

ДЕГТЯРЕВ НИКИТА ИВАНОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ТЯГОВЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ КОЛЕСНОГО
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА КЛАССА 1,4**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель

Федоткин Роман Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева

Официальные оппоненты:

Сиротин Павел Владимирович,

доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научно-образовательной деятельности Института перспективного машиностроения «Ростсельмаш», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Дмитриев Михаил Игоревич,

кандидат технических наук, начальник инженерного центра – главный конструктор АО «Петербургский тракторный завод».

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

Защита состоится 24 декабря 2025 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: +7 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

_____ Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В современных условиях сельскохозяйственного производства ключевой задачей является повышение эффективности технологических операций за счет оптимизации эксплуатационных характеристик тракторной техники. Решающее значение имеют два взаимосвязанных фактора: улучшение тягово-сцепных свойств машин и снижение их уплотняющего воздействия на почву. Давление движителей на грунт признано одной из наиболее острых проблем, поскольку даже незначительное превышение предельно допустимых значений нарушает структурное состояние почвы, ухудшает воздухо- и водопроницаемость и замедляет биологические процессы, обеспечивающие рост растений. Многократные проходы техники приводят к формированию плотных комьев, препятствующих развитию корневых систем, а современные серийные тракторы зачастую не соответствуют требованиям ГОСТ 26955-86 по давлению на почву, что усиливает экологические и агротехнические риски.

Сравнительный анализ ходовых систем показывает преимущество гусеничных тракторов: большая опорная поверхность обеспечивает высокие тягово-сцепные свойства при равномерном распределении нагрузки, снижая уплотняющее воздействие на почву. Однако высокая стоимость и узкая специализация гусеничных машин ограничивают их применение преимущественно энергоемкими операциями на тяжелых или переувлажненных грунтах. Колесные тракторы, напротив, универсальны, но теряют эффективность на слабонесущих почвах ранней весной, что ведет к неполной годовой загрузке.

Перспективным направлением повышения тягово-сцепных свойств и снижения уплотняющего является применение съемных гусеничных ходовых систем – тяговых гусеничных модулей (ТГМ). Модули монтируются на серийные колесные тракторы без изменения конструкции, позволяя адаптировать машину к почвенно-климатическим условиям. Применение ТГМ снижает удельное давление на грунт до 50–60 кПа, повышает тяговый класс и минимизирует буксование, что критично при работе с тяжелыми орудиями. Таким образом реализуется комплексное решение задачи повышения производительности и сохранения плодородия земель.

Необходимость разработки и внедрения отечественных ТГМ актуализируется состоянием тракторного парка России. Дефицит техники превышает 223,5 тыс. единиц, при этом большинство эксплуатируемых машин физически и морально устарело. Переоборудование избытка тракторов класса 1,4 (139,2 тыс. ед.) в технику переменного класса 1,4–2,0 посредством ТГМ способно ликвидировать дефицит без капитальных инвестиций в производство новых машин, что

особенно важно в условиях ограниченного финансирования и санкционных ограничений на импорт. Зарубежные съемные системы (Mattracks, Soucy Track) недоступны либо экономически нецелесообразны.

Таким образом, создание съемных гусеничных модулей для колесных тракторов является своевременной научно-практической задачей, сочетая требования повышения тягово-сцепных качеств, сохранения агрофизических свойств почвы и оптимизации структуры отечественного тракторного парка.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиями и разработками в направлении повышения тягово-сцепных свойств колесной и гусеничной техники занимались многие ученые в России и зарубежом: Агейкин Я.С., Атаманов Ю.Е., Бейненсон В.Д., Гребнев В.П., Гуськов В.В., Держанский В.Б., Дидманидзе О.Н., Канделя М.В., Кацыгин В.В., Келлер А.В., Крючков В.А., Ксенович И.П., Кутьков Г.М., Лапик В.П., Львов Е.Д., Федоткин Р.С., Шарипов В.М., Arvidsson J., Bellentani L., Damme L. ten, Dwyer M. J., Greve M. H., Gillberg M., Guarnieri A., Keller T., Lamandé. M., Molari G., Munkholm L. J., Okello J. A., Scarlett A. J., Schjønning P., Trautner A., Walker M., Westlin H., Sedoni E.

Цель работы: обоснование параметров и режимов работы тяговых гусеничных модулей для колесного сельскохозяйственного трактора класса 1,4.

Задачи работы:

1. Обоснование компоновки тяговых гусеничных модулей с изменяемой площадью контакта гусениц с опорной поверхностью.
2. Обоснование параметров зацепления ведущего колеса тяговых гусеничных модулей с резиноармированной гусеницей.
3. Обоснование параметров подвески тяговых гусеничных модулей, выбор параметров и метода изготовления упругих элементов.
4. Разработка ходовой системы трактора с тяговыми гусеничными модулями.
5. Проведение прочностных расчетов несущих конструкций и их оптимизация.
6. Разработка эскизной документации, включающей чертежи модуля, спецификации узлов и требования к сборке. Учитываются особенности монтажа на тракторы класса 1,4 и совместимость с существующими системами управления.
7. Техническое сопровождение производства прототипов: контроль качества сборки, проверка соответствия геометрических параметров, настройка механизмов регулировки контактной площади.
8. Проведение испытаний направленные на уточнение скоростных параметров и подтверждения повышения тягового класса.

Так же будет учтен подбор комплектующих: учитываются доступность материалов на внутреннем рынке, их устойчивость к коррозии и износу, а также соответствие требованиям по весу и прочности. После изготовления опытных образцов проводятся лабораторные испытания, направленные на оценку их совместимости с трактором, проверку работоспособности в условиях имитации реальных нагрузок и анализ влияния модулей на тяговые характеристики машины. Результаты испытаний позволят скорректировать конструкцию перед переходом к полевым тестам.

Внедрение подобных систем в производство способно решить ряд стратегических задач: повысить годовую загрузку техники за счет расширения ее функциональности, сократить сроки весенне-полевых работ благодаря возможности раннего выхода на переувлажненные поля, а также снизить экологический ущерб от уплотнения почвы. Кроме того, модернизация существующего парка тракторов класса 1,4 с помощью тяговых гусеничных модулей станет экономически эффективной альтернативой закупке новой техники, что особенно актуально в условиях ограниченных бюджетов сельхозпроизводителей и необходимости импортозамещения.

Научная новизна работы.

