

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

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

Санкт-Петербург – 2022

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Михайлов Александр Викторович

Официальные оппоненты:

Зюзин Борис Федорович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет», кафедра «Технологические машины и оборудование», заведующий кафедрой;

Бочков Владимир Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра «Автоматики и компьютерных технологий», заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится 22 сентября 2022 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2, ауд. № 1163.

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

Автореферат разослан 22 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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., 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 др. Ими предложены оценочные методы проходимости транспортного оборудования по слабым грунтам. 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. Исследованию физико-механических свойств торфяной залежи и созданию средств механизации посвящены работы: Амарьяна 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 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 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 исследования. 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 г.).

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, прове-

дения 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.

Степень достоверности и апробация результатов. 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 диссертационной работы 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-технической 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 учёных «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.);

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведен обзор состояния изученности рассматриваемой темы диссертационного исследования. Выполнен

анализ особенностей технологии карьерного способа добычи торфяного сырья, обоснована структура комплекта технологических машин по реализации технологии добычи и транспортирования торфяного сырья по слабым грунтам.

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

Во второй главе приведены результаты анализа функционирования горнотранспортного агрегата в условиях карьера. Обобщена информация по влиянию конструктивных и эксплуатационных факторов транспортных агрегатов на проходимость, представлены способы обеспечения проходимости при движении по слабым грунтам. Проанализирован опыт отечественных и зарубежных ученых в разработке математических моделей взаимодействия колесных движителей с деформируемым опорным основанием.

В третьей главе для подтверждения теоретических положений по выбору структуры полуприцепа приведена программа методики проведения экспериментальных исследований в полевых и лабораторных условиях. Разработаны методики экспериментальных исследований процесса многократной проходимости с определением конструктивных параметров полуприцепа в полевых и лабораторных условиях.

В четвертой главе приведены результаты лабораторных исследований взаимодействия опорных колес с поверхностью торфяной залежи и взаимодействия влажного органомогенного сырья с кузовами типовых форм. Обоснована форма кузова полуприцепа.

В пятой главе по результатам диссертационного исследования приведены практические рекомендации по определению размерно-массовых параметров полуприцепа в составе ГТА.

Основные результаты работы отражены в следующих защищаемых положениях.

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.

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. Поэтому выбор типа и необходимых размеров опорных поверхностей ходового устройства машины производится с учётом деформационных и прочностных свойств торфяной залежи, характеризующих её 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. Горнотранспортный агрегат 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 двигается заполненным до места разгрузки, выгружает груз и возвращается порожним к экскаватору с позиционированием для погрузки.

При выборе параметров ГТА, эксплуатируемого в условиях карьерной добычи органогенного сырья, в первую очередь, необходимо руководствоваться критерием проходимости ГТА по слабым грунтам. Проходимость колесного оборудования на влажных и мягких грунтах обеспечивается минимумом удельных давлений на площадке контакта шины колеса с грунтом.

Полная масса прицепного звена агрегата и площадь контакта колес с деформируемым основанием имеют решающее значение для определения результирующего давления на грунт. Двумя широко используемыми методами являются модель индекса конусности транспортных средств (*VCI*) как «минимальная прочность грунта в критическом слое с точки зрения индекса конусности требуемая для

определенного количества проходов транспортного средства, обычно один проход (VCI_1) или 50 проходов (VCI_{50}), и концепция среднего максимального давления (MMP). Параметр MMP относится к характеристикам слабых грунтов и обеспечивает минимальную проходимость по удельному давлению на грунт путем анализа среднего значения максимального давления на каждом колесе, связан с размерами колеса, а также с полной массой полуприцепа.

Для флотационных сдвоенных шин двухосного полуприцепа модель среднего максимального давления определена (кПа) как (1)

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

где G_m – вес машины с грузом, кН; m – количество осей, шт.; b – ширина колеса, м; D – диаметр колеса, м; H – высота профиля, м; w_k – общее число колес машины.

Анализ значений показателя MMP проведен для ряда радиальных флотационных шин (16 типоразмеров $D=1045-1270$ мм; $B=500-700$ мм) при массе груза в кузове 4000 кг и массе полуприцепа без учета массы колес 1 585 кг. Среднее максимальное давление MMP определяется в основном шириной B , диаметром шин D и полным весом груженого полуприцепа G . С помощью дробного факторного эксперимента получена математическая модель изменения MMP от параметров полуприцепа и размеров шин в натуральном виде (2)

$$MMP = 82,5 - 0,05B - 0,04D + 0,43G. \quad (2)$$

Для типоразмеров радиальных флотационных шин получены графики зависимости MMP от основных параметров (рисунок 1).

