

На правах рукописи



ШЕРЕДЕКИН Павел Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РУЛЕВОГО ПРИВОДА КОЛЕСНОГО
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОЛЕЁЙ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена на кафедре прикладной механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ).

Научный руководитель **Беляев Александр Николаевич**, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Кравченко Владимир Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», профессор кафедры «Техника и технологии пищевых производств»;

Сенькевич Сергей Евгеньевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), старший научный сотрудник отдела № 2 «Мобильные энергосредства».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ).

Защита состоится 25 декабря 2025 г. г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 35.2.008.01, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Диссертационные советы» – «Защиты» – «35.2.008.01»), а также по ссылке: <https://ds.vsau.ru/?p=12680>.

Автореферат разослан 31 октября 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в Российской Федерации сельскохозяйственное производство становится одной из ведущих отраслей экономики, обеспечивающей продовольственную безопасность страны и дающей прибыль. Существует устойчивая тенденция роста посевных площадей сельскохозяйственных культур и их урожайности. При этом по количеству тракторов на 1000 га Россия значительно отстает от ведущих мировых лидеров в аграрном секторе. Но при этом сокращение возможности импорта техники из недружественных стран ведет к увеличению спроса на качественную современную сельскохозяйственную технику.

Основным мобильным энергетическим средством, на базе которого в настоящее время строятся сельскохозяйственные агрегаты различного типа, является трактор. Почти все работы в растениеводстве в современных условиях выполняются агрегатами на базе колесных тракторов. Тракторы типа «Беларус» составляют около 90 % российского рынка в сегменте мощностей 80...100 л.с. Реализованная в этих тракторах схема поворота передними управляемыми колесами является наиболее распространенной.

Для эффективной работы машинно-тракторного агрегата (МТА) при выполнении полевых работ большое значение имеет обеспечение устойчивого движения мобильного энергетического средства на всех участках траектории, в том числе при выполнении поворотов. Для обеспечения общей устойчивости и адаптации тракторов при комплектовании агрегатов в их конструкции реализована возможность изменения колеи. Регулирование колеи управляемых колес пропашных тракторов при применяемых в конструкциях неизменных углах установки поворотных рычагов рулевой трапеции приводит к нарушению кинематических параметров криволинейного движения агрегата, вследствие чего смещается центр скоростей. При этом происходит отклонение трактора от заданной траектории движения из-за бокового скольжения управляемых колес, и как следствие, повышение затрат мощности и увеличение динамических нагрузок на узлы и детали, снижение качества выполняемых сельскохозяйственных работ. Таким образом, возникает противоречие между расширением функциональных возможностей трактора за счет регулирования колеи, и изменением исходной геометрии рулевой трапеции, приводящим к нарушению кинематики криволинейного движения.

В связи с вышеизложенным, научные исследования, направленные на поиск путей повышения устойчивости криволинейного движения МТА за счет совершенствования конструктивно-геометрических параметров элементов системы рулевого управления, **являются актуальными**, имеющими важное значение для развития тракторостроения и сельскохозяйственного производства в Российской Федерации. Так как наиболее часто в рулевом приводе систем рулевого управления применяется четырехзвенный механизм рулевой трапеции, то именно этот тип трапеции принят к рассмотрению в работе.

Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации и электрификации сельскохозяйственного производства», п. 2.1. «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации производства продукции растениеводства», утвержденной ученым советом университета (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Вопросам устойчивости сельскохозяйственных агрегатов при криволинейном движении посвящено множество исследований, результаты которых внесли большой вклад в решение задач разработки, компоновки и эффективной эксплуатации МТА. Исследованием устойчивости движения МТА занимались Атаманов Ю.Е., Беляев А.Н., Гуськов В.В., Гячев Л.В., Коновалов В.В., Кравченко В.А., Кринко М.С., Лефаров А.Х., Сенькевич С.Е., Скотников В.А., Трояновская И.П., Фаробин Я.Е., Hans В. Расејка и другие отечественные и зарубежные ученые. Задача устойчивости МТА, представляющего собой взаимосвязанную и взаимозависимую систему «трактор-рабочее оборудование», сложная и трудно разрешимая ввиду разнообразия и многообразия входящих в нее параметров.

Определяющая роль в движении агрегата принадлежит трактору. Процесс криволинейного движения одиночного трактора и трактора в составе агрегата при изменении колеи исследован недостаточно. Практически не разработаны методы и способы компенсации нарушения кинематики движения МТА вследствие изменения геометрии рулевой трапеции при регулировании колеи.

Исследования систем рулевого управления транспортных средств проводили Анилович В.Я., Беляев А.Н., Бухарин Н.А., Гришкевич А.И., Ксенович И.П., Раймпