

На правах рукописи

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

Москва – 2026

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 «Российский государственный аграрный университет – 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 16 апреля 2026 года в 10:00 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](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 35.2.030.03

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. Чрезмерное давление движителей самоходной техники на почву приводит к нарушению агробиологических и репродуктивных свойств почвы, ухудшению воздухо- и водопроницаемости, и замедлению биологических процессов. Многократные проходы техники приводят к формированию плотных структур, препятствующих развитию корневых систем. При этом современная тракторная техника зачастую не соответствует нормативным требованиям давления на почву по ГОСТ Р 58655-2019.

Сравнительный анализ ходовых систем показывает преимущество гусеничных тракторов: большая опорная поверхность обеспечивает более высокие тягово-сцепные свойства при равномерном распределении давления от веса машины по опорной поверхности и минимальном уплотняющем воздействии на почву. Однако высокая стоимость гусеничных машин ограничивает их применение энергоемкими операциями на тяжелых и переувлажненных почвах. Кроме того, их выезд на дороги общего пользования, даже на резиноармированных гусеницах, ограничен. Колесные тракторы, в свою очередь, неэффективны на переувлажненных или слабонесущих почвах, особенно в ранневесенний период.

Перспективным направлением повышения тягово-сцепных свойств колесной техники и снижения ее уплотняющего воздействия на почву является применение съемных гусеничных ходовых систем – тяговых гусеничных модулей (ТГМ). Они монтируются на серийные колесные тракторы без внесения изменений в конструкцию машины, позволяя адаптировать ее к почвенно-климатическим условиям. Применение ТГМ снижает удельное давление на почву до 60 кПа и ниже, повышает тяговый класс и минимизирует буксование. Таким образом обеспечивается возможность повышения производительности сельскохозяйственных операций и сохранения плодородия почв.

Актуальность внедрения подобных решений подтверждается анализом состояния тракторного парка России. По данным Минсельхоза общий дефицит техники по всем тяговым классам превышает 223,5 тыс. единиц, при этом значительная часть эксплуатируемых машин устарела. Одновременно фиксируется избыток тракторов класса 1,4 (139,2 тыс. единиц), тогда как потребность в машинах класса 2,0 оценивается в 18,5 тыс. единиц. Переоборудование тракторов класса

1,4 в технику переменного тягового класса 1,4-2,0 с использованием ТГМ могло бы снизить дисбаланс без дополнительных затрат на производство новых машин. Это особенно значимо в условиях ограниченного финансирования сельхозпредприятий и санкционных ограничений на импорт дорогостоящих зарубежных аналогов. Зарубежные съемные системы (Mattracks, Soucy Track, Camso Track и пр.) недоступны в продаже либо экономически нецелесообразны.

Таким образом, создание ТГМ 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. Анализ способов и технических средств снижения уплотняющего воздействия тракторной техники на почву.
2. Обоснование целесообразности создания тяговых гусеничных модулей для трактора тягового класса 1,4.
3. Разработка конструкции опытного образца тяговых гусеничных модулей для трактора класса 1,4: общей компоновки с учетом реальных режимов работы трактора; комбинированного гусеничного зацепления с резиноармированной гусеницей, систем микроподдрессоривания, натяжения и регулирования площади контакта гусениц с опорной поверхностью, стабилизаторов тангенциальной устойчивости гусеничных модулей.
4. Испытания опытного образца тяговых гусеничных модулей в составе образца трактора класса 1,4 по оценке функциональных качеств.
5. Оценка функциональных качеств опытного образца тяговых гусеничных модулей по результатам испытаний.
6. Оценка экономической эффективности разработанных технических решений.

Для создания опытного образца ТГМ необходимо в том числе подобрать комплектующие, исходя из их доступности на внутреннем рынке, их устойчивость к коррозии и износу, а также соответствия требованиям по массово-габаритным и прочностным параметрам. После изготовления опытных образцов проводятся лабораторные испытания, направленные на оценку их совместимости с трактором, проверку работоспособности в условиях реальных нагрузок и анализ влияния модулей на тяговые характеристики машины. Результаты испытаний позволят осуществить доработку и доводку конструкции для перехода к расширенным эксплуатационным испытаниям.

Внедрение подобных систем в производство способно решить ряд стратегических задач: повысить годовую загрузку техники за счет расширения ее функциональности, сократить сроки 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 ТГМ станет экономически эффективной альтернативой покупке новой техники, что особенно актуально в условиях ограниченных бюджетов сельхозпроизводителей и необходимости импортозамещения.

#### **Научная новизна работы**

1. Обоснованные конструкторско-технологические параметры и режимы работы ТГМ для тракторов тягового класса 1,4.
2. Новая конструкция ходовой системы и принцип управления тягово-сцепными свойствами трактора за счет механизма регулирования площади контакта гусениц с опорной поверхностью.
3. Результаты экспериментальных исследований функциональных свойств трактора класса 1,4 с ТГМ.
4. Аппаратно-программный комплекс для измерения скоростных свойств трактора, а также результаты экспериментальной оценки скоростных свойств трактора с применением данного программно-аппаратного комплекса.

#### **Практическая значимость**

Применение ТГМ на серийном колесном тракторе позволяет обеспечить:

1. Переменный тяговый класс 1,4-2,0 по сцеплению, что позволяет повысить его тягово-сцепные свойства и навесоспособность, обеспечить агрегатируемость с широким шлейфом сельскохозяйственных машин и орудий.
2. Снижение удельного давления на почву до 50-60 кПа, что удовлетворяет современным нормативам воздействия движителей на почву даже при ее наибольшей влажности в весенний период в слое 0-30 см, когда наименьшая влагоемкость превышает 0,9 НВ (по ГОСТ Р 58655-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву»). Это позволяет обеспечить возможность работы трактора в любых почвенно-климатических условиях.

3. Полную годовую загрузку трактора и его более ранний выход на полевые работы.

4. В целом повышение урожайности сельскохозяйственных культур за счет снижения и более равномерного распределения давления на почву, растительный покров и корневую систему растений, снижения буксования и исключения срыва плодородного слоя почвы.

**Объект исследования:** процесс взаимодействия ходовой системы трактора с почвой, тяговая динамика трактора.

**Предмет исследования:** конструкторско-технологические параметры и режимы работы тяговых гусеничных модулей для колёсного сельскохозяйственного трактора.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Конструкторско-технологические параметры тяговых гусеничных модулей для тракторов тягового класса 1,4.

2. Конструкция ТГМ с изменяемой площадью контакта гусениц с опорной поверхностью.

3. Результаты экспериментальных исследований функциональных свойств трактора класса 1,4 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 в рамках международного постоянно действующего научно-практического семинара «ЧТЕНИЯ АКАДЕМИКА В.Н. БОЛТИНСКОГО», г. Москва, 2021-2026 г., а также выступления в 3-х на этапах Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди аспирантов и молодых ученых аграрных образовательных и научных организаций России, 2025 г.

