцепа ГТА в условиях добычи торфяного сырья карьерным методом. Реализация полученных результатов вносит существенный вклад в совершенствование транспортировки влажного торфяного сырья при осуществлении карьерного метода его добычи.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. В результате анализа и обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы определены эксплуатационные требования, предъявляемые к транспортно-технологическим циклическим системам с многократным проездом по поверхности грунта с низкой несущей способностью.

2. На основе анализа особенностей транспортирования экскавированного торфяного сырья колесным транспортом в условиях торфяного карьера выявлены предельные состояния прочности слабого грунта с учетом степени осушенности торфяной залежи и наличия верхнего торфогенного слоя – нормальное сопротивление грунта $q > 200$ кПа, и предел прочности на сдвиг $\tau > 18$ кПа для обеспечения многократной проходимости средств транспорта с предельной транспортной нагрузкой.

3. На основе анализа многократной проходимости ГТА с учетом моделей индекса конусности транспортных средств (VCI) и среднего максимального давления (MMP) определен рациональный типоразмер шин 600/50R22.5 для комплектования полуприцепа ГТА.

4. Разработана структура ГТА как сочетание тягового энергетического устройства в виде трактора BELARUS-1221.4 тягового класса 2 т со сдвоенными колесами в сочетании с самосвальным двухосным

полуприцепом со сдвоенными колесами на радиальных флотационных шинах.

5. Установлено, что исходя из насыпной плотности перевозимого экскавированного торфяного сырья в диапазоне 780-810 кг/м³ рациональный объем кузова полуприцепа составляет 5-6 м³.

6. На основе уравнения Лагранжа 2-го рода разработана математическая модель движения ГТА по слабым грунтам, позволяющая рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующих на ГТА, для определения траекторий движения звеньев ГТА.

7. Экспериментально установлено, что при разгрузке кузова полуприцепа с формой, выполненной в виде двух полуцилиндров постоянного сечения, из согнутых цельных листов, по профилю кривой наискорейшего спуска – брахистохроны в сочетании с футеровкой поверхности кузова полиуретаном с низким коэффициентом трения и хорошими скользящими качествами наблюдается минимальное значение критического угла соскальзывания массы торфяного сырья 46°.

8. Результаты диссертационной работы приняты к использованию при разработке новых видов прицепного оборудования многопрофильным машиностроительным предприятием ООО «ГринМаш» г. Тверь (акт внедрения от 19.01.2022).

9. Результаты диссертационной работы являются основой для развития комплексных исследований на уровне проектных и научно-исследовательских работ, направленных на создание оборудования высокой проходимости при организационных мероприятиях по освоению территорий со слабыми грунтами, геологоразведке, бурении, добыче полезных ископаемых с удалением вскрыши, прокладке трубопроводов, строительстве дорог, зданий и сооружений в зонах северного умеренного климата и Арктики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, В. Н. Оценка и выбор пневматических шин регулируемого давления для армейских автомобилей / В. Н. Абрамов, М. П. Чистов, И. В. Веселов, А. А. Колтунов. – М.: 21НИИ МО РФ, 2010. – 453 с.
2. Агейкин, Я. С. Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. Амарян, Л. С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. – М.: Недра, 1990. 220 с.
4. 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.
5. Афанасьев, А. Е. Технология и комплексная механизация разработки торфяных месторождений: учебное пособие для вузов / А. Е. Афанасьев, Л. М. Малков, В. И. Смирнов, Г. Е. Столбикова. – М.: Недра, 1987. – 311 с.
6. Бабков, В. Ф. Проходимость колесных машин по грунту / В. Ф. Бабков, А. К. Бируля, В. М. Сиденко; под ред. В. Ф. Бабкова. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 189 с.
7. 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.
8. Баловнев, В. И. Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин: учебное пособие / В. И. Баловнев. – М.: МАДИ, 2014. –148 с.
9. Баловнев, В. И. Определение параметров и выбор землеройных машин / В. И. Баловнев. – М.; Полиграф, 2010. – 224 с.
10. Беккер, М. Г. Введение в теорию систем местность – машина / М. Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
11. Беларусь. Технические характеристики [электронный ресурс]. — URL: <http://www.belarus-tractor.com/catalog/belarus-1220-1/belarus-1220-4/> (дата обращения 12.01.2022).

12. Белокуров, В. Н. Автомобили-самосвалы / В.Н. Белокуров, О. В. Гладков – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
13. Бондарик, Г. К. Инженерно-геологические изыскания: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения / Г. К. Бондарик, Л. А. Ярг – М.: «КДУ», «Добросвет», 2018. – 424 с. – URL: <https://bookonline.ru/node/563/> (дата обращения: 21.12.2021)
14. Васильев, М. В. Эксплуатация карьерного автотранспорта / М. В. Васильев, В. П. Смирнов, А. А. Кулешов. – М.: Недра, 1979. – 280 с.
15. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин.– М.: Колос, 1973. – 199 с.
16. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – Киев: Техника, 1975. – 168 с.
17. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов: учебное пособие / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
18. ГОСТ 12105-74. Тягачи седельные и полуприцепы. Присоединительные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 10 с.
19. ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 8 с.
20. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2013. – 38 с.
21. ГОСТ 28307-2013. Межгосударственный стандарт. Прицепы и полуприцепы тракторные. М.: Стандартинформ, 2020. 17 с.
22. ГОСТ 10000-2017. Прицепы и полуприцепы тракторные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018.– 10 с.
23. ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. – М.: Издательство стандартов, 2020. – 8 с.