1. Обоснованы параметры и режимы работы съемных тяговых гусеничных модулей переменной площади опоры для тракторов тягового класса 1,4. Представлены проектировочные и поверочные расчеты элементов конструкции гусеничных модулей: узлов приводы с ведущими колесами и гусеницами; несущих конструкций; рамы опорных катков и системы подрессоривания; механизмов натяжения и регулирования площади контакта гусениц с опорной поверхностью; стабилизаторы тангенциальной устойчивости.

2. Принцип управления тягово-сцепными свойствами трактора за счет механизма регулирования площади контакта гусеницы с опорной поверхностью с перспективой автоматизации. Такое решение позволяет изменять длину опорной ветви гусеницы в диапазоне 1–1,5 м без разборки модуля и без изменения натяжения гусеницы.

3. Результаты экспериментальных исследований функциональных свойств трактора с ТГМ.

4. Аппаратно-программный комплекс для измерения скоростных свойств трактора, а также результаты экспериментальной оценки скоростных свойств с применением этого программно-аппаратного комплекса.

Практическая значимость

1. Конструкция тягово-гусеничного модуля для трактора тягового класса 1,4 с системой изменения площади пятна контакта.

2. Сниженное буксование колесного трактора при использовании съемных тягово-гусеничных модулей.

3. Снижение удельного давления на почву до 50–60 кПа при использовании съемных тягово-гусеничных модулей, что удовлетворяет нормативным требованиям по ГОСТ Р 58655-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву».

4. Механизм изменения площади контакта и натяжения гусеницы вместе со стабилизатором тангенциальной устойчивости.

Положения выносимы на защиту.

1. Параметры и режимы работы съемных тяговых гусеничных модулей для тракторов тягового класса 1,4.

2. Принцип управления тягово-сцепными свойствами трактора за счет механизма регулирования площади контакта гусеницы с опорной поверхностью с перспективой автоматизации.

3. Результаты экспериментальных исследований функциональных свойств трактора с ТГМ.

4. Результаты экспериментальной оценки скоростных свойств трактора с применением разработанного программно-аппаратного комплекса.

Апробация работы осуществлялась в рамках выступлений и докладов на международных и всероссийских конференциях:

- Чтения академика В.Н. Болтинского (Москва, 17-18 января 2025г);
- Чтения академика В.Н. Болтинского (Москва, 17-18 января 2023г);
- Чтения академика В.Н. Болтинского (Москва, 17-18 января 2022 г);
- Научно-практическая конференция, в рамках постоянно действующего семинара «Чтения академика В.Н. Болтинского» (Москва 3-5 июня 2021 г.).

Публикации.

Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных трудах, в том числе в 4 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в 1 статье в издании, индексируемом в БД Scopus, в 1 патенте на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 99 наименования, в том числе 27 на иностранном языке и приложения на 15 страницах. Объем диссертации – 161 страниц машинописного текста. Диссертационная работа проиллюстрирована 64 рисунками и поясняется 34 таблицами.

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии на всех этапах теоретических и экспериментальных исследований, формировании задач исследования, получении и обработке

результатов расчетов и экспериментальных данных, подготовке публикаций по диссертационной работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформирована цель и задачи исследований, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» проведен анализ существующих методов снижения уплотняющего воздействия движителей сельскохозяйственной техники на почву. Рассмотрены различные технические решения, включая применение шин с регулируемым давлением воздуха (СТIS), широкопрофильных шин, спаренных колес и резинометаллических гусениц.

Показано, что применение резиноармированных гусениц в изначально колесной тракторной технике обеспечивают значительное снижение удельного давления на почву по сравнению с колесными движителями. Проанализирован мировой опыт применения резинометаллических гусениц на тракторах класса 1,4 тяги 50-60 кН, выявлены их преимущества и недостатки.

Проведен патентный поиск, показавший наличие различных конструктивных решений резинометаллических гусениц, но отсутствие адаптированных вариантов для конкретных условий эксплуатации. На основании проведенного анализа сформулированы задачи исследований, направленные на разработку и обоснование конструктивных параметров резиноармированных гусениц для трактора МТЗ-82.1 класса 1,4.

Во второй главе «Расчетно-аналитическое обоснование параметров и режимов работы трактора тягового класса 1,4» проведен расчет конструктивных параметров резиноармированных гусениц тракторов тягового класса 1,4. Проведено 3D-сканирование трактора Беларусь 82.1 для получения геометрии элементов крепления.

Выполнены расчеты площади контакта съемного тягово-гусеничного модуля с почвой по ГОСТ 26955-86 для различных значений давления (0,04 и 0,06 МПа) и длины опорной поверхности (рисунок 1). Установлено, что при длине гусеницы 300 мм и давлении 0,04 МПа площадь контакта составляет 547,73 см², а при увеличении длины до 1500 мм – 409,39 см².

Разработана конечно-элементная модель в САД-системе (рисунок 2 и 3) для анализа напряженно-деформированного состояния гусеничных траков. Проведено шесть вариантов расчетов с различными нагрузками от 41 500 Н до 65 000 Н при углах поворота 0–45°. Выполнен анализ геометрии беговых дорожек гусениц для обоснования радиусов $R = 715$ мм и $r = 450$ мм, обеспечивающих

передаточное отношение 1,589, соответствующее требованиям ГОСТ 27021-86 для тракторов класса 1,4 с диапазоном скоростей 2,7 м/с.