Работа выполнялась в рамках НИОКР по гранту Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по программе «Старт-1» на тему: «Разработка и испытания опытных образцов тяговых гусеничных модулей для сельскохозяйственного трактора класса 1,4.» (Проект № 78275, заявка №С1-201938, Договор № 4683ГС1/78275), по итогам которой разработан и испытан опытный образец тяговых гусеничных модулей для трактора класса 1,4.

Доработка опытного образца проведена в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», реализуемой в ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Результаты разработки ТГМ демонстрировались на Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» 2023-2025 гг.

### **Публикации.**

Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных трудах, в том числе в 2 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, в 1 статье в издании, индексируемом в БД Scopus, в 1 патенте на изобретение и 1 коллективной монографии.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 104 наименования, в том числе 28 на иностранном языке и приложения на 13 страницах. Объем диссертации – 152 страниц машинописного текста. Диссертационная работа проиллюстрирована 60 рисунками и поясняется 26 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 способов и технических средств снижения уплотняющего воздействия движителей сельскохозяйственной техники на почву. Рассмотрены различные технические решения, включая применение шин с регулируемым давлением воздуха, широкопрофильных шин, спаренных колес, строенных колес и гусеничных модулей.

В результате анализа было определено, что применение ТГМ с резиноармированной гусеницей на колесной тракторной технике обеспечивают значительное снижение удельного давления на почву по сравнению с колесными движителями. Проанализирован мировой опыт применения гусеничных модулей выявлены их преимущества и недостатки.

Проведен патентный поиск, показавший наличие различных конструктивных решений гусеничных модулей, но отсутствие адаптированных вариантов для конкретных условий эксплуатации. На основании проведенного анализа сформулированы задачи исследований, направленные на обоснование параметров и режимов работы ТГМ для колесного сельскохозяйственного трактора класса 1,4.

**Во второй главе** «Расчётно-аналитическое обоснование параметров и режимов работы ТГМ для колесного трактора тягового класса 1,4» проведена разработка конструкции опытного образца ТГМ для трактора класса 1,4: общей компоновки с учетом реальных режимов работы трактора; комбинированного гусеничного зацепления с резиноармированной гусеницей, систем микроподдрессирования, натяжения и регулирования площади контакта гусениц с опорной поверхностью, стабилизаторов тангенциальной устойчивости ТГМ.

Проведено 3D-сканирование ходовой и несущей системы базового трактора Беларус 82.1 для получения форм и размеров сопрягаемых поверхностей фланцев ведущих мостов. Выполнены расчеты площади контакта ТГМ с почвой для различных значений давления (0,04 и 0,06 МПа) и длины опорной поверхности (рисунок 1). Установлено, что при ширине гусеницы 300 мм и давлении 0,04 МПа площадь контакта составляет 547,73 см<sup>2</sup>, а при ширине гусеницы 420 мм., и с длиной до 1500 мм – 409,39 см<sup>2</sup>.

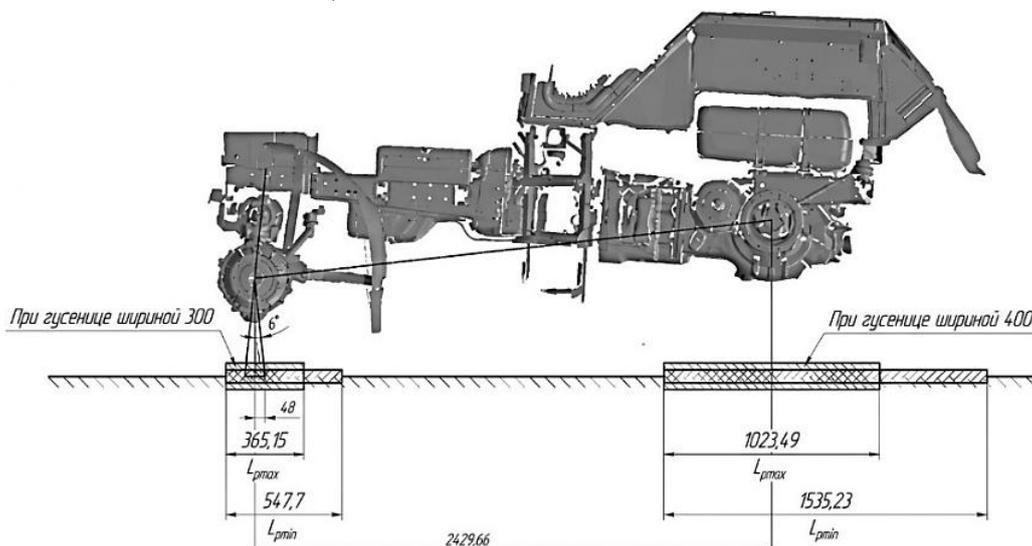


Рисунок 1 – Схема расположения пятен контакта колес и ТГМ

Разработаны электронные модели ТГМ в САД-системе (рисунок 2 и 3) для изготовления деталей, подбора комплектующих и анализа напряженно-деформированного состояния элементов ТГМ.



Рисунок 2 – ТГМ передней оси трактора:

*а* – вид спереди; *б* – вид сзади на ограничитель поворота



Рисунок 3 – ТГМ задней оси трактора:

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

Проведена графическая оценка изменения кинематических параметров базового трактора при установке ТГМ. Установлено, что уменьшение расчетного диаметра ведущего колеса сопровождается снижением линейной скорости, поэтому при его проектировании следует выбирать максимально допустимый диаметр с учетом компоновочных ограничений. На переднем и заднем модулях применены цевочные звездочки с барабанами подпора траков, обеспечивающие комбинированное фрикционно-цевочное зацепление.

По результатам измерений фактически статические радиусы составили: переднего колеса  $r_c = 450$  мм, заднего колеса  $R_c = 715$  мм. Реальное кинематическое соотношение равно  $R_c/r_c = 715/450 = 1,589$ , тогда как паспортное теоретическое значение по справочным радиусам  $0,738/0,453$  составляет  $1,629$ . На основе полученных данных выполнен пересчет диаметра начальной окружности ведущего колеса ТГМ для обеспечения требуемых эксплуатационных скоростей: базовый вариант  $D_0 \approx 834$  мм (рисунок 4) и уточненный вариант  $D_{0к} \approx 932$  мм (рисунок 5), предложенный для более равномерного перекрытия диапазона скоростей. В итоге рекомендуемый интервал выбора диаметра начальной окружности ведущего колеса принят  $834 \dots 932$  мм.

Назначение  $D_0$  выполнялось из условия сохранения скоростных характеристик: при базовом радиусе штатного колеса  $715$  мм и  $D_0 = 834$  мм скорость трактора на высшей передаче становится менее  $20$  км/ч. Для исключения провала скоростей в пахотном диапазоне  $9-12$  км/ч рекомендовано увеличение диаметра до  $932$  мм, что позволяет передачам VII–IX обеспечить режимы пахоты, культивации и транспортных работ без изменения коробки передач. Окончательное значение диаметра целесообразно выбирать в пределах  $834-932$  мм с учетом компоновки и конструктивных ограничений.