24. Гусеничный экскаватор модели E160C компании «UMG». [Электронный ресурс]. URL: <http://umg.ru/catalog/gusenichnye-ekskavatory/e160c--gusenichnyu-ekskavator> (дата обращения 03.04.2019).
25. Гуськов, А. В. Тягово-цепные свойства и проходимость колесного движителя по грунтам со слабой несущей способностью / А. В. Гуськов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2008. – № 2. – С. 63-75.
26. Епифанцев, К. В. Выбор рациональных параметров наборной матрицы торфяной формующей машины для получения энергоплотного окускованного топлива / К. В. Епифанцев: дис. ... кандидата технических наук: 05.05.06. – СПб., 2012. – 145 с.
27. Журавлев, А. Г. К вопросу обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов методом компьютерного моделирования / А. Г. Журавлев, А. В. Скороходов // Проблемы недропользования, – 2015, – № 2. – С. 53–60.
28. Захаров, М. С. Статическое зондирование в инженерных изысканиях / М. С. Захаров. – СПб., СПбГАСУ. – 2007. – 72 с.
29. Зюзин, Б. Ф. Дистортность в методологии взаимодействия технологических машин с торфяной залежью / Б. Ф. Зюзин, А. И. Жигульская, С.А. Юдин. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. – 168 с.
30. Ивлев, Д. Д. Предельное состояние деформированных тел и горных пород / Д. Д. Ивлев, Л. А. Максимова, Р. И. Непершин и др. –М.: Физматлит, 2008. – 832 с.
31. **Казаков, Ю. А.** Анализ условий функционирования горнотранспортного агрегата для транспортировки экскаваторного торфяного сырья / Ю. А. Казаков // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2019 года /

Под общей редакцией Ю. А. Лагуновой. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 57-60.

32. **Казаков, Ю. А.** Анализ влияния многократной проходимости горнотранспортного агрегата по слабым основаниям на массу перевозимого сырья. // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020: Сборник тезисов – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 324-326.

33. **Казаков, Ю. А.** Особенности агрегатирования торфяных горнотранспортных агрегатов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й междунар. научно-техн. конфер. Магнитогорск: Магнитогорский. гос. техн. ун-тет, 2020. Т.1. – С.108

34. **Казаков, Ю. А.** Анализ климатических и дорожных условий эксплуатации горнотранспортного агрегата на слабых грунтах. Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021: Сборник тезисов / Ю. А. Казаков, А. В. Михайлов. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 410-412.

35. Карта трудового процесса «Возведение земляного полотна на болотах с полным выторфовыванием экскаватором ЭО-4111Б» // Сборник карт трудовых процессов на строительство автомобильных дорог. Выпуск IV, М., 2001. –22 с.

36. Ким, Ю.А. Влияние величины давления воздуха в шинах колес на геометрические параметры пятна контакта при взаимодействии с опорной поверхностью / Ю. А. Ким, В. А. Бобрович, Б. В. Войтеховский, В. С. Исаченков // Труды БГТУ. – 2018. – Т. 1. – № 2. – С. 308–312.

37. Классен, П. В. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – М.: Химия, 1982. – 272 с.

38. Корчевский, А. Н. Окускование полезных ископаемых и продуктов обогащения: учебное пособие / А. Н. Корчевский, Л. И. Серафимова. – Донецк: ГОУ ВПО ДонНТУ, 2016. – 140 с.

39. Корчунов, С. С. Исследование физикомеханических свойств торфа: Труды ВНИИТП / С. С. Корчунов. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – № 12. – 232 с.
40. Костюченков, Н. В. Эксплуатационные свойства мобильных агрегатов / Н. В. Костюченков, А. М. Плаксин. – Астана: КАТУ. 2010. – 204 с.
41. Котович, С. В. Двигатели специальных транспортных средств. Часть I / С. В. Котович. – М.: МАДИ (ГТУ). 2008. – 161с.
42. Кочнев, А. М. Теория движения колесных трелевочных систем / А. М. Кочнев, – СПб.: СПбПУ, 2007. – 612 с.
43. Кравченко, И. Н. Методика эффективности применения навесного сменного грунтоуплотняющего оборудования в стесненных условиях / И. Н. Кравченко, С. И. Саляев, С. Г. Марковчин, Н. И. Саляев // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 5 – С. 70-75.
44. Кузнецов, Н. В. Научные основы создания средств комплексной механизации производства фрезерного торфа с отдельной уборкой из наращиваемых валков / Н. В. Кузнецов: дис. ... доктора технических наук: 05.05.06. – Тверь, 2005.– 482 с.
45. Кузнецов, С. М. Теория и практика формирования комплектов и систем машин в строительстве: монография / С. М. Кузнецов. – М.: Директ-Медиа, 2015. – 271 с.
46. Лапшин, Н. С. Обоснование организационно-технических методов открытой разработки песчано-гравийных месторождений с использованием мобильных дробильно-сортировочных комплексов: Автореферат дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.22. - СПб.: С.-Петербург. горн. ун-т, 2012. 20 с.
47. Липкань, А. В. Обоснование выбора способа определения параметров пятна контакта пневмоколесного движителя с опорным основанием / А. В. Липкань, А. Н. Панасюк, Р. А. Кашбулгаев // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №6. – С. 212-228. DOI: 10.33619/2414-2948/43.