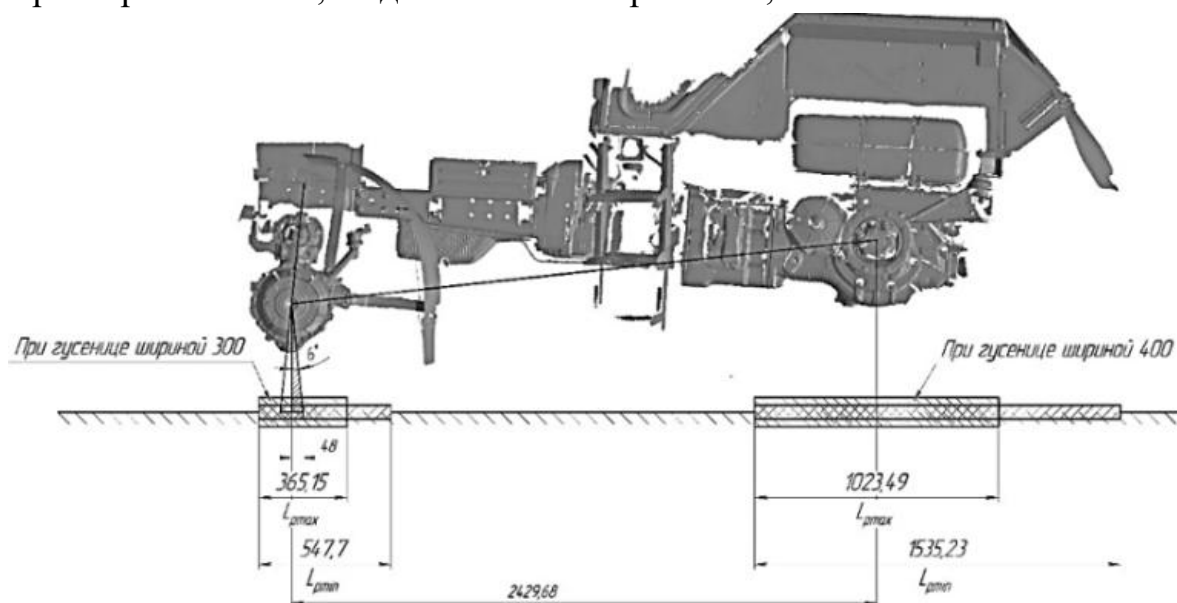
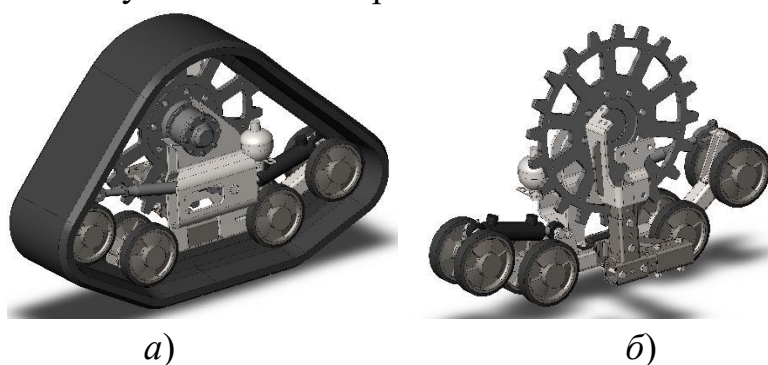


Рисунок 1 – Схема расположения пятен контакта

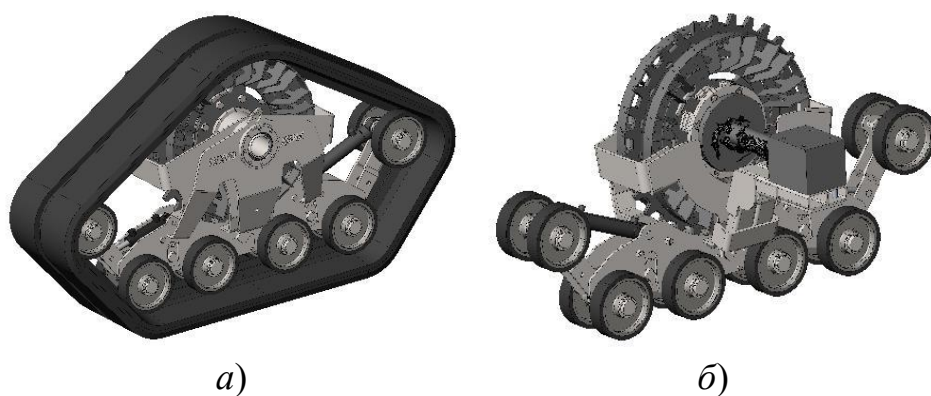


а)

б)

Рисунок 2 – ТГМ передней оси трактора:

а – вид спереди; б – вид сзади на ограничитель переворота



а)

б)

Рисунок 3 – ТГМ задней оси трактора:

а – вид спереди; б – вид сзади на ограничитель переворота

Разработана модель взаимодействия резинометаллической гусеницы с почвой с учетом нормальных и касательных напряжений. Определены оптимальные конструктивные параметры: высота грунтозацепов 912 мм для VII-VIII передач и 1416 мм для IX передачи.

Проведены расчеты напряжений в узлах крепления и динамических нагрузок при работе гусеничной системы. Разработанная методика позволяет прогнозировать напряженно-деформированное состояние элементов гусеницы и оптимизировать их конструкцию для снижения уплотняющего воздействия на почву при сохранении эксплуатационных характеристик трактора.

Геометрия привода сформирована в CAD-пакете: на задний и передний модули установлены звездочки цевочного типа с барабанами подпора траков, обеспечивающими комбинированное фрикционно-цевочное зацепление. Диаметр начальной окружности ведущего колеса рассчитывался из условия сохранения эксплуатационных скоростей. При базовом радиусе штатного колеса 715 мм линейная скорость трактора на высшей передаче падает ниже 20 км/ч, если принять $D_0 = 834$ мм.

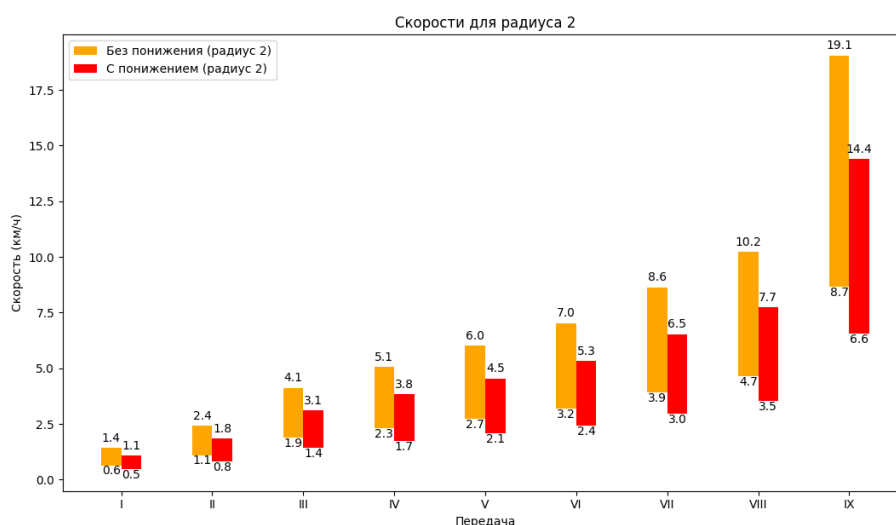


Рисунок 4 – Теоретические скорости движения при диаметре ВК 834 мм

Чтобы ликвидировать просадку скоростей в пахотном диапазоне 9–12 км/ч, предложено увеличить диаметр до 932 мм; это позволяет VII–IX передачам перекрывать пахоту, культивацию и транспорт без изменения коробки передач, хотя реальный выбор оставлен в диапазоне 834–932 мм исходя из компоновки.