Рисунок 4 – Теоретические скорости движения при диаметре ведущего колеса 834 мм

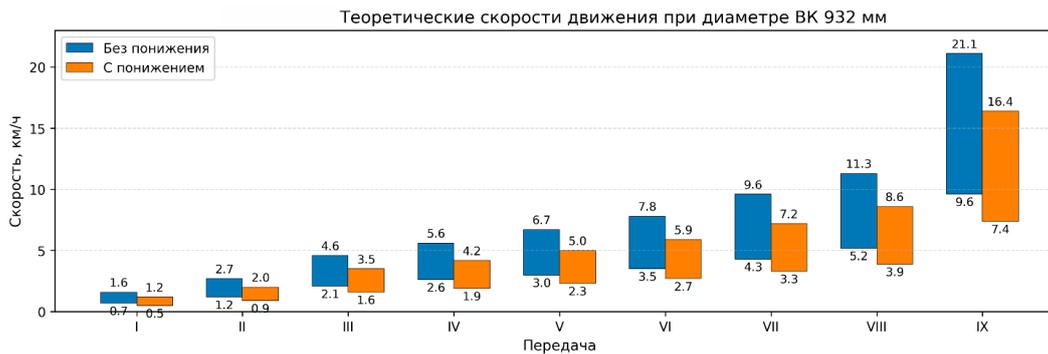


Рисунок 5 – Теоретические скорости движения при диаметре ведущего колеса 932 мм

На основе ранее разработанной методики предложена программа автоматизированного профилирования зубьев ведущих колес под резиноармированные гусеницы любого типоразмера: рассчитываются радиусы делительной окружности, впадин и вершин, строится базовый профиль зуба, экспортируемый в DXF формат (рисунок 6).

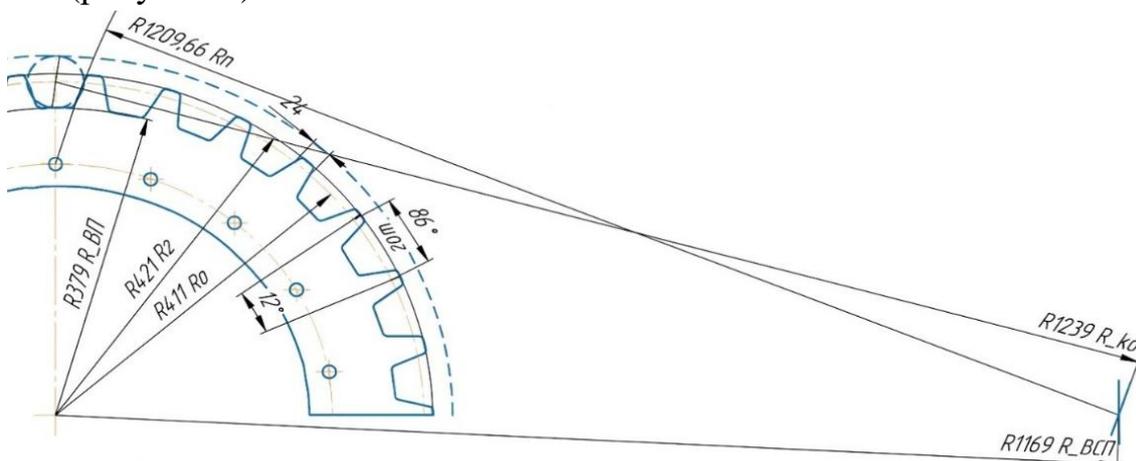


Рисунок 6 – Результат расчета зубьев ведущего колеса:

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

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

ного модуля (рисунок 7 и 8). 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.

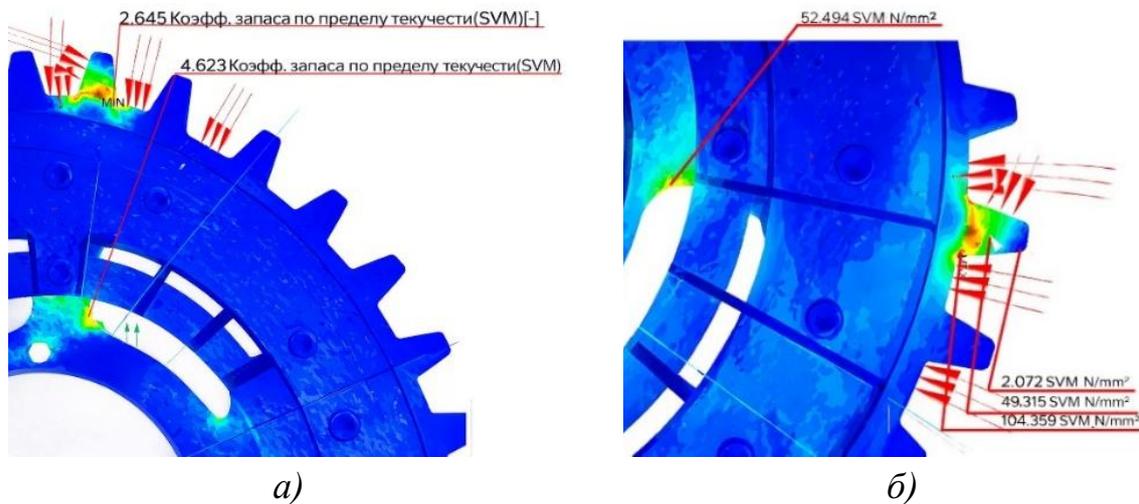


Рисунок 7 – Исследование напряженно-деформированного состояния зубьев ведущих колес:

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

Разработана системы подрессоривания опорных катков и балансирных кареток (рисунок 8).

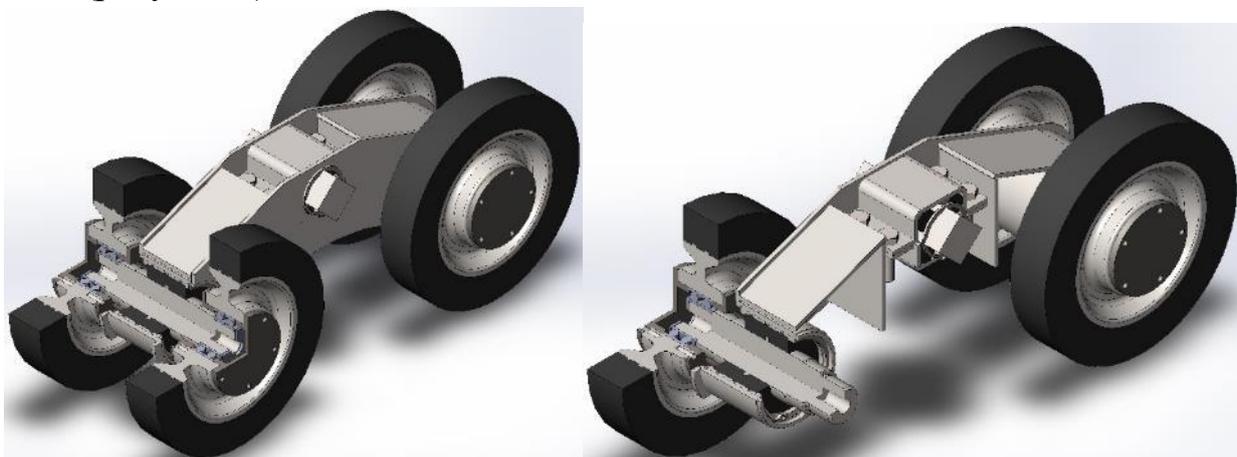


Рисунок 8 – Система подрессоривания опорных катков и балансирных кареток ТГМ

Данные конструктивные решения позволили реализовать систему микроподрессоривания и виброизоляции для смягчения и поглощения высокочастотных вибраций при движении трактора по неровностям пути. Кроме того, достигается эффект приспособления ТГМ под рельеф местности за счет податливости упругих элементов осей катков и возможности независимого перемещения каждого ролика.