48. Максаров, В.В. Машины и оборудование [Электронный ресурс]: учебник / В. В. Максаров, А. В. Михайлов, С. Л. Иванов – СПб.: НМСУ «Горный». 2015, 0321504431 – 1 DVD-R.
49. Мащенко, А. В. Специальные методы механики грунтов и механики скальных пород: учебное пособие / А. В. Мащенко, А. Б. Пономарев, Е. Н. Сычкина. – Пермь: ПНИПУ, 2014. – 176 с.
50. Мисников, О. С. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля: учебное пособие // О. С. Мисников, В. А. Беляков, О. В. Шамбер. – Тверь: ТвГТУ, 2011. – 168 с.
51. Михайлов, А. В. Щеточные торфяные машины / А. В. Михайлов. – СПб.: ВНИИТП, 1994. – 170 с.
52. Михайлов, А. В. Открытая разработка хранилища лигнина / А. В. Михайлов // Записки Горного института, 2017. – Т. 223. – С. 44-50. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.44
53. Михайлов, А. В. Повышение эффективности машин для добычи фрезерного торфа с пооперационно адаптированными щеточными рабочими органами / А. В. Михайлов: дис. ... доктора технических наук: 05.05.06. – СПб, 2004.– 358 с.
54. 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.
55. Михайлов, А. В., Анализ парка машин при карьерной добыче торфа / А. В. Михайлов, **Ю. А. Казаков** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7 (специальный выпуск 20). – С. 3-14. DOI: 10.25018/0236- 1493-2019-7-20-3-14.
56. Нормы технологического проектирования предприятий нерудных строительных материалов. ОНТП 18-85. – М.: Министерство промышленности строительных материалов, 1988. – 22 с.

57. Острецов, А. В. Шины и колеса для автомобилей и тракторов / А. В. Острецов, П. А. Красавин, В. В. Воронин. – М.: МГТУ МАМИ, 2011. – 85 с.
58. Павлов, В. В. Проектировочные расчеты транспортных средств специального назначения (ТССН) / В. В. Павлов. – М.: МАДИ, 2014. – 116 с.
59. Падохин, В. А. Физико-механические свойства сырья и пищевых продуктов: учебное пособие / В. А. Падохин, Н. Р. Кокина. – Иваново: ИГХТУ, Институт химии растворов РАН, 2007. – 128 с.
60. Патент №210696 Российская Федерация, МПК В60Р 1/04 (2006.01) В62D 35/00 (2006.01). Кузов самосвального транспортного средства: № 2021138230: заявл. 22.12.2021: опубликовано 27.04.2022 / Михайлов А. В., **Казаков Ю. А.**, Смирнов А. И.; заявитель Санкт-Петербургский Горный университет. – с.6.
61. Перчаткин, Ю. В. Пути совершенствования прицепного состава к колесным тракторам / Ю. В. Перчаткин // Транспорт Урала. – 2013. - № 2. – С. 82-86.
62. Перчаткин, Ю. В. Формирование и обеспечение технико-эксплуатационных свойств прицепного состава тракторного транспорта / Ю. В. Перчаткин: дис. ... доктора технических наук: 05.20.01. – Уфа, 2015.– 410 с.
63. Плохов, И. В. Основы теории планирования эксперимента и ее приложения в электроприводе / И. В. Плохов – СПб: СПбГТУ, 2003. –126 с.
64. Потапов, В. А. Программа и методика исследований по вопросам почвенной агротехники в интенсивном садоводстве: методические рекомендации / В.А. Потапов. – Мичуринск: ВНИИС им. И.В. Мичурина, 1976. – 102 с.
65. Полуприцеп герметичный тракторный ППГ-8. URL: https://bobruiskagromach.com/catalog/tractor_trailers/ppg_8/ / (дата обращения 03.12.2021).

66. Полуприцеп тракторный самосвальный Trailer PRONAR T679/4M. URL: <https://pronar.pl/ru/produkt/строительный-прицеп-pronar-t679-4m/> / (дата обращения 03.12.2021).
67. Полуприцеп тракторный самосвальный ППТС-4,5. URL: <http://www.оаомам.ru/catalog/item13.html> / (дата обращения 03.12.2021)].
68. Полуприцеп тракторный самосвальный ПСТ-7. URL: https://bobruiskagromach.com/catalog/tractor_trailers/pst_7/ / (дата обращения 03.12.2021).
69. Полуприцеп тракторный универсальный ПТУ-7,5. URL: https://bobruiskagromach.com/catalog/tractor_trailers/ptu_7_5 // (дата обращения 03.12.2021).
70. Полуприцепы и прицепы. URL: <https://os1.ru/article/7827-pritsepy-i-polupritsepy-naydi-shodstvo-i-razlichiya> // (дата обращения 03.12.2021).
71. Ржевский, В. В. Открытые горные работы. Ч. 2. Технология и комплексная механизация / В. В. Ржевский. – М.: Либроком, 2010. – 551 с.
72. Самолазов, А. В. Техническое перевооружение экскаваторно-автомобильных комплексов добывающих предприятий / А. В. Самолазов, Н. И. Паладеева. // Горное оборудование и электромеханика, № 2, 2010. – С. 2–11.
73. Самсонов, Л. Н. Торфяные машины и оборудование: Учебное пособие. Ч. I: Общие сведения о торфяных машинах. Взаимодействие ходовых устройств с торфяной залежью. 1-е изд. / Л. Н. Самсонов, В. Ф. Синицын. – Тверь: ТГТУ, 2006. – 140 с.
74. Самсонов, Л. Н. Фрезерование торфяной залежи / Л. Н. Самсонов. – М.: Недра, 1985. – 211 с.
75. Силкин, А. М. Влияние свойств грунтов на проходимость машин / А. М. Силкин, В. Я. Жарницкий, А. В. Савельев. // Природообустройство, 2014. – №1. – С.41-44.
76. Скотников, В. А. Проходимость машин / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск: Наука и техника, 1982. – 328 с.