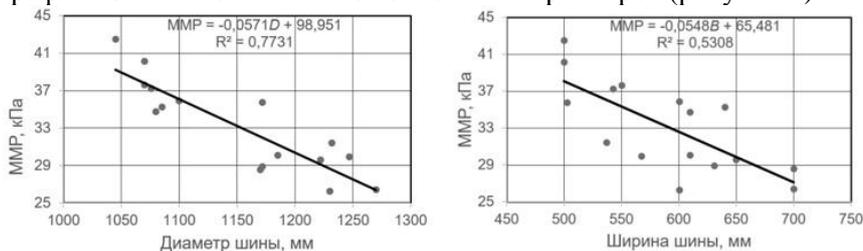


Рисунок 1 – Значения MMP в зависимости от наружного диаметра и ширины шины

Модель индекса конусности (3) полуприцепа (VCI), определена на основе модели A. Rula и J. Nuttall, с анализом индекса мобильности полуприцепа MI и введением поправочного коэффициента для учета влияния прогиба шин (δ) на характеристики VCI (рисунок 2).

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

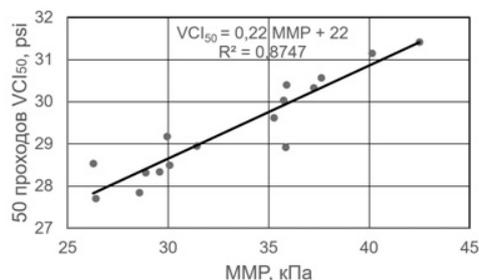


Рисунок 2 – Связь индекса конусности транспортного средства и среднего значения максимального давления на каждом колесе

Для торфяного тракторного полуприцепа получено выражение (4), связывающее индекс конусности транспортного средства и среднее значения максимального давления на каждом колесе полуприцепа:

$$VCI_{50} = 22 + 0,22 MMP. \quad (4)$$

На рисунке 3 приведена классификация условий проходимости транспортных средств по торфяному основанию.

Заштрихованная зона на рисунке 3 показывает высокую вероятность многократной проходимости исследуемого полуприцепа.

Сравнительная оценка типоразмера шин с применением метода «матрица принятия решений» (матрица Pugh) позволила систематизировать факторы, 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 $MMP=28,9$ кПа и $VCI_{50}=28,3$ psi.

Показатели прочности грунта		Категория транспортных средств					
τ , кПа	q , кПа	1	2	3	4	5	6
		VCI ₅₀					
		20	40	60	80		
		Осушенная торфяная залежь					
18	300						
		Предварительно осушенная торфяная залежь					
12-18	200						

Вероятность движения транспортного средства (Pr)

	отлично	90% Pr 100%
	хорошо	75% Pr 90%
	удовлетворительно	50% Pr 75%
	плохо	0% Pr 50%

Рисунок 3 – Классификация условий проходимости транспортных средств по торфяному основанию

Математическое описание движения звеньев ГТА выполнено с помощью уравнения Лагранжа 2-ого рода на основании расчетной схемы (рисунок 4). 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.

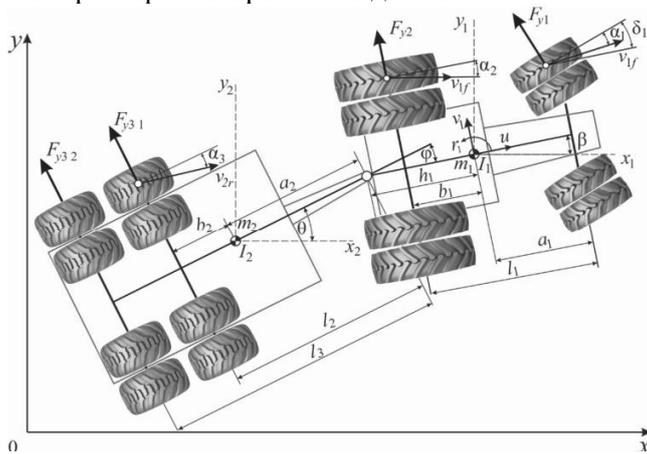


Рисунок 4 – Система координат математической модели криволинейного движения ГТА

Уравнения движения горнотранспортного агрегата (5):