Проведен напряженно-деформированного состояния расчет балансира, как основного элемента конструкции балансирных кареток, воспринимающим статические и динамические нагрузки, является балансир (рисунок 9). Запас прочности балансира обеспечен на уровне 2,03 минимум. А перемещения – менее 1 мм.

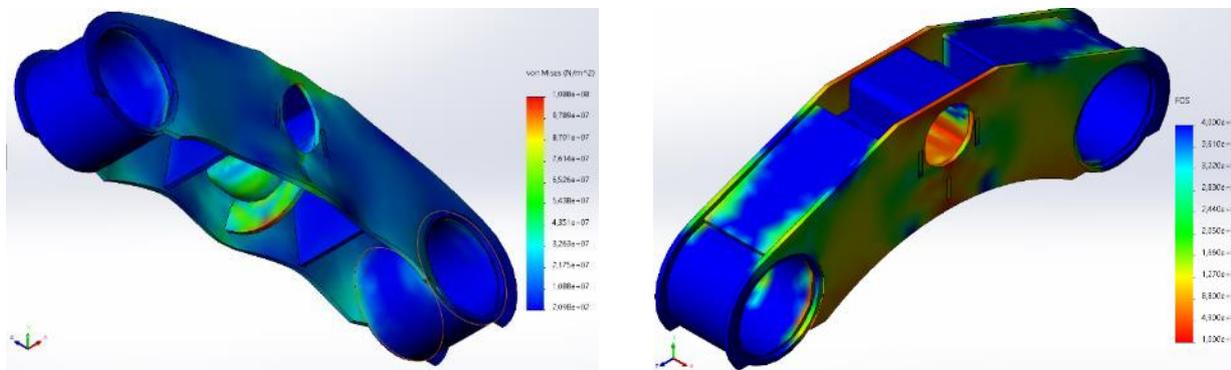


Рисунок 9 – Исследование напряженно-деформированного состояния балансира; эпюра напряжений и запаса прочности

Разработана система натяжения гусениц и изменения площади контакта гусениц с опорной поверхностью. Принцип работы представлен на рисунке 10. Это регулирующие устройства, воздействующие на передний и задний кривошипы и катки соответственно. В каждом из них в простом случае может использоваться винтовая пара, гидроцилиндр или электромеханический цилиндр в качестве исполнительного механизма. В разработанном ТГМ применены компактные гидроцилиндры двухстороннего действия, поскольку они обеспечивают плавное управление и могут быть легко интегрированы в существующую гидросистему трактора. Гидроцилиндр механизма изменения площади контакта крепится к раме и заднему кривошипу. Его задача – опускать или поднимать крайние опорные катки для изменения геометрии гусеничного обвода и площади контакта гусеницы с опорной поверхностью.



Рисунок 10 – Принцип регулирования площади контакта гусениц ТГМ с опорной поверхностью

Несущая система ТГМ увязывает в себе все элементы гусеничного обвода: ступицу ведущего колеса и раму опорных катков в сборе с балансирными каретками. Расчет напряженно-деформированного состояния несущей системы ТГМ, а также ступицы ведущего колеса представлен на рисунке 11.

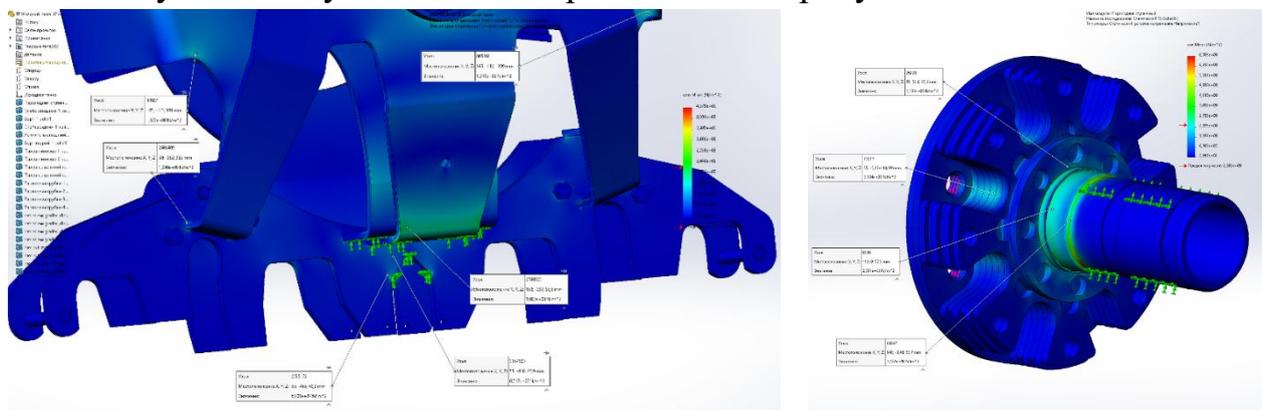


Рисунок 11 – Исследование напряженно-деформированного состояния рамы и ступичного адаптера заднего ТГМ под нагрузкой 2660 кг

Минимальный запас прочности несущей системы в зоне концентрации максимальных напряжений составляет 1,2, что гарантирует работоспособность конструкции при наибольшей действующей нагрузке.

Для исключения переворота ТГМ вокруг оси ведущих колес разработана конструкция стабилизатора тангенциальной устойчивости (ограничителя переворота) для соединения рамы опорных катков с элементами несущей системы трактора (рисунок 12). Проведен расчет напряженно-деформированного состояния ограничителя переворота ТГМ при действии тягового усилия трактора (рисунок 13).