77. Смирнов, Г. В. Перспектива развития торфяного машиностроения / Г. В. Смирнов. // Торф и Бизнес, 2006, – № 3. – С. 17-22.
78. Справочник по торфу / под ред. А.В. Лазарева и С. С. Корчунова. М.: Недра, 1982. – 760 с.
79. Танклевский, М. М. Энергоэффективные ходовые системы для машин торфяного производства / М. М. Танклевский: дисс. ... доктора технических наук : 05.15.05. – Калинин; Киев, 1982. – 335 с.
80. Телого, А. В. Обоснование проходимости транспортно-тракторного агрегата при разработке органогенного сырья / А. В. Телого, А. В. Михайлов, А. В. Большунов // Записки Горного института. –2014. –Т. 209. –С. 87-90.
81. Терцаги, К., Механика грунтов в инженерной практике / К. Терцаги, Р. Б. Пек; пер. с англ. А. В. Сулима-Самуйло / под ред. М. Н. Гольдштейна. – М.: Госстройиздат, 1958. – 609 с.
82. Технологическая карта на разработку грунта I – II группы в котловане экскаваторами, оборудованными ковшом обратная лопата, с погрузкой в автосамосвалы. 62–04 ТК. – М.: ОАО «ПКТИпромстрой», 2004. – 22 с.
83. Томкунас, Ю. И. Повышение проходимости машинно-тракторных агрегатов при заготовке кормов на переувлажненных лугах / Ю. И. Томкунас, В. Н. Кецко, Т. М. Чумак, В. В. Ярош // Агропанорама, 2019. – Т. 6, – № 136, – С. 2-6.
84. Тракторы: теория / Под общ. ред. В.В. Гуськова – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
85. Тюремнов, С. Н. Торфяные месторождения. Изд. 3-е, перераб. и доп. / С. Н. Тюремнов. – М.: Недра, 1976. – 488 с.
86. Ухов, С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты / С. Б. Ухов [и др.]. – М.: Высшая школа, 1994. – 527 с.
87. Фауль, А. А. Определение параметров и показателей открытой разработки месторождений нерудных строительных материалов с использованием мобильных дробильных комплексов / А. А. Фауль: Дис. ... канд. техн. Наук. – Санкт-Петербург, СПбГГУ, 2012. – 193 с.

88. Федоров, А.С. Параметры мундштука шнекового пресса с учетом требований к торфяной формованной продукции / А.С. Федоров, Ю.А. Казаков, Д.В. Фадеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7 (специальный выпуск 9). – 16 с.
89. Фомин, В. М. Автомобили. Теория эксплуатационных свойств автомобилей / В. М. Фомин. – М.: Российский университет дружбы народов, 2008. –112 с.
90. Фомин, С. И. Оценка надежности работы технологических схем с мобильными дробильными комплексами / С. И. Фомин, А. А. Фауль, А. И. Пономарев // Записки Горного института, 2011, Т. 190. – С. 51-56.
91. Цытович, Н. А. Механика грунтов: учебное пособие / Н. А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1963. – 637 с.
92. Хитров, Е. Г. Сравнение показателей взаимодействия с грунтом и проходимости колесных и колесно-гусеничных движителей / Е. Г. Хитров, Е. В. Котенев // Resources and Technology, 2019. – Т. 16. –№ 4, – С. 1-24.
93. Ширяев, С. А. Транспортные и погрузочно-разгрузочные средства / С. А. Ширяев, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 847с.
94. Яблонев, А. Л. Обоснование параметров пневмоколесного хода пассивных прицепных машин для транспортирования фрезерного торфа / А. Л. Яблонев, О. В. Дорогов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №7. С. – 174-177.
95. Ahlvin, R. B. NATO Reference Mobility Model Edition II, NRMM II User's Guide. Technical Report GL-92-19 / R. B. Ahlvin, P. W. Haley. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1992, Vicksburg, MS.
96. Anttila, T. Metsamaan raieistumisewn ennustaminen WES-menetelmaa kayttaen. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 1998, no. 17, p. 53.

97. Burger, J. A. Impact of tracked and rubber-tired tractors on a forest soil / J. A. Burger, J. V. Perumpral, R. E. Kreh, J. L. Torbert, S. Minaei. *Trans ASAE*, 1985, no. 28, pp. 369-373.
98. Burt, C. Equipment Selection for Surface Mining: A Review / C. Burt, L. Caccetta // *Journal Interfaces archive*, 2014, vol. 44, no. 2, pp. 143-162.
99. Cao, H. G. Mathematical model of the interaction of wheeled skidder with skid trail in the rotate mode / H. G. Cao, A. M. Kochnev, L. L. Nguyen // *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnicoskoj akademii*, 2019, no. 226, pp 90-98.
100. Caterpillar Performance Handbook Edition 49. Caterpillar, Peoria, Illinois, U.S.A., 2019, 2438 p.
101. Cirello, A. Experimental analysis of the contact pressure distribution in an off-road tyre / A. Cirello, G. Marannano, G. Virz`i Mariotti // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2009, vol. 44, pp. 287-295. DOI: 10.1243/03093247JSA498.
102. Choudhary, R. P. Optimization of Load–Haul–Dump Mining System by OEE and Match Factor for Surface Mining / R. P. Choudhary // *International Journal of Applied Engineering and Technology*, 2015, no. 5, pp. 96-102.
103. DIFCO Tracked Trailers. URL: <https://www.difcoequipment.com/products/difco-tracked-trailers> // (accessed at: 04.12.2021).
104. Hatchell, G. E. Soil disturbances in logging: Effects on soil characteristics and growth of loblolly pine in the Atlantic Coastal Plain / G. E. Hatchell, C. W. Ralston, R. R. Foil // *Journal of Forestry*, 1970, no. 68, pp. 772-775.
105. Hyvarinen, H. Ohjattavien metsakoneiden stabiilisuus (The stability of frame-steered forest machines) / H. Hyvarinen, J. R. Ahokas // *Finnish Research Institute of Engineering in Agriculture and Forestry. VAKOLA*, 1975, no. 14, 31 pp.
106. Ibrahim, A. Foundation and embankment construction in peat: an overview / A. Ibrahim, H. B. Kim, A. Asadi, H. Nahazanan // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, no. 19, pp. 1079-1094.