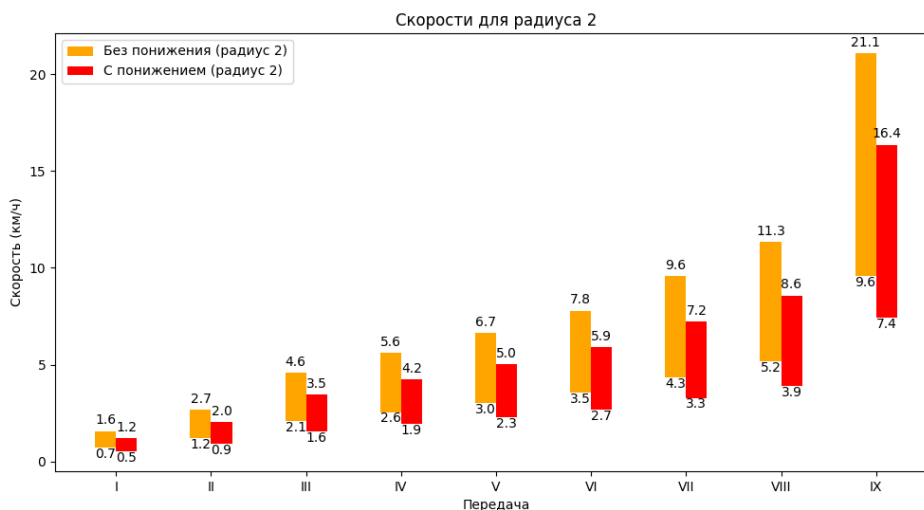


Рисунок 5 – Теоретические скорости движения при диаметре ВК 932 мм

Проведенные расчеты напряженно-деформированного состояния позволили скорректировать параметры разрабатываемых ведущих колес для гусеничного модуля

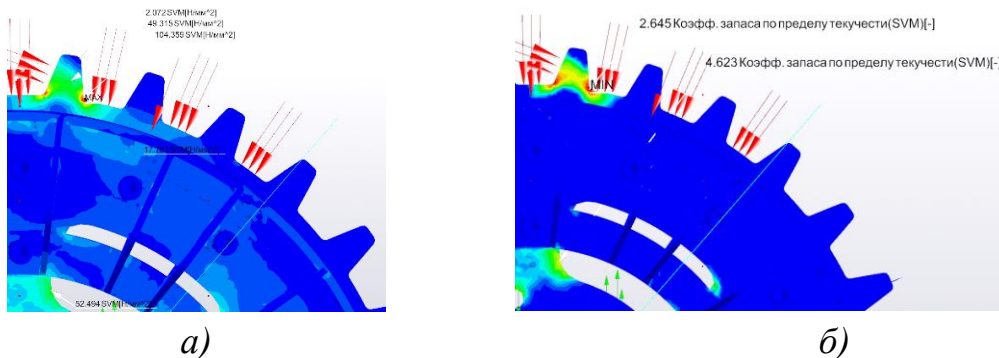


Рисунок 6 – Исследование напряженно-деформированного состояния ведущих колес:

а) – нагружение зубьев силой тяги трактора; *б)* – нагружение части венца зубьев осевой силой сползания гусениц

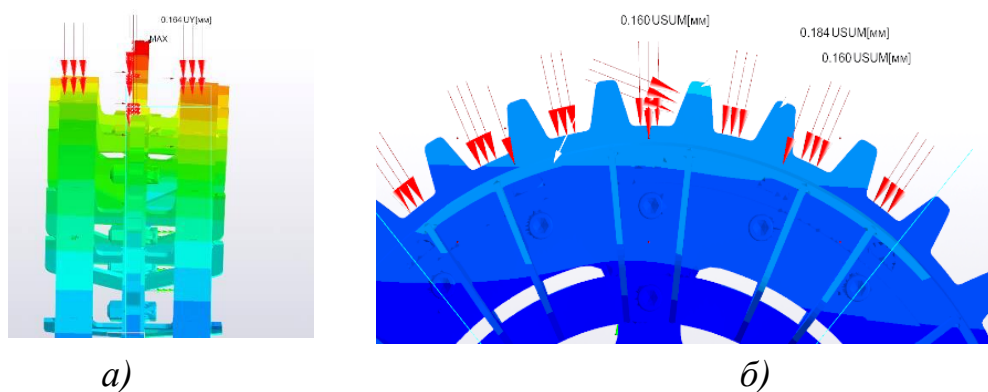


Рисунок 7 – Исследование напряженно-деформированного состояния ведущих колес нагружение части венца зубьев осевой силой сползания:

а – Перемещения в плоскости UY гусениц; *б* – Суммарные перемещения

В результате расчета было определено, что предложенная конструкция ведущих колес съемного тягово-гусеничного модуля удовлетворяет требованиям надежности и может быть реализована на практике

Так же в ходе работы была проработана конструкция стабилизатора тангенциальной устойчивости (ограничителя переворота) и места крепления на трактор (рисунок 8).

Проведен расчет напряженно-деформированного состояния стабилизаторов передних и задних съемных тягово-гусеничных модулей (рисунок 9 и 10).