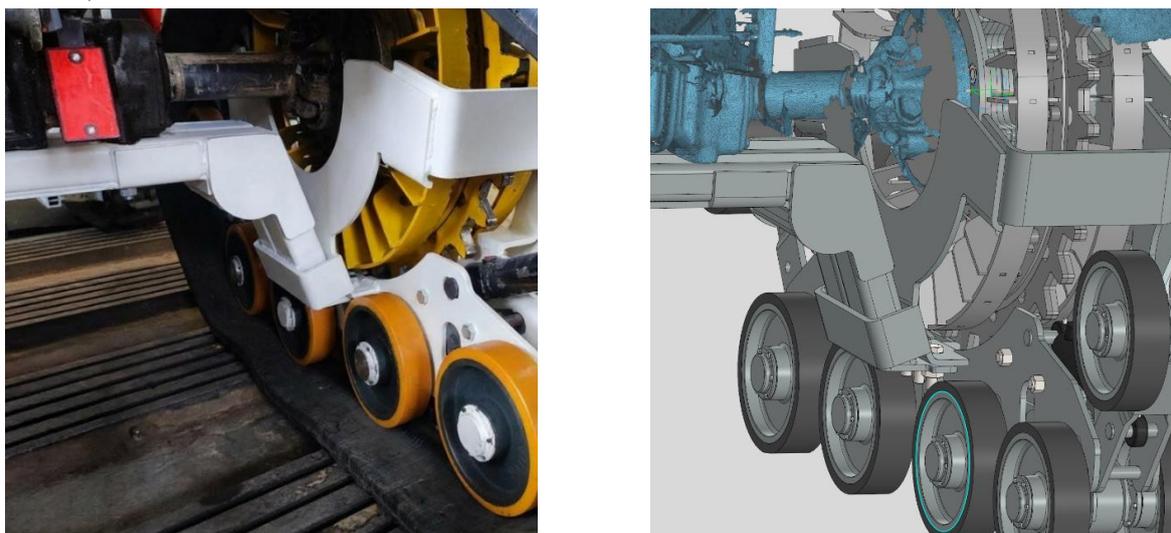


Рисунок 12 – ТГМ в сборе с ограничителем переворота на тракторе

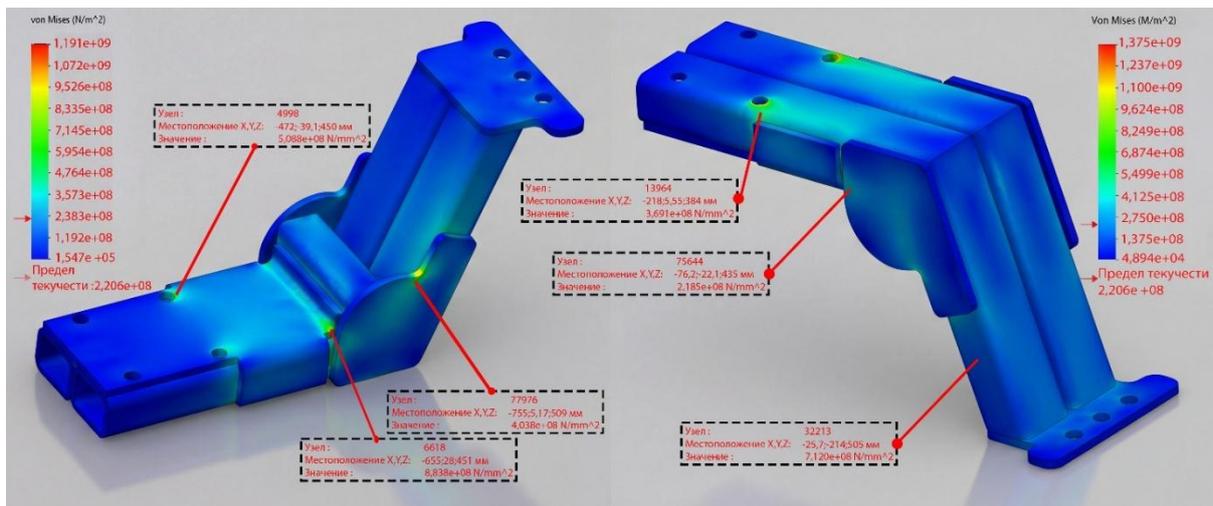


Рисунок 13 – Исследование напряженно-деформированного состояния заднего ограничителя переворота

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

Проведенные расчетно-теоретические исследования, включая оценку напряженно-деформированного состояния, конструкция ТГМ обеспечивает надежность ходовой системы при действующих нагрузках от трактора и машинно-тракторного агрегата; может быть установлена вместо колес трактора на штатные ступицы колес, а также их демонтаж и обратную замену на колеса с применением стандартного инструмента и оборудования; обеспечивает возможность передвижения трактора в порожнем режиме или в агрегате с технологическими машинами и оборудованием.

Таким образом проведено обоснование параметров и режимов работы ТГМ для колесного сельскохозяйственного трактора класса 1,4, а именно:

1. Обоснована компоновка ТГМ: определены пространственные ограничения для установки ТГМ в подкрыльное пространство трактора посредством оптической оцифровки крыльевых ниш и бортовых редукторов; проведена увязка гусеничного обвода и узлов ТГМ в ходовую систему трактора без изменений его конструкции; определены параметры опорной ветви гусениц и пределы их изменения.
2. Определены режимы нагружения и выбрана расчетная схема действующих сил на ТГМ.
3. Выполнена CAD/CAE-верификация узлов ходовой системы: для балансира получены  $\sigma_{max} \approx 109$  МПа при запасе прочности  $\sim 2,03$  и перемещениях  $< 1$  мм; для сборочной единицы каретки с катками при эквивалентной нагрузке  $\sim 20$  кН на сторону оси –  $\sigma_{max} \approx 312$  МПа и перемещение  $\sim 0,37$  мм. Результаты подтверждают несущую способность принятых сечений и кинематику качания кареток.

4. Обоснованы параметры ведущих колес ТГМ (профиль зубьев, поверхность контакта с резиноармированной гусеницей), несущей системы ТГМ и рамы катков, стабилизатора тангенциальной устойчивости, воспринимающий реактивный момент и удерживающий ТГМ в устойчивом положении при наезде на препятствия и в тяговых режимах; системы микроподдрессоривания опорных катков; системы натяжения гусениц и регулировки площади контакта гусениц с опорной поверхностью.
5. Выполнен подбор материалов и комплектующих для изготовления опытных образцов ТГМ.

**В третьей главе** «Экспериментальные исследования» представлена подготовка и проведение испытаний опытного образца тяговых гусеничных модулей в составе образца трактора класса 1,4 по оценке функциональных качеств. Лабораторный этап был направлен на подготовку трактора к полевым испытаниям. Работы выполнялись на базе «Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева». В качестве помещения для лабораторных исследований использовалась мастерская, где выполнялись монтаж ТГМ на трактор, измерение массогабаритных параметров, подготовка приборной базы и приспособлений. По результатам лабораторных работ были получены исходные данные и подтверждена готовность трактора к экспериментальным заездам.

Монтаж ТГМ выполнялся на ровной площадке: трактор установили и зафиксировали стояночным тормозом, заднюю часть приподняли краном (талью), зафиксировали на подпорах и разгрузили колёса, после чего штатные задние колёса демонтировали со ступиц ведущих редукторов.

До установки модулей выполнили их стендовую сборку и проверку: собрали оси и подшипниковые узлы опорных катков, заложили смазку, проверили соосность и плавность вращения, установили стопорные и упругие элементы, убедились в отсутствии закусываний по всему диапазону качания (рисунок 14). А также установили ступичный адаптер в раму ТГМ (рисунок 15).