$$\begin{aligned}
& (m_1 + m_2)(\dot{v}_1 + ur_1) - [m_2(h_1 + a_2)]\dot{r}_1 - m_a a_2 \ddot{\varphi} = \\
& = -\{(C + C_t)v_1 + [C_{s_1} - C_{31}(h_1 + l_2) - C_{32}(h_1 + l_3)r_1]\}/u + C_1 \delta_1 - \\
& - hm_2(\dot{v}_1 + ur_1) + [I_1 + m_2 h_1 (h_1 + a_2)]\dot{r}_1 + m_2 h_1 a_2 \ddot{\varphi} = \\
& = -\{(C_{s_1} - C_t h_1)v_1 + [C_{q_1^2} + C_{31} h_1 (h_1 + l_2) + C_{32} h_1 (h_1 + l_3)]r_1 + \\
& + (C_{31} h_1 l_2 + C_{32} h_1 l_3)\dot{\varphi} + C_t h_1 u \varphi\}/u + C_1 a_1 \delta_1 - m_2 a_2 (\dot{v}_1 + ur_1) + \\
& + [I_2 + m_2 a_2 (h_1 + a_2)]\dot{r}_1 + (I_2 + m_2 a_2^2)\ddot{\varphi} = \\
& = -\{(C_{31} l_2 + C_{32} l_3)v_1 + [C_{31} l_2 (h_1 + l_2) + C_{32} l_3 (h_1 + l_3)]r_1 + \\
& + [C_{31} l_2^2 + C_{32} l_3^2 \dot{\varphi} + (C_{31} l_2 + C_{32} l_3)u \varphi]\}/u. \quad (5)
\end{aligned}$$

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.

В полевых условиях на месторождении Озерное Всеволожского района Ленинградской области проведены замеры показателей прочности верхнего слоя: нормальное напряжение q , и предел прочности на сдвиг τ . Проведена заготовка натуральных монолитов ненарушенного верхнего слоя торфяной залежи размером 1200x600x500 мм (фускум-торф, $R=10$ %) В опытах на монолитах моделировалась нагрузка, создаваемая моделями сдвоенных колес – двойное нагружение штампа подряд, имитируя проезд двухосного полуприцепа. Нагрузка на сдвоенные колеса постоянная – 900 Н, соответствующая созданию давления, равного 30 кПа. После двух циклов нагружения происходила выдержка (3 мин.) без нагрузки до стабилизации глубины колеи. Результаты лабораторных исследований взаимодействия опорных колес с поверхностью торфяной залежи (рисунок 5).

При многократном проезде колес глубина колеи увеличивается в зависимости от количества двойных проходов.

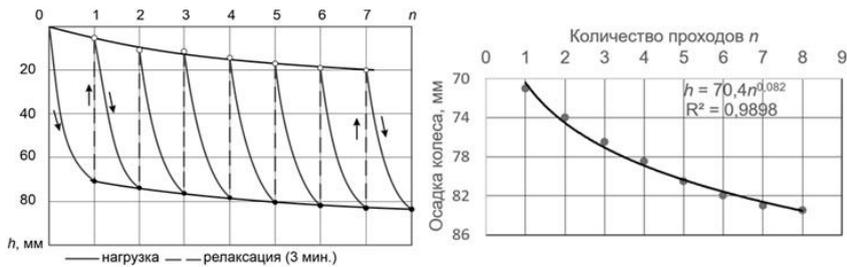
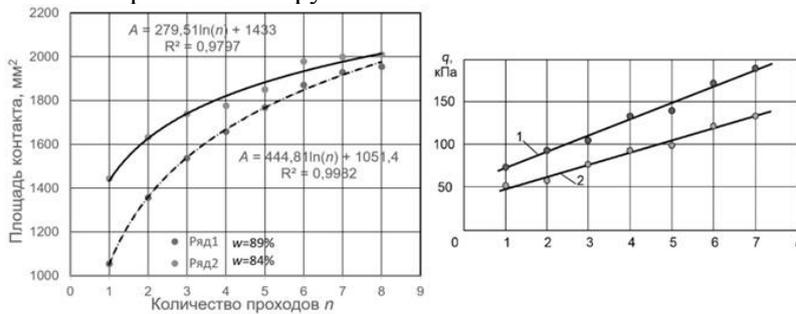


Рисунок 5 – Характер нагружения грунта с изменением глубины осадки в зависимости от количества двойных проходов сдвоенных колес по неосушенной торфяной залежи ($w=89\%$)

Общая осадка грунта может быть разделена на восстанавливающую (упругую) h_e и остаточную (пластическую) h_p . 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 . Таким образом, при прохождении колесного ГТА уже после 7-го цикла нагружения происходит стабилизация осадки. На рисунке б показано изменение площади контакта сдвоенных колес и удельного сопротивления грунта в зоне контакта колес.



а)

б)

Рисунок 6 – Площадь контакта колес (а) и удельное сопротивление грунта на поверхности контакта (б) в зависимости от количества двойных проходов по ненарушенной торфяной залежи:

1 – влажность залежи $w=89\%$; 2 – влажность залежи $w=84\%$

С увеличением проходов и ростом осадки торфяной залежи увеличивается и площадь пятна контакта колес с залежью по логарифмическому закону, приближаясь к максимальной.

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.