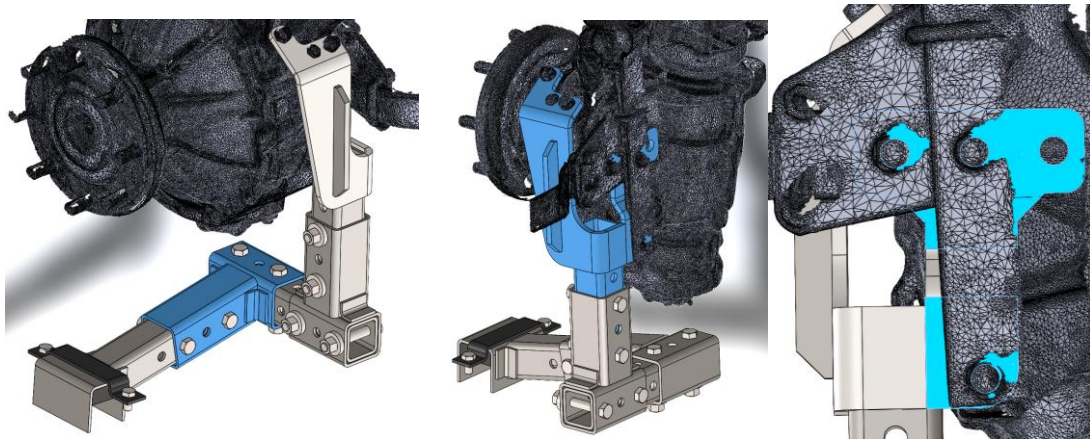


Рисунок 8 – Внешний вид переднего ограничителя переворота в сборе с узлом трактора

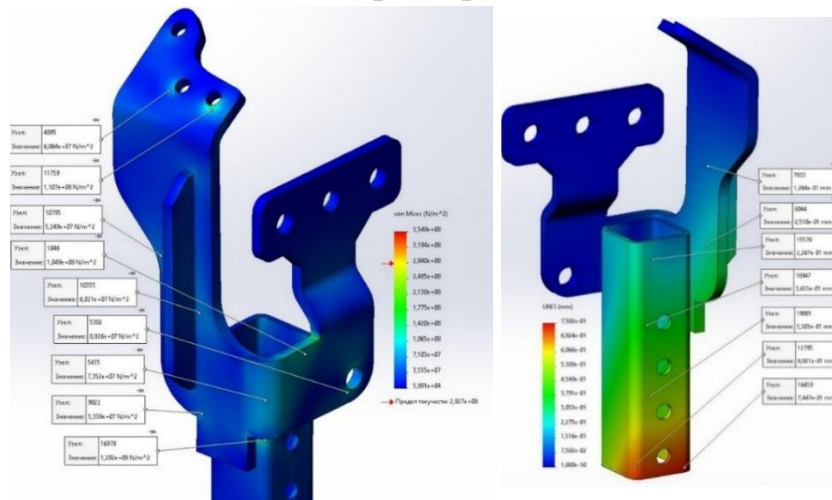


Рисунок 9 – Карта напряженно-деформированного состояния узла крепления стабилизатора тангенциальной устойчивости к корпусу редуктора моста

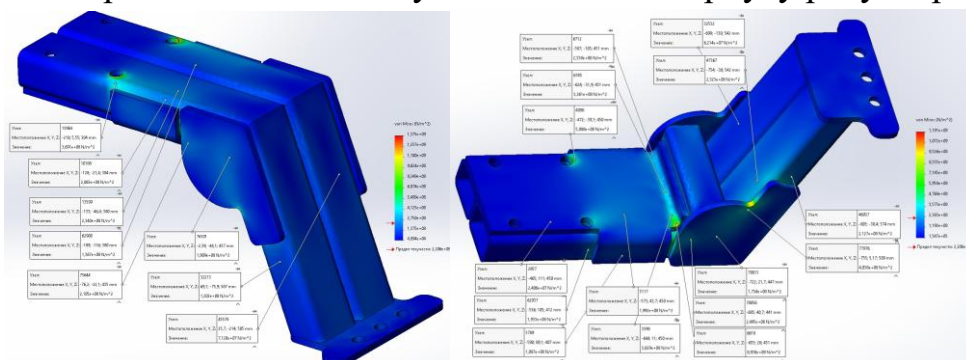


Рисунок 10 – Результат напряженно-деформированного состояния заднего ограничителя переворота

В результате расчетов получены значения предельных нагрузок, и определено, что конструкция предложенных стабилизаторов тангенциальной устойчивости удовлетворяет требованиям надежности по пределу текучести.

Так же продолжена программа автоматизированного профилирования зубьев ведущих колес под резиноармированной гусеницы любой типоразмер: рассчитываются радиусы делительной, впадин и вершине, строится базовый профиль зуба, экспортируемый в DXF (рисунок 11).

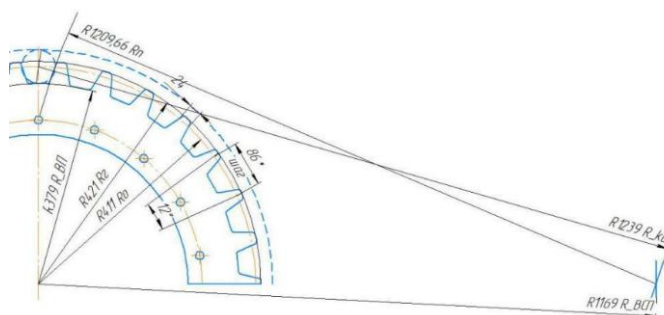


Рисунок 11 – Результат расчета зубьев ведущего колеса:

R_0 – радиус делительной окружности; $R_{ВП}$ – радиус окружности впадин; $R_{ВСП}$ – радиус вспомогательной окружности; $R_{Г}$ – радиус головок зубьев; $R_{К0}$ – радиус центральной дуги; $R_{П}$ – радиус профильной дуги окружности зуба

Проверка напряжений по методу конечных элементов показала $\sigma_{\max} \approx 104$ МПа при запасе прочности 2,65 по пределу текучести, а суммарные перемещения зубьев не превышают 0,18 мм.

В третьей главе описано проведение экспериментального исследования.

Представлена характеристика объекта исследования (рисунок 12), и представлено описание пуск-наладки (рисунок 13 и 14).