Рисунок 14 – Процесс сборки кареток и балансира ТГМ



а)



б)

Рисунок 15 – Процесс сборки рамы заднего тягово-гусеничного модуля:

а) – сборка ступицы с рамой ТГМ; б) – сборка ТГМ

После снятия колёс модули установили на трактор с помощью гидравлического крана; массу каждого модуля контролировали крановыми весами перед монтажом. Совмещение выполняли через ступичный адаптер: фланец звёздочки совпадал с посадочным местом. ТГМ, установленный на задней оси трактора представлен на рисунке 16.

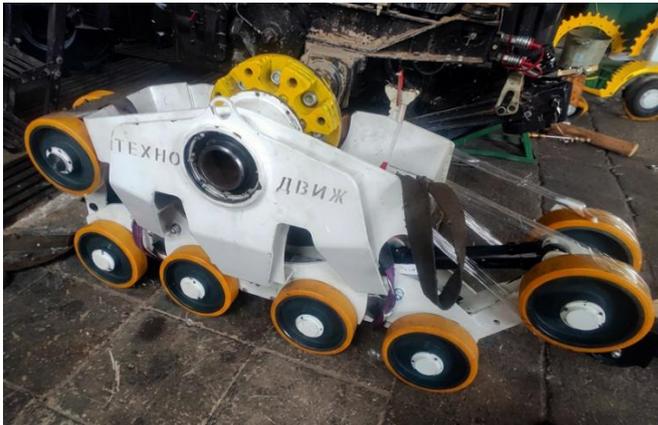


Рисунок 16 – ТГМ, установленный на задней оси трактора без гусеницы

Далее закрепили и отрегулировали ограничитель переворота – рычаг от рамы модуля к корпусу заднего моста.

После механической установки провели пусконаладку: подключили гидроцилиндры к штатной гидросистеме и задали натяжение гусениц. Одновременно проверили работу подвески катков подъёмом и опусканием трактора, убедившись в свободном ходе и отсутствии заклинивания (рисунок 17).

Для реализации полевых исследований была сформирована программа-методика функциональных испытаний, включающая оценку скоростных параметров машины. 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.



а)



б)

Рисунок 17 – ТГМ

а) – в сборе на тракторе; б) – внешний вид ТГМ

Методика предусматривала выполнение заездов на специально подготовленной площадке. Площадка располагалась на ровном участке асфальтированного покрытия без рытвин и выступов более 20 мм и с уклоном не более 1%. Для проверки маневренности обеспечивалась возможность кругового движения с радиусом не менее 6 м; периметр площадки составлял 70,2 м, что соответствует квадрату со стороной 17,5 м и достаточно для полного разворота. Испытания на подвижность и измерение скорости проводились на прямолинейном участке длиной 120 м при ширине не менее 4 м. На участке наносились контрольные отметки: 0 м – положение проекции центра переднего колеса перед стартом, 20 м – начало измерений, 120 м – окончание измерений и точка начала торможения.

Проверка ходовых возможностей на малых скоростях выполнялась пробными движениями трактора с установленными ТГМ вперёд и назад на первой передаче по ровному асфальту с оценкой трогания, прямолинейности и плавности хода. Минимальный радиус поворота определяли при движении по кругу на второй передаче с полностью вывернутым рулевым колесом (вправо и влево); по отпечатку гусениц и с помощью рулетки измеряли диаметр окружности и рассчитывали радиус. Диапазон реальных поступательных скоростей устанавливался серией заездов по участку с отметками 0–20–120 м: трактор разгоняли до устойчивого режима, скорость определяли на участке 20–120 м; для каждой передачи выполняли не менее трёх повторов и в итоге заносили среднее значение и разброс. Сравнительную оценку тягового усилия колёсной и гусеничной конфигураций проводили электронным динамометром растяжения (предел 100 кН), подключая трактор к нагрузке через прицепную скобу заднего навесного устройства – определяли предельное тяговое усилие до начала буксования.

**В четвертой главе «Обработка и интерпретация результатов экспериментов»** представлена оценка функциональных качеств опытного образца ТГМ по результатам испытаний трактора.

В качестве базовой машины использовался трактор «Беларус-82.1». Выполнена оценка функциональной работоспособности, включающая проверку ходовых качеств (скоростные параметры), а также оценку тягово-сцепных свойств и сопоставление эксплуатационных показателей с колесным вариантом.

Реальные поступательные скорости трактора с ТГМ при частоте вращения двигателя  $2200 \text{ мин}^{-1}$  приведены на рисунке 18. Для сравнения теоретические скорости на штатных колесах приведены на рисунке 19. По результатам испытаний отмечено, что установка ТГМ снижает скорости на всех передачах примерно на 42-43% относительно колес. Рабочий диапазон сохраняется, но смещается вниз: для колес около 4–9 км/ч (III/L–VI/H), для гусениц около 3–8,6 км/ч (III/H–VII/H). В транспортных режимах максимальная скорость также падает примерно на 42,3–44% (IX передача ~33,4 км/ч до ~19,25 км/ч).

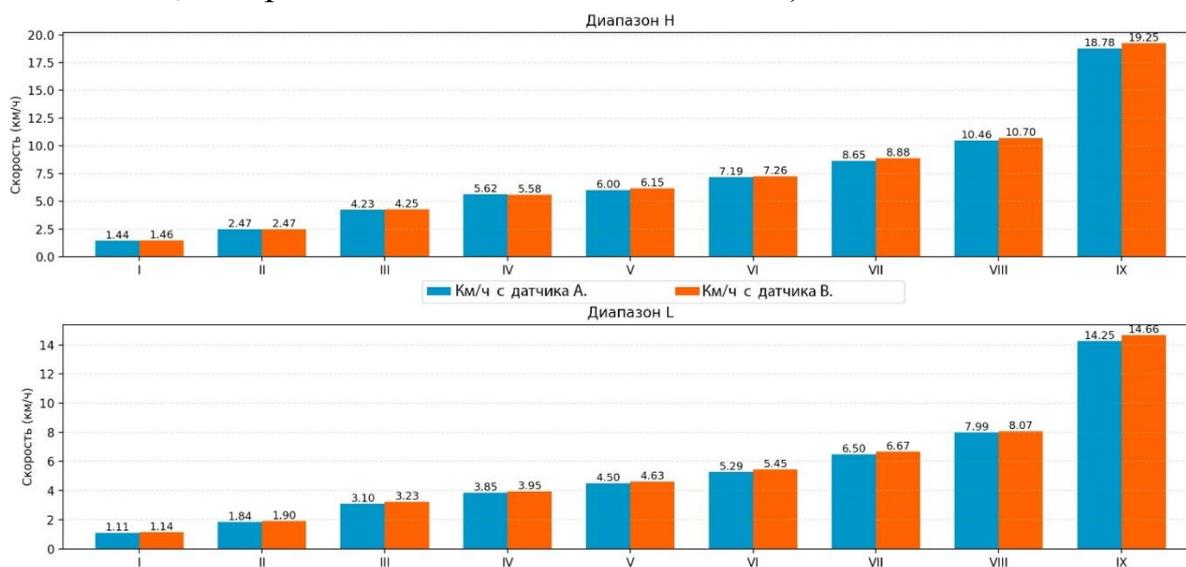


Рисунок 18 – Диаграмма скоростей движения трактора с установленными тяговыми гусеничными модулями на всех передачах