107. Janbu, N. Veiledning ved løsning av fundamenteringsoppgaver / N. Janbu, L. Bjerrum, B. Kjærnsli. Oslo: Norges geotekniske institutt, 1956, pp. 92.
108. Johnson, M. Impact of in-pit crushing and conveying on pit shell optimization / M. Johnson. URL: <https://www.deswik.com/resources/> (Accessed: 12 March 2019).
109. Kolář, P. A joint model of heavy truck, tyres, and operating environment for tyres selection / P. Kolář. Master's thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, Gothenburg, Sweden, 2015. 83 p.
110. Luijten, M. F. J. Lateral Dynamic Behaviour of Articulated Commercial Vehicles / M. F. J. Luijten. Master's thesis (Eindhoven University of Technology), 2010.
111. Maclaurin, E. B. Comparing the NRMM (VCI), MMP and VCI traction models / E. B. Maclaurin // Journal of Terramechanics, 2007, vol. 44, pp. 43-51.
112. Maclaurin, E. B. Proposed revision to MMP based on the tractive performance trials with single pneumatics tyres and a modular track system / E. B. Maclaurin, DERA/LS/TR970122/1.DERA, 1997. Chertsey, UK.
113. Maclaurin, E. B. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres / E. B. Maclaurin // Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, 1990. vol. 1, pp. 177-186.
114. Manyele, S. V. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time / S. V. Manyele // Engineering, 2017, no. 9, pp. 599-624.
115. Meyer, M. P. International Society for Terrain-Vehicle Systems Standards / M. P. Meyer, I. R. Ehrlich, D. Sloss, [et al] // Journal of Terrainechemics, 1977, vol. 14, no. 3, pp. 153-182.
116. Mikhailov, A. V. Excavating and loading equipment for peat mining / A. V. Mikhailov [et al] // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci, 2017, no. 87, pp. 14-20. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022014

117. Mikhailov, A. V. Modeling of peat tractor semi-trailer motion / A. V. Mikhailov, **Y. A. Kazakov**, A. I. Zhigul'skaya // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2021, no. 1061, pp. 20-26. DOI:10.1088/1757-899X/1061/1/012026.
118. Mikhailov, A. V. A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat mining / A. V. Mikhailov, O. Z. Garmaev, D. R. Garifullin, **Y. A. Kazakov** // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, no. 378, pp. 86-90. DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012086.
119. Mikhailov, A. V. Models for representing limit states in geomechanics / A. V. Mikhailov, B. F. Zjuzin, A. I. Zhigul'skaya // J. Phys.: Conf. Ser., 2021. no. 1753, pp. 20-34.
120. Munro, R., Evans, R., Saarenketo, T. Roadex II Project: Focusing on Low-Volume Roads in the European Northern Periphery / R. Munro, R. Evans, T. Saarenketo // Transportation Research Board, 2007. vol. 1989-2, no. 1, pp. 292-299. DOI: 10.3141/1989-76.
121. Owende, P. M. O. Operations protocol for eco-efficient wood harvesting on sensitive sites / P. M. O. Owende, J. Lyons, S. M. Ward // EU 5th Framework Program on Quality of Life and Management of Living Resources Contract No. QLK5-1999-00991, 2002. pp. 1-74.
122. Paricheh, M. In-pit crusher location as a dynamic location problem / M. Paricheh, M. Osanloo, M. Rahmanpour // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2017. no. 117 pp. 599-607.
123. Partington, M. Understanding the nominal ground pressure of forestry equipment / M. Partington, M. Ryans // FPInnovations, 2010, vol.12, no.5, pp. 1-8.
124. Patil, V. Generic and complete vehicle dynamic models for open-source platforms / V. Patil: Master's thesis in Applied Mechanics. Department of Applied Mechanics, Chalmers university of technology, Gothenburg, Sweden, 2017, 112 p.
125. Planning and design of roads, airfields, and heliports in the theater of operations-road design. Field Manual No. 5-430-00-1 Air Force Joint Pamphlet, Washington, DC, 1994. vol. 1, no. 32-8013, 493 p.

126. Popp, K. Ground vehicle dynamic / K. Popp, W. Schiehlen // Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010, p. 348.
127. Poršinsky, T. Ecoefficient Timber Forwarding on Lowland Soft Soils / T. Poršinsky, T. Pentek, A. Bosner, I. Stankić // Global Perspectives on Sustainable Forest Management, 2012, pp. 275-288.
128. Priddy, J. D. Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure / J. D. Priddy, W. E. Willoughby // Journal of Terramechanics, 2006, vol. 43, no. 2, pp. 85-96.
129. Pugh, S. Concept selection: a method that works. In: Hubka, V. (ed.), Review of design methodology / S. Pugh // Proceedings international conference on engineering design, Zürich, Heurista, 1981, pp. 497-506.
130. Ragheb, H. Evaluation of wheeled vehicle mobility and performance prediction on deformable soil / H. Ragheb, S. Hegazy, N. Girgis // Proceedings of the 13th Int. AMME Conference, 2008, pp. 54-66
131. Rahmanpour, M. An approach to determine the location of an in-pit crusher in open pit mines / M. Rahmanpour, M. Osanloo, N. Adibee, M. Akbarpourshirazi, // International Journal of Engineering (IJE) Transactions C, 2014, vol. 9, no. 27, pp. 1475-1484.
132. Rowland, D. A review of vehicle design for soft ground operation / D. Rowland // Proceedings of the 5th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, 1975, no. 1, pp. 179-219.
133. Rula, A. A. An Analysis of Ground Mobility Models (ANAMOB) / A. A. Rula, J. Nuttall // Technical Report M-71-4. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1971.
134. Saarilahti, M. Studies on the suitability of radio wave methods for assessing the navigability of peatlands / M. Saarilahti // Acta Forestalia Fennica, 1982, no. 176, article id 7623. DOI: 10.14214/AFF.7623.
135. Saarilahti, M. Maastoliikkuvuuden perusteet. / M. Saarilahti // Metsän tutkimuslaitok sentied onantoja, 1991, p. 390.