В ходе исследования адгезионных свойств экскавированного торфяного сырья в контакте с поверхностями кузова было установлено, что рациональной формой кузова для его эффективной разгрузки является сочетание двух полуцилиндров постоянного сечения, из согнутых цельных листов, по профилю брахистохроны (рисунок 7).

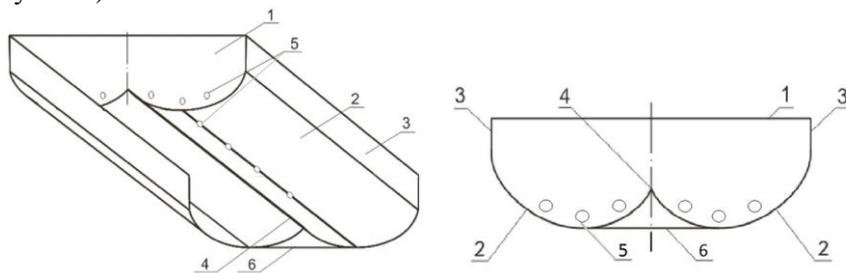


Рисунок 7 – Техническое решение формы кузова самосвального транспортного полуприцепа: 1 – передний борт; 2 – днище; 3 – боковые борта; 4 – ребро жесткости; 5 – перфорация в передней стенке и в днище кузова; 6 – соединительная планка

При транспортировании экскавированного торфяного сырья в стандартном кузове происходит большее уплотнение по сравнению с кузовом по техническому решению. 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 91,0 % до 90,8 %).

В лабораторных условиях на моделях кузова проведен эксперимент по исследованию уплотнения торфяного сырья объемно-

весовым методом при имитации процесса транспортирования методом встряхивания модели в течении 5 мин. Экспериментально определено 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 %.

Отсутствие углов способствует лучшей самоочищаемости кузова с двойным полуэллиптическим поперечным сечением (*double half-pipe*). Экспериментально установлено, что форма кузова полуприцепа, выполненная в виде двух полуцилиндров постоянного сечения из согнутых цельных листов по профилю брахистохроны в сочетании с футеровкой поверхности кузова полиуретаном при снижении критического угла соскальзывания массы торфяного сырья до 46° создает условия для его удовлетворительной разгрузки по сравнению с широко применяемыми кузовами полутрубного сечения.

Схема ГТА (трактор *BELARUS-1220.4* тягового класса 2 т со сдвоенными колёсами в сочетании с самосвальным двухосным полуприцепом со сдвоенными колёсами на радиальных флотационных шинах (600/50R22.5)) показана на рисунке 8.

Снизить величину давления колеса на грунт возможно путем увеличения площади пятна контакта за счет уменьшения давления воздуха в шинах колес до 100 кПа.

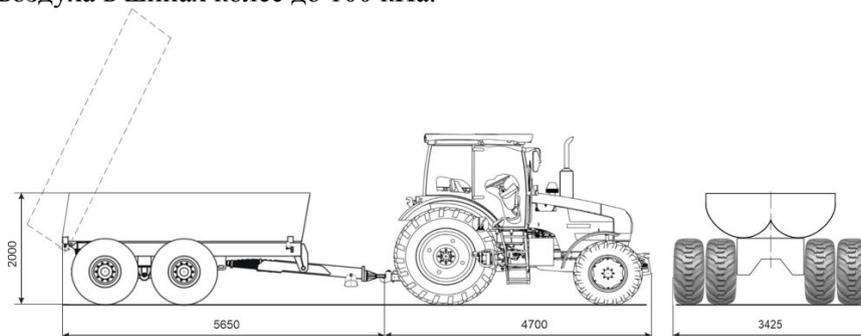


Рисунок 8 – Схема горнотранспортного агрегата со сдвоенными колёсами на радиальных флотационных шинах (600/50R22.5)

Объем кузова полуприцепа ГТА определен исходя из насыпной плотности экскавированного торфяного сырья как $6,0 \text{ м}^3$ при объеме ковша экскаватора $1,0 \text{ м}^3$ и насыпной плотности экскавированного торфяного сырья $789\text{-}810 \text{ кг/м}^3$.

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 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 $q > 200 \text{ кПа}$, и предел прочности на сдвиг $\tau > 18 \text{ кПа}$ 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, 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 «Грин-Маш» 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-9-3-15.

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

3. Mikhailov, A.V. A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat mining / A.V. Mikhailov, O.Z. Garmayev, 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.

4. 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.

Патент:

5. Патент №210696 РФ, МПК В60Р 1/04 (2006.01) В62D 35/00 (2006.01). Кузов самосвального транспортного средства: № 2021138230: заявл. 22.12.2021; опубл. 27.04.2022 / Михайлов А.В., **Казаков Ю. А.**, Смирнов А. И.; заявитель Санкт-Петербургский Горный университет. – с. 6.