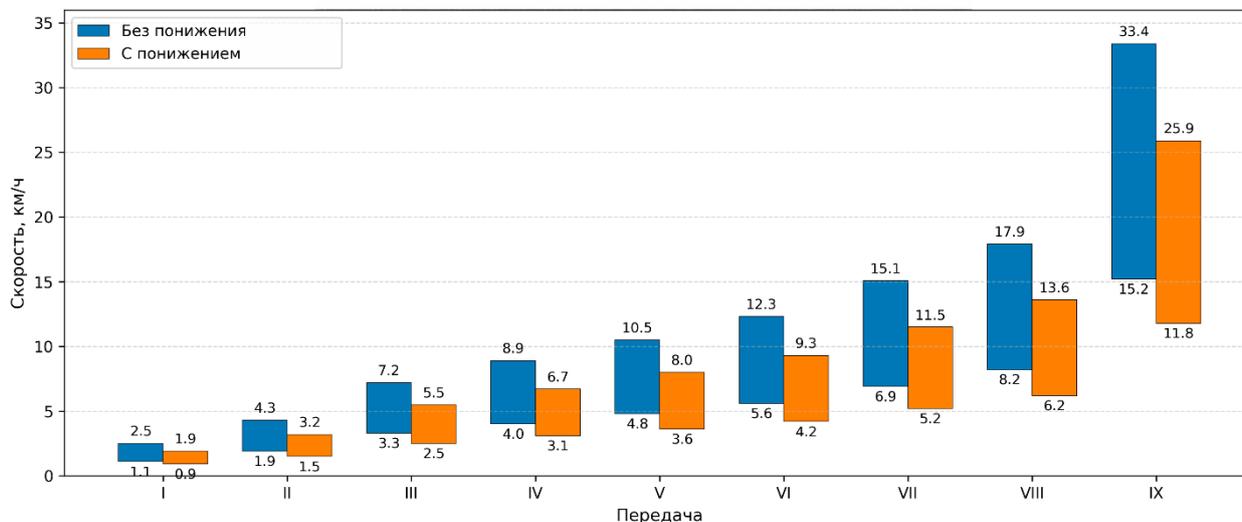


Рисунок 19 – Диаграмма скоростей движения трактора на штатных колесах на всех передачах

Для оценки тягово-сцепных свойств в качестве стоповой нагрузки использовался трактор более высокого тягового класса Terrior АТМ 4200. Проведено по три замера предельного тягового усилия для колесного варианта (рисунок 20, таблица 1) и для трактора с установленными ТГМ (рисунок 20, таблица. 2). Среднее предельное тяговое усилие возросло с 15,37 кН (1,567 тс) до 26,26 кН (2,676 тс), прирост составил 10,89 кН (1,109 тс).



Рисунок 20 – Измерение тягового усилия колесного и колесно-гусеничного трактора

Таблица 1 – Замеренное предельное тяговое усилие трактора со штатными колесами и с установленными ТГМ

№ замера, п/п	Измеренная величина, кН (тс)	Измеренная величина с ТГМ, кН (тс)
1	15,30 (1,559)	27,42 (2,795)
2	15,44 (1,574)	24,58 (2,505)
3	15,37 (1,567)	26,78 (2,729)
Среднее	15,37 (1,567)	26,26 (2,676)

Таблица 2 – Результат сравнения средних значений предельных тяговых усилий трактора со штатными колесами и с ТГМ

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)

Таблица 3 – Сравнение замеров изменения габаритных размеров трактора

Вид испытания	Значения, мм	
	Колесный движитель	ТГМ
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

Вид испытания	Значения, мм	
	Колесный движитель	ТГМ
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
ТГМ	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
ТГМ	86	902

Таблица 6 – Результат сравнения минимальных радиусов 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
ТГМ	6,8	8,6	7,8

При оснащении трактора ТГМ отмечены технологические сложности (в т.ч. сборка подшипниковых узлов из-за необходимости запрессовки осей в неподготовленных условиях; необходимость установки гусеницы при снятых опорных катках и последующей установкой катков). В ходе проверок на малых скоростях подтверждены устойчивое трогание и прямолинейность движения; при движении с рабочими скоростями выше 10 км/ч (2,8 м/с) отмечена вибрация правого заднего гусеничного модуля (предположительно из-за нарушения гео-

метрии), а также недостаточная эластичность подвески, снижающая ее эффективность. Маневренность ухудшается: минимальный радиус поворота по внутреннему следу увеличивается с 4,3 до 6,8 м. В выводах главы отмечено, что обработка экспериментальных данных подтверждает корректность расчетных предпосылок и компоновочных решений, а переоборудование трактора «Беларус-82.1» на гусеничный ход приводит к росту тягово-сцепных свойств при сохранении управляемости и устойчивости.

**В пятой главе «Оценка экономической эффективности разработанных решений»** подтверждается экономическая целесообразность применения разработанных ТГМ на тракторе класса 1,4: расчет годового экономического эффекта и срока окупаемости выполнен по требованиям ГОСТ 34393-2018 (для примера выбрана операция предпосевная культивация) (таблица 7).

Установка ТГМ существенно повышает реализуемое тяговое усилие: среднее максимальное тяговое усилие на крюке увеличилось с 15,37 кН (колесный ход) до 26,26 кН (с ТГМ), то есть на 10,89 кН (71%), что эквивалентно росту для «Белорус-82.1» примерно с 1,567 тс до 2,676 тс. Также отмечено, что применение ТГМ позволяет снизить удельное давление на почву до 50–60 кПа, что связано со снижением переуплотнения и потерь урожая.

Совокупные затраты в расчете учитывают топливо, оплату труда, а для варианта с ТГМ дополнительно – амортизацию и ремонт и ТО ТГМ, а также стоимостную оценку предотвращенных потерь урожая от переуплотнения почвы (для воспроизводимого подхода использованы зависимости по приращению плотности и влиянию плотности на урожайность; цена пшеницы принята по данным на сентябрь 2025 г.).