136. Saarilahti, M. Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD) / M. Saarilahti // EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources), 2002, pp. 1-87.
137. 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 foresttractors. Soil interaction model / M. Saarilahti. Appendix Report, 2002, no.5, pp. 1-43.
138. Šabartová, Z. An optimization model for truck tyres selection / Z. Šabartová, P. Lindroth, A. B. Strömberg, M. Patriksson // Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Optimization 2014. Aurelio Araujo (ed.), Lisbon, Portugal, 2014, pp. 561-566.
139. Sally, A. S. Terrain Characterization for Trafficability, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory / A. S. Sally. CRREL Report 93-6, 1993, pp. 30.
140. Sprawka, P. The methods of evaluation the mobility of off-road vehicles / P. Sprawka // Solid State Phenomena Trans Tech Publications, Switzerland, 2012, vol. 180, pp. 355-365. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.180.355
141. Sharifzadeh, M. Delay-Dependent Criteria for Robust Dynamic Stability Control of Articulated Vehicles / M. Sharifzadeh, A. Farnam, A. Senatore, F. Timpone, A. Akbari // Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD, 2018, Mechanisms and Machine Science, p. 49.
142. Smith, S. D. A new earthworks estimating methodology / S. D. Smith, S. W. Graeme, G. Martin // Construction Management and Economics, 2000, vol. 2, no. 18, pp. 219-228.
143. Sod-peat production Meripeat – URL: <https://www.meripeat.com/en/products/sod-peat-production/> (accessed on 03.12.2021).

144. Suglo, R. S. Novel At-Face-Slurry Performance Modelling with Elliptical and Spherical Geometries/ R. S. Suglo, S. Frimpong, O. F. Brown // *Journal of Powder Metallurgy & Mining*, 2013, no. 1, pp. 1-6.
145. Taghavifar, H. Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction / H. Taghavifar, A. Mardani // *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2014, no. 13, pp. 57-66.
146. Taheri, S. Steering Control Characteristics of Human Driver Coupled with an Articulated Commercial Vehicle / S. Taheri: Doctor's thesis. – Montreal: Concordia University, 2014, 236 p.
147. Wong, J. Y. *Theory of Ground Vehicles* 3-ed / J. Y. Wong // New York: John Wiley & Sons, 2001, 528 p.
148. Wong, Y. C. D. An Assessment of Land Vehicles' Trafficability / Y. C. D. Wong, H. H. S. Lim, W. Q. W. Chan // *DSTA Horizons*, 2016, pp. 54-63.
149. Zoz, F. M., Grisso, R. D. Traction and tractor performance / F. M. Zoz, , R. D. Grisso // *ASAE Distinguished Lecture Series, Tractor Design*, 2003, no. 27, pp. 1-47.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технические характеристики оборудования

Таблица А.1 – Технические характеристики трактора BELARUS-1221.4

Наименование параметра	Значение параметра
Тяговый класс по ГОСТ 27021-86	2
Номинальное тяговое усилие, кН	20
Мощность двигателя, кВт	100
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	2100
Удельный расход топлива при номинальной мощности, г/кВт·ч	244
Число передач: вперед/назад	16/8
Скорость переднего хода (расчетная) движения трактора при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя, км/ч:	
1) наименьшая замедленная	1,70
2) наибольшая транспортная	35,0
Допустимая нагрузка на мосты, кН:	
а) на передний	40
б) на задний	60
Масса трактора (эксплуатационная максимально разрешенная), кг	8000
Дорожный просвет под корпусом заднего моста (на шинах основной комплектации), мм, не менее	480
Клиренс, мм	620
Наименьший радиус окружности поворота (с подтормаживанием), м	5,4
Колесная формула	4К4а
Шины:	
- передние колеса	420/70R24
- задние колеса	520/70R38
База трактора, мм	2760± 30
Длина общая, мм	4500
Ширина (по концам полуосей задних колес), мм	2300
Высота по кабине, мм	2850
Размер колеи, мм:	
а) по передним колесам	2020±20, 2120 ±20
б) по задним колесам	от 1946 до 2150
Элемент ТСУ Тяговый крюк	К1220-28071005

Таблица А.2 – Технические характеристики прицепа тракторного самосвального Мордовагромаш 2ПТС-4,5

Наименование параметра	Значение параметра
Ширина колеи, мм	1800
Рабочая скорость, до, км/ч	35
Масса конструкционная, кг, не более	1710
Габаритные размеры: длина, мм, не более	5645
Габаритные размеры: ширина, мм, не более	2385
Габаритные размеры: высота, мм, не более	1770
Масса перевозимого груза, кг, не более	4500
Внутренний размеры кузова: длина, мм, не более	4090
Внутренний размеры кузова: ширина, мм, не более	2230
Внутренний размеры кузова: высота, мм не более	620
Объем кузова, м ³	5,65
Погрузочная высота платформы, мм, не более	1150
Дорожный просвет, мм, не менее	350
Разгрузка прицепа	на три стороны
Угол подъема платформы, °(назад)	50
Опрокидывающий механизм	Гидравлический с приводом от трактора

Таблица А.3 – Технические характеристики полуприцепа тракторного самосвального ПСТ-7-1Б «Бобруйскагромаш»