Рисунок 12 – Внешний вид съемного тягово-гусеничного модуля

а) – Трактор в сборе с ТГМ; б) – Внешний вид ТГМ



а)



б)

Рисунок 13 – Процесс сборки рамы заднего тягово-гусеничного модуля:

а) – Процесс сборки ступицы с рамой ТГМ; б) – Общий вид ТГМ

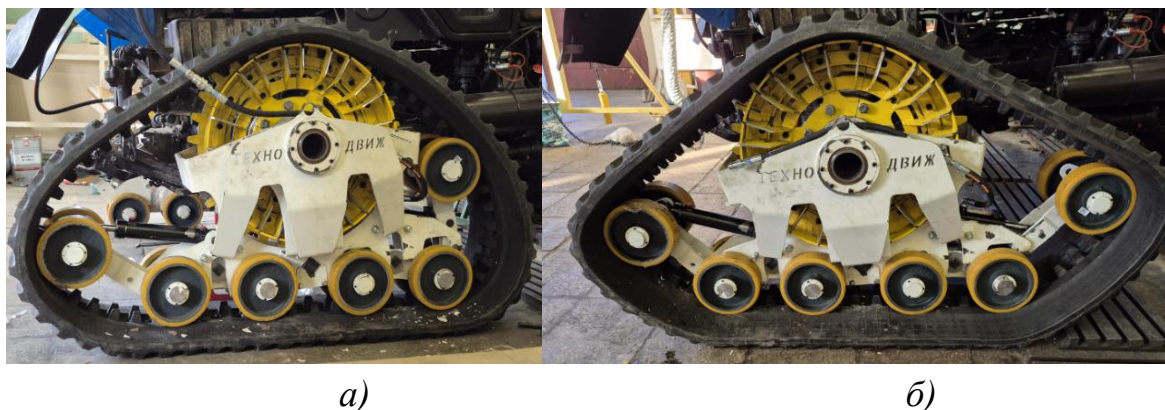


Рисунок 14 – Внешний вид свободного и натянутого состояния резиноармированной гусеницы:

а) – Свободное состояние; б) – Натянутое состояние

Для реализации полевых исследований была сформирована программа-методика функциональных испытаний, включающая оценку скоростных параметров машины, коэффициентов сцепления и буксования при различных условиях нагружения. Ключевым элементом экспериментального комплекса стала разработка специализированного аппаратно-программного комплекса для измерения скоростных характеристик трактора, позволяющего фиксировать параметры движения с точностью до $\pm 0,5$ км/ч.

Испытания проводились в лабораторных условиях РГАУ-МСХА с использованием штатного оборудования для регистрации нагрузок и на полевом участке с различными почвенными условиями. На этапе пуско-наладки была осуществлена регулировка натяжения гусеничных модулей, настройка механизма изменения площади контакта $A_{\text{конт}} = f(h_{\text{опоры}})$ и проверка совместимости узлов привода с трансмиссией базового трактора «Беларус-82.1».

Разработана методика профилирования зубьев ведущих колес под резиноармированную гусеницу, что обеспечило оптимальное зацепление и исключило боковой скос полотна при разворотах. Полученные результаты позволили установить, что применение ТГМ снижает удельное давление на почву с 120–140 кПа (колесная конфигурация) до 55–65 кПа, а глубина колеи сокращается с 18–22 см до 10–12 см, что соответствует требованиям ГОСТ Р 58655-2019.

В четвертой главе «Обработка и интерпретация результатов эксперимента» были представлены результаты лабораторных испытаний съемных тяговых гусеничных модулей на тракторе класса 1,4. Проведена оценка функциональной работоспособности разработанных модулей, включающая анализ кинематических параметров, проверку надежности конструкции и изучение динамических характеристик системы при различных режимах нагружения.

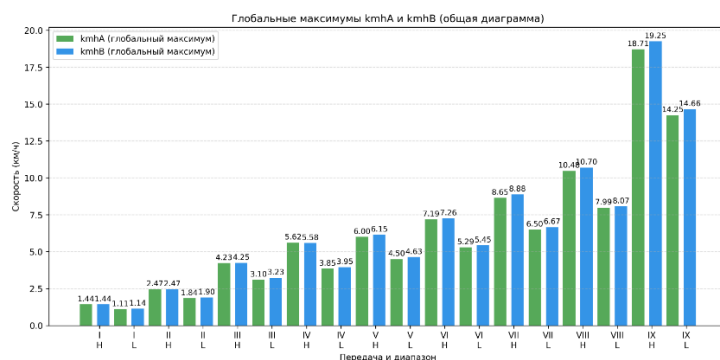


Рисунок 15 – Диаграмма скоростей движения трактора с установленными тяговыми гусеничными модулями на всех передачах

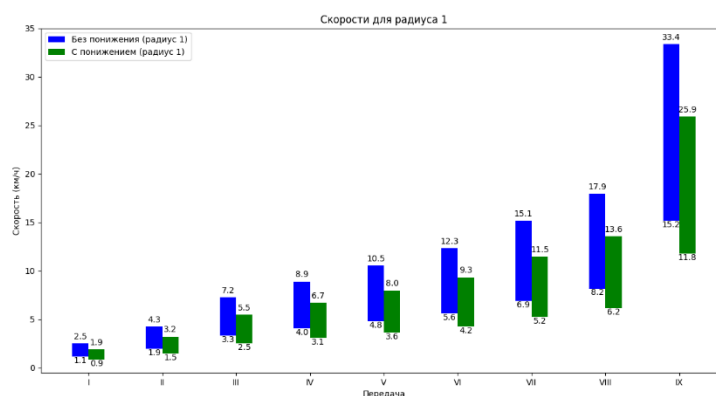


Рисунок 16 – Диаграмма теоретических скоростей движения трактора на штатных колесах

Результаты оценки тягово-сцепных свойств показали, что применение модулей позволяет увеличить коэффициент сцепления на 15–18% и сократить буксование до 6–8%.

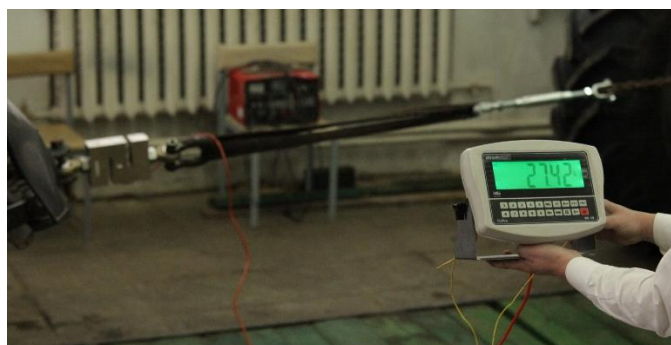


Рисунок 17 – Измерение тягового усилия колесного и колесно-гусеничного трактора

Таблица 1 – Замеренное предельное тяговое усилие трактора со штатными колесами

№ замера, п/п	Измеренная величина, кН (тс)
1	15,30 (1,559)
2	15,44 (1,574)
3	15,37 (1,567)
Среднее	15,37 (1,567)

Таблица 2 – Замеренное предельное тяговое усилие трактора с тяговыми гусеничными модулями