Таблица 7 – Результат сравнения экономических показателей

Показатель	Колесный вариант	ТГМ	Poluzzi TR1212 (4 модуля)	Poluzzi TR1616 (4 модуля)	Model Track-tor Assist 5050	Soucy ST-600
Стоимость комплекта, млн руб.	0	4,5	5,62	6,15	3,94	9,51
Производительность W, га/ч	2,244	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Время на 1 га t, ч/га	0,4456	0,3571	0,3571	0,3571	0,3571	0,3571
Расход топлива q, кг/га	5,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Топливо, руб./га	506	405	405	405	405	405
Оплата труда, руб./га	169	135	135	135	135	135

Аморт.+ремонт ТГМ, руб./га	0	604	755	827	530	1 277
Предотвращенные потери урожая, руб./га	1 902	0*	1 902	1 902	1 902	1 902
Итоговый эффект, руб./га	—	1 433	1 282	1 210	1 507	759
Итоговый эффект на 1000 га, руб./год	—	1 432 500	1 282 053	1 209 681	1 506 964	759 426
Срок окупаемости, лет	—	3,14	4,38	5,09	2,62	12,53

Если учитывать только прямые эксплуатационные затраты (топливо + труд) и добавлять владение ТГМ (амортизация + ремонт), то для выбранной операции получается отрицательный эффект –406,21 руб./га (окупаемость при таком подходе не определяется).

Положительная эффективность достигается при включении в совокупные затраты стоимостной оценки предотвращенных потерь урожая из-за переуплотнения: для ТГМ при стоимости 4,5 млн руб. итоговый эффект составляет 1 433 руб./га, или 1 432 500 руб./год на 1000 га, а срок окупаемости составит 3,14 года.

Следует отметить, что переход от опытного образца к серийному производству ТГМ существенно уменьшит себестоимость их изготовления. Это соответственно приведёт к пропорциональному уменьшению срока окупаемости для конечного потребителя.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе предложено решение актуальной научно-практической проблемы – снижение уплотняющего воздействия колёсного трактора класса 1,4 на почву при одновременном повышении его тягово-сцепных свойств за счёт создания тяговых гусеничных модулей с регулируемой геометрией обвода, регулируемой площадью контакта гусениц с опорной поверхностью.

По итогам диссертационного исследования были достигнуты следующие результаты:

1. Отмечено, что уплотнение почвы движителями колесных тракторов остается ключевой проблемой сельскохозяйственного производства, напрямую влияющей на репродуктивные свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Проведен анализ способов и технических средств снижения уплотняющего

воздействия тракторной техники на почву. Рассмотрены такие способы, как сдвигание и страивание колес, применение арочных шин, шин сверхнизкого давления, систем регулирования давления воздуха в шинах, полимерных армированных гусениц и пр. А также вопросы оптимизации передвижения тракторов, снижения количества проходов. Выявлено, что применение ТГМ позволяет снизить давление техники на почву до допустимых величин, что подтверждается зарубежным опытом.

2. Обоснована целесообразность применения ТГМ для трактора тягового класса 1,4. Они позволяют уменьшить удельное давление на почву до 50–60 кПа и повысить тягово-сцепные свойства при сопоставимых осевых нагрузках. Кроме того, повышение тягово-сцепных свойств позволяет перевести базовый трактор «Беларус-82.1» из тягового класса 1,4 в тяговый класс 2 и тем самым восполнить дефицит таких тракторов для отдельно взятого хозяйства без закупки новых тракторов.

3. Разработана конструкция опытного образца ТГМ для трактора тягового класса 1,4, включая общую компоновочную и кинематическую схемы ТГМ с механизмом изменения площади контакта гусениц с опорной поверхностью; комбинированное гусеничное зацепление ведущего колеса с резиноармированной гусеницей с диапазоном начальных окружностей ведущих колес  $D_{\text{зад}} = 834 \dots 932$  мм; систему микроподдрессоривания и виброизоляции с балансирными каретками и опорными катками, обеспечивающую копирование микрорельефа опорной поверхности и снижение пиковых нагрузок; гидрофицированную систему натяжения гусениц (амортизационно-натяжное устройство), входящий в состав системы регулирования площади контакта гусениц с опорной поверхностью, обеспечивающей изменение длины опорной ветви от 1,0 до 1,5 м; систему стабилизации тангенциальной устойчивости ТГМ – ограничители переворота. Разработаны электронные модели и силовая модель нагружения ТГМ; проведены расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций ТГМ с обеспечением необходимых запасов прочности.

4. Осуществлена подготовка и проведение испытаний по оценке функциональных качеств опытного образца ТГМ в составе трактора класса 1,4. Сформирована и реализована программа и методика функциональных испытаний, ориентированная на проверку работоспособности ТГМ. Обеспечены условия воспроизводимых измерений. Выполнен монтаж ТГМ на трактор «Беларус 82.1». Реализован комплекс функциональных испытаний: трогание с места и движение на передачах, круговые и криволинейные манёвры, замеры реальных поступательных скоростей по передачам, преодоление тягового сопротивления.

5. Осуществлена оценка функциональных качеств опытного образца ТГМ по результатам испытаний. Получены экспериментальные подтверждения снижения

буксования, роста реализуемого тягового усилия и перехода базовой машины в более высокий фактический тяговый класс по ГОСТ 27021-86. Для базового трактора «Беларус 82.1» зафиксировано увеличение тяги с 1,57 до 2,68 тс при росте площади пятна контакта с опорной поверхностью с 0,15 до 0,45 м<sup>2</sup>.

6. Выполнена оценка экономической эффективности разработанных технических решений в соответствии с ГОСТ 34393–2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки». Экономическая эффективность от применения ТГМ в составе серийного колесного трактора достигается за счет снижения затрат от потерь урожая, связанных с переуплотнением почвы. При предотвращаемом недоборе 0,15 т/га получен итоговый экономический эффект в 1,43 млн. руб./год на 1000 га. Для стоимости ТГМ в 4,5 млн. руб. срок окупаемости составил около 3,14 года (примерно 3 года и 2 месяца). При уменьшении себестоимости изготовления ТГМ при переходе к серийным образцам срок окупаемости также будет уменьшаться.

Таким образом, дополнительно показано, что применение ТГМ на серийном колесном тракторе позволяет обеспечить: переменный тяговый класс машины по сцеплению, повышенные тягово-сцепные свойства и навесоспособность – агрегатируемость с широким шлейфом сельскохозяйственных машин и орудий; снижение удельного давления движителей на почву до допустимых нормативов и ниже – возможность круглогодичной работы трактора в любых почвенно-климатических условиях и в целом снижение потерь урожая за счет щадящего воздействия на почву, растительный покров и корневую систему растений, а также снижения буксования и исключения срыва плодородного слоя почвы.

В дальнейшей работе предполагается продолжить исследования в части расширенных эксплуатационных испытаний ТГМ задней оси трактора с их доработкой и доводкой по результатам. Это необходимо для получения надежной конструкции, интересной с точки зрения серийного производства и обеспечения сельхозтоваропроизводителей страны.

Особый интерес для дальнейших исследований представляет автоматизация и роботизация регулировочных процессов ТГМ, что позволит перейти к созданию адаптивных ходовых систем, самостоятельно приспосабливающихся к любым дорожным и почвенно-климатическим условиям.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

*Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Съёмная 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.

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.

*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.

*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. Современная агроинженерия / В. И. Трухачев, О. Н. Дидманидзе, М. Н. Ерохин [и др.]. – Москва : ООО «Мегаполис», 2022. – 413 с. – ISBN 978-5-6049928-2-1.

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.

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 движителем 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.
7. 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.
8. 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.