Наименование параметра	Значение параметра
Вместимость кузова, м ³	6,0
Габаритные размеры:	
Длина, м	4,8
Ширина, м	2,5
Высота, м	1,96
Масса, т	1,77
Транспортная скорость, км/ч	25
Шины	12,8-06.020
Угол опрокидывания кузова, °.	50
Трактор, тяг. кл.	1,4
Тип тягово-сцепного устройства трактора	ТСУ-2/ТСУ-2В

Таблица А.4 – Технические характеристики полуприцепа тракторного самосвального Difco Tracked Trailers начального уровня

Наименование параметра	Значение параметра
Вместимость кузова, м ³	7
Высота платформы от поверхности, мм	1450
Высота загрузки, мм	1900
Трактор, тяг. кл.	2,0
Мощность двигателя, кВт	85
Дышло	плавающее
Ходовая часть	Резиновые колеса и резино-металлические гусеницы
Количество осей, шт.	3
Количество колес, шт.	6
Шины	500/50-17
Масса, кг	4000
Полная масса с грузом, кг	10300

Таблица А.5 – Технические характеристики полуприцепа тракторного самосвального ПТК-3М

Наименование параметра	Значение параметра
Грузоподъемность, не менее, кг	10 000
Геометрический объем кузова (вместимость кузова), м ³	15 (22)
Разгрузка кузова	назад, гидравлическая
Угол подъема кузова, °	50
Радиус поворота минимальный, м	5
Скорость передвижения, км/ч	11,5-30,0
Давление на грунт с грузом, кПа	30
Масса конструктивная, кг	4660
Габаритные размеры, мм	7000×2300×2850

Таблица А.6 – Технические характеристики полуприцепа тракторного самосвального TRL-30 F

Наименование параметра	Значение параметра
Мощность двигателя трактора, л.с.	150
Объем кузова, м ³	28
Масса без груза, кг	5900
Допустимая масса груза, кг	10500
Общая допустимая масса, кг	16400

Продолжение таблицы А.6

Колеса, шт.	8
Шины	21,3-R24
диаметр, мм	1400
ширина, мм	540
Общая высота, мм	2900
Общая ширина, мм	3450
Общая длина, мм	8750
Высота кузова, мм	1250
Ширина кузова, мм	3350
Длина кузова, мм	6700

Таблица А.7 – Технические характеристики полуприцепа тракторного самосвального PRONAR T679/4M

Наименование параметра	Значение параметра
Грузоподъемность, не менее, кг	8500
Геометрический объем кузова (вместимость кузова), м ³	4,5
Загрузочная площадь, м ²	7,8
Внутренняя длина кузова (низ/верх), мм	3540/3700
Внутренняя ширина кузова, мм	2210
Разгрузка кузова	назад, гидравлическая
Угол подъема кузова, градус	50
Радиус поворота минимальный, м	5
Скорость передвижения, км/ч	11,5-30,0
Колесная колея, мм	1640
Количество осей, шт.	2
Количество колес, шт.	4
Типоразмер шин	400/60-15.5
Давление на грунт с грузом, кПа	70
Толщина металла пола/бортов, мм	4/4
Габаритные размеры, мм	5380/2400/1560
Высота платформы от поверхности, мм	1010
Масса конструктивная, кг	2200

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Количество оборудования выемочно-транспортного комплекса

Для обеспечения бесперебойного функционирования одного выемочного экскаватора следует определить необходимое количество горнотранспортных агрегатов.

Число ковшей, необходимое для загрузки кузова тракторного прицепа (ПБ1):

$$N = V_{\text{куз}} / (qk_1), \quad (\text{ПБ1})$$

где $V_{\text{куз}}$ – вместимость кузова тракторного прицепа, $6,0 \text{ м}^3$ [116];

q – геометрическая емкость выемочного ковша торфяного экскаватора, $1,0 \text{ м}^3$ [24];

k_1 – коэффициент использования емкости ковша экскаватора, $1,2$ [75] (ПБ2)

$$N = 6 / (1 \cdot 1,2) = 5 \text{ шт.} \quad (\text{ПБ2})$$

Принимаем количество ковшей равное 5 шт.

Время выемки торфяного сырья и погрузки его в тракторный полуприцеп (ПБ3, ПБ4)

$$t_n = t_{\text{цз}} n, \quad (\text{ПБ3})$$

$$t_{\text{цз}} = t_k + t_{\text{ГХ}} + t_b + t_{\text{ХХ}}. \quad (\text{ПБ4})$$

где $t_{\text{цз}}$ – длительность цикла, с;

n – количество циклов (число ковшей);

t_k – время копания;

$t_{\text{ГХ}}$ – время поворота экскаватора с полным ковшом;

t_b – время выгрузки;

$t_{\text{ХХ}}$ – время поворота в карьер.

$$t_{\text{цз}} = 20 \text{ с}; t_n = 5 \cdot 20 = 100 \text{ с.}$$

Продолжительность рабочего цикла ГТА (ПБ5)

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{н}} + (2L/v_{\text{ср}}) + t_{\text{р.м}} + t_{\text{м}}, \quad (\text{ПБ5})$$

где $t_{\text{н}}$ – время погрузки одного полуприцепа, 100 с (1,7 мин);

L – дальность вывоза торфяного сырья, 1,0 км;

$v_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения ГТА, которую можно условно принять равной 0,13 км/мин (7,8 км/ч); с учетом состояния поверхности торфяной залежи,

$t_{\text{р.м}}$ – время разгрузки транспорта с маневрированием, 2,0 мин;

$t_{\text{м}}$ – время маневрирования на карьере (установка транспорта под погрузку), 1,35 мин.

$$T_{\text{ц}} = 1,7 + (2 \cdot 1,0)/(0,13) + 2,0 + 1,35 = 20,43 \text{ мин.}$$

Требуемое количество ГТА для совместной работы с выемочным экскаватором (ПБ6)

$$N_{\text{тр}} = T_{\text{ц}}/(t_{\text{п}} + t_{\text{м}}); \quad (\text{ПБ6})$$

$$N_{\text{тр}} = 20,43/(1,5 + 1,35) = 7,17 \text{ шт.}$$

Принимаем $N_{\text{пр}} = 7$ шт.