№ замера, п/п	Измеренная величина, кН (тс)
1	27,42 (2,795)
2	24,58 (2,505)
3	26,78 (2,729)
Среднее	26,26 (2,676)

Таблица 3 – Результат сравнения замеров внешних габаритных размеров трактора

Вид испытания	Значения, мм	
	Колесный движитель	Тяговые гусеничные модули
Габаритная длина трактора по внешним диаметрам колес / крайним перегибам ветвей гусениц	3779	3942
Габаритная длина трактора по крайней передней точке и крайней задней точки без учета заднего навесного устройства	3779	3942
Габаритная длина трактора по крайней передней точке и крайней задней точки с учетом заднего навесного устройства	3994	4001
Колея трактора по передним колесам / по средним линиям передних гусениц	1610	1754
Колея трактора по задним колесам / по средним линиям задних гусениц	1608	1968
Передний поперечный габарит по внешним границам передних колес / передних гусеничных модулей	1957	2044
Задний поперечный габарит по внешним границам задних колес / задних гусеничных модулей	2026	2418
Наибольший поперечный габарит по крайним точкам	2490	2490

Таблица 4 – Результат сравнения массовых показателей трактора

Тип движителя	Передний мост, кг		Задний мост, кг	
	Правая полуось	Левая полуось	Правая полуось	Левая полуось
Штатные колеса	595,33	652,74	1228,37	1271,52
Тяговые гусеничные модули	634,8	694,74	1693,40	1735,44

Таблица 5 – Результат сравнения расстояний до точек рычагов заднего навесного устройства

Тип движителя	Крайнее нижнее положение, мм	Крайнее верхнее положение, мм
Штатные колеса	78	875
Тяговые гусеничные модули	86	902

Таблица 6 – Результат сравнения показателей минимального радиуса поворота

Тип движителя	Минимальный радиус поворота по внутреннему следу	Минимальный радиус поворота по внешнему следу	Минимальный радиус поворота по центру масс
Штатные колеса	4,3	5,9	5,1
Тяговые гусеничные модули	6,8	8,6	7,8

Таблица 7 – Результат сравнения средних значения предельных тяговых усилий трактора со штатными колесами и с установленными тяговыми гусеничными модулями

Величина среднего значения предельного тягового усилия, кН (тс)		
Трактор со штатными колесами	Трактор с тяговыми гусеничными модулями	Прирост тягового усилия Δ
15,37 (1,567)	26,26 (2,676)	10,89 (1,109)

Полученные экспериментальные результаты подтвердили адекватность расчетных моделей, разработанных во второй главе, и продемонстрировали практическую возможность интеграции съемных тяговых гусеничных модулей в трансмиссию колесного трактора тягового класса 1,4 без конструктивных изменений базовой машины. Выводы по результатам испытаний позволили обосновать оптимальные параметры механизма регулирования площади пятна контакта и подтвердить перспективность разработанной конструкции для расширения функциональности сельскохозяйственной техники в условиях работы на переувлажненных и слабонесущих почвах.

В пятой главе подтверждается экономическая целесообразность разработанной конструкции тяговых гусеничных модулей (ТГМ) для тракторов класса 1,4. Проведенные стендовые и полевые испытания демонстрируют, что применение ТГМ обеспечивает стабильное снижение удельного давления на почву до 50–60 кПа, что соответствует требованиям ГОСТ Р 58655-2019 для техники, минимизирующей техногенное воздействие на пахотный слой.

Совокупные затраты на 1 га состоят из: ГСМ, ремонт/ТО, амортизация и издержки от потерь продукции.

Даже при равном расходе топлива перевод на гусеничный ход дает существенную экономию за счет сокращения потерь урожая в колее и уменьшения переуплотнения почвы. Для отечественного ТГМ совокупные затраты на 1 га снижаются с 4250 до 3180 руб., что формирует годовую экономию порядка 1,07 млн руб. на 1 000 га и обеспечивает окупаемость около 4 лет.

Таблица 8 – Статья затрат на эксплуатацию трактора с колесным и гусеничным двигателем за 1 га

Показатель	Колеса	ТГМ	Импорт
Топливо	1 400	1 400	1 400
Труд	400	300	300
Ремонт/ТО	0	50	50
Амортизация	0	450	450
Потери урожая	2 450	980	980
ВСЕГО, руб/га	4 250	3 180	3 180

Сравнительная экономическая эффективность (1 000 га/год)

Таблица 9 – Итоговые показатели

Показатель	ТГМ	Импорт
Годовая экономия, руб	1 070 000	1 070 000
Снижение себестоимости, %	25,2	25,2
Срок окупаемости, лет	4,2	4,2

На МТЗ-82.1 зафиксировано увеличение тяги с 1,4 до 2,7 тс и площади пятна контакта с 0,15 до 0,45 м², что объясняет уменьшение буксования и глубины колеи. В данном сценарии топливная составляющая не дифференцировалась, но даже без нее результат остается устойчиво положительным.

Таблица 10 – Справка по производителям и ориентировочным ценам (2023–2025 гг.)

Производитель/модель	Назначение	Диапазон (валюта)	Оценка, млн руб
Poluzzi Standard/ULTRON (пара)	Комбайн	80–150 тыс EUR	8,4–15,8
Poluzzi RX-9 (4 модуля)	Трактор	140–220 тыс EUR	14,7–23,1
SoucyTrack (пара)	Комбайн	70–150 тыс USD	7,0–15,0
SoucyTrack (4 модуля)	Трактор	100–180 тыс USD	10,0–18,0
Camso CTS HS (пара)	Комбайн	90–160 тыс USD	9,0–16,0
Mattracks Agri (4 модуля)	Трактор	45–100 тыс USD	4,5–10,0
Zuidberg GripTrac (4 модуля)	Трактор	60–120 тыс EUR	6,3–12,6
ATI Track Systems (пара)	Комбайн	120–200 тыс USD	12,0–20,0
Отечественный ТГМ (базовый)	Трактор	—	4,5

Проведенный технико-экономический анализ показывает, что установка отечественного тягового гусеничного модуля на серийный колесный трактор экономически целесообразна даже при неизменном удельном расходе топлива: переход на гусеницы увеличивает площадь пятна контакта, тем самым снижает удельное давление на почву и ее переуплотнение, сокращает потери урожая, а за счет гусеничного хода, который позволяет увеличить загрузку двигателя и

фактически переводит машину в более высокий тяговый класс, а срок окупаемости решения остается на уровне зарубежных аналогов, несмотря на то, что расчеты проведены для опытного образца, изготовленного в условиях подорожания металлопроката, вызванного текущей внешнеэкономической обстановкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача снижения уплотняющего воздействия колесного трактора класса 1,4 на почву при одновременном повышении его тягово-сцепных свойств за счет создания и обоснования параметров съемного тягово-гусеничного модуля (ТГМ) с регулируемой геометрией опорной ветви. Сформулированная цель – обеспечить управляемое изменение площади контакта движителя с опорной поверхностью при сохранении совместимости с базовым шасси – достигнута через последовательное выполнение комплекса расчетно-аналитических, конструкторских и экспериментальных этапов диссертации.