Производительность одного ГТА ($\text{м}^3/\text{ч}$) (ПБ7)

$$П_{\text{ГТА}} = V_{\text{куз}} \cdot n \cdot k_{\text{в}}, \quad (\text{ПБ7})$$

где $V_{\text{куз}}$ – объем кузова полуприцепа, $6,0 \text{ м}^3$;

n – количество транспортных циклов в час; $n = 60/T_{\text{ц}}$;

$T_{\text{ц}}$ – длительность цикла работы одного ГТА, 29 мин.;

$k_{\text{в}}$ – коэффициент использования рабочего времени, 0,85.

$$n = 60/20,43 = 2,94.$$

С учетом количество транспортных циклов в час

$$П_{\text{ГТА}} = 6,0 \cdot 2,94 \cdot 0,85 = 14,98 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Сменная производительность одного ГТА (ПБ8)

$$П_{\text{см}} = П_{\text{ГТА}} \cdot t_{\text{см}}, \quad (\text{ПБ8})$$

где $t_{\text{см}}$ – время одной смены, 11 ч.

Сменная производительность

$$P_{\text{см}} = 6,0 \cdot 2,94 \cdot 0,85 \cdot 11 = 164,76 \text{ м}^3/\text{см}.$$

За 1 смену 7 ГТА перевезут объем торфяного сырья $V_{\text{выв.см.}}$.

$$V_{\text{выв.см.}} = P_{\text{см}} N_{\text{тр}},$$

$$V_{\text{выв.см.}} = 164,76 \cdot 7 = 1\,153,3 \text{ м}^3.$$

Коэффициент использования транспортных средств находится в диапазоне (ПБ9)

$$0,8 \leq K_{\text{ИТС}} \leq 1,2; \quad (\text{ПБ9})$$

И находится по формуле (ПБ10)

$$K_{\text{ИТС}} = N_{\text{пр}} / N_{\text{тр}}; \quad (\text{ПБ10})$$

$$K_{\text{ИТС}} = 10 / 10,1 = 0,99.$$

Коэффициент использования транспортных средств находится в допустимых границах. Для бесперебойной работы одного выемочного экскаватора необходимо 10 единиц ГТА.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технические параметры перспективного тракторного полуприцепа

Таблица В.1 – Технические параметры перспективного тракторного полуприцепа

Показатель	Единица измерения	Значение
Тип	-	полуприцеп
Агрегатируемость (тяговый класс трактора)	т	2
Тип трактора	-	колесный
Колесная формула	-	4к4а
Номинальное тяговое усилие	кН	18-27
Транспортная скорость	км/ч	5
Масса снаряженного полуприцепа	кг	2650
Полная масса полуприцепа	кг	6800
Распределение полной массы по опорам: - на сцепное устройство трактора - на оси полуприцепа	-	1200 5600
Количество осей	шт.	2
Габаритные размеры: - длина, - ширина, - высота	мм	5650 3425 2000
База полуприцепа	мм	4250
Ширина колеи	мм	1220
Минимальный радиус поворота	м	6
Вместимость кузова	м ³	8
Тип кузова		
Погрузочная высота по верхней кромке бортов	мм	2000
Тип подвески	-	
Тип тягово-сцепного устройства	-	ТСУ-2/ТСУ-2В
Направление разгрузки	-	назад
Шины (сдвоенные)		600/50R22,5
Давление воздуха в шинах	кПа	100
Удельное давление колес на грунт при полной массе	кПа	30

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования



Общество с ограниченной ответственностью
«ГринМаш»

170040, Россия, г. Тверь, Старичье шоссе, 30
ИНН 6950152820
КПП 695001001
тел.: (4822) 736-733
тел./факс: (4822) 736-600
e-mail: info@greenmash.ru

от 19.01.22 № 6к
на № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Казакова Юрия Алексеевича

«Обоснование и выбор параметров горнотранспортного агрегата в условиях добычи торфяного сырья карьерным способом», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.05.06 Горные машины.

ООО «ГринМаш» осуществляет выпуск широкого ряда специальной техники: прицепного и полуприцепного оборудования и торфяной техники.

Учитывая, что слабые грунты занимают около 22% территории страны, и отсутствует специализированное оборудование для осуществления транспортных операций на слабых грунтах, разработанные в диссертационном исследовании технические решения по проектированию полуприцепов, эксплуатируемых в условиях слабых грунтов и транспортирующих экскавированное торфяное сырье натуральной влажности *приняты* к разработке конструкторской документации на универсальный транспортный полуприцеп для слабых грунтов.

Настоящим актом подтверждается практическое использование результатов диссертационного исследования Казакова Юрия Алексеевича «Обоснование и выбор параметров горнотранспортного агрегата в условиях добычи торфяного сырья карьерным способом».

Генеральный директор
ООО «ГринМаш»



Боченков А.А.

Дата 19.01.2022



ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Патент на полезную модель №210696

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 210696

**КУЗОВ САМОСВАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО
СРЕДСТВА**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Михайлов Александр Викторович (RU), Казаков Юрий Алексеевич (RU), Смирнов Андрей Игоревич (RU)*

Заявка № 2021138230

Приоритет полезной модели **22 декабря 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **27 апреля 2022 г.**
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **22 декабря 2031 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Электронный документ подписан квалифицированной подписью
Сертификат 68b80077c14c500a94edba24145d5c7
Владелец: **Зубов Юлий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 25.05.2023

Ю. С. Зубов