По итогам исследования было выполнено:

1) общая компоновочная и кинематическая схема ТГМ с механизмом изменения длины опорной ветви, что обеспечивает регулирование площади пятна контакта без разборки узлов и изменения натяжения гусеницы; реализован принцип управления тягово-сцепными свойствами через пятно контакта с опорной поверхностью в диапазоне изменения опорной ветви порядка 1–1,5 м;

2) расчетно-аналитическое обоснование параметров зацепления ведущего колеса с резиноармированной гусеницей, показана целесообразность диапазона начальных окружностей ведущих колес $D_{зад} = 834...932$ мм (для переднего модуля 525...587 мм) при согласовании кинематики зацепления и скоростного ряда трактора;

3) обоснованы параметры подвески ТГМ и конструкция опорных катков, реализована система микроподдрессирования и виброизоляции с балансирными каретками, обеспечивающая копирование микрорельефа и снижение пиковых нагрузок;

4) разработаны электронные модели элементов ходовой системы и силовая модель нагружения ТГМ; проведены расчеты НДС основных узлов и зацепления, подтверждающие требуемые запасы прочности;

5) прочностные расчеты несущих элементов и проведена их оптимизация по критериям прочности и технологичности, с подбором серийных материалов и проката, обеспечивающих требуемые механические свойства и экономичность изготовления;

б) подготовлена эскизная документация (узлы, спецификации, требования к сборке) и конструкторские решения для монтажа на тракторы класса 1,4, включая стабилизатор тангенциальной устойчивости и систему изменения площади пятна контакта;

7) обеспечено техническое сопровождение изготовления прототипов и отладка механизмов регулирования контактной площади, изготовлены и испытаны опытные образцы, подтвердившие работоспособность решений;

8) функциональные и тягово-скоростные испытания. Получены экспериментальные подтверждения снижения буксования, роста реализуемого тягового усилия и перехода базовой машины в более высокий фактический тяговый класс по ГОСТ 27021-86, для типового примера «Беларус 82.1» зафиксировано увеличение тяги с 1,4 до 2,7 тс при росте площади контакта с 0,15 до 0,45 м².

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Съемная гусеничная ходовая система ведущего моста сельскохозяйственного трактора класса 0,9 / О. Н. Дидманидзе, Р. С. Федоткин, В. А. Крючков, Н. И. Дегтярев // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 12. – С. 142-148. – DOI 10.28983/asj.y2023i12pp142-148.
2. Испытания съемной гусеничной ходовой системы сельскохозяйственного трактора класса 0,9 / О. Н. Дидманидзе, Р. С. Федоткин, В. А. Крючков [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 8. – С. 111-120. – DOI 10.28983/asj.y2025i8pp111-120.
3. Роботизированное транспортное средство с минимальным воздействием на окружающую среду / Р. С. Федоткин, Н. И. Дегтярев, К. С. Дмитриев, А. С. Овчаренко // Экология промышленного производства. – 2021. – № 4(116). – С. 59-63. – DOI 10.52190/2073-2589_2021_4_59.
4. Обзор современных роботизированных средств для обеспечения экологической безопасности среды, представленных на форуме АРМИЯ 2021 (Обзор) / В. А. Крючков, Н. И. Дегтярев, А. С. Овчаренко, К. С. Дмитриев // Экология промышленного производства. – 2021. – № 4(116). – С. 64-67. – DOI 10.52190/2073-2589_2021_4_64.

Статьи в изданиях, входящих в Scopus

1. Operational tests of a small-sized farm multi-purpose vehicle / O. Didmanidze, R. Fedotkin, V. Kryuchkov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 583. – P. 08023. – DOI 10.1051/e3sconf/202458308023.

Патент на изобретение

1. Патент № 2835909 С1 Российская Федерация, МПК В62D 55/08, В62D 55/084, В62D 55/104. Тяговый гусеничный модуль с изменяемой площадью контакта для колесного трактора : заявл. 16.11.2023 : опубл. 05.03.2025 / О. Н. Дидманидзе, Р. С. Федоткин, В. А. Крючков, Н. И. Дегтярев ; заявитель ООО "Технологии внедорожного движения".

Прочие издания

1. Стабилизатор тангенциальной устойчивости для тракторов тягового класса 1,4 / О. Н. Дидманидзе, Р. С. Федоткин, В. А. Крючков [и др.] // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей научно-практической конференции, посвященный 90-летию Шарова Николая Михайловича, Москва, 23–24 октября 2024 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 13-20.
2. Оценка возможности применения гибких филамеров для изготовления упруго-демпфирующих элементов системы поддрессоривания и виброизоляции сельскохозяйственной техники / Р. С. Федоткин, В. А. Крючков, Д. М. Дудин, Н. И. Дегтярев // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2025. – № 2. – С. 25-30. – DOI 10.33920/sel-10-2502-04.
3. Исследование причин и способов снижения буксования колес трактора / Р. С. Федоткин, В. А. Крючков, Д. М. Дудин, Н. И. Дегтярев // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2025. – № 1. – С. 12-17. – DOI 10.33920/sel-10-2501-02.
4. Обзор конструкций стабилизаторов тангенциальной устойчивости ТГМ сельскохозяйственных тракторов / Р. С. Федоткин, В. А. Крючков, А. А. Федоткина [и др.] // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 362-372.
5. Особенности воздействия на почву колесным двигателем сельскохозяйственных тракторов / О. Н. Дидманидзе, Р. С. Федоткин, В. А. Крючков [и др.] // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 348-354.
6. Применение системы автоматической подкачки и регулирования давления шин на тракторах сельскохозяйственного назначения / Р. С. Федоткин, Е. В. Титова, Д. В. Анашин [и др.] // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 315-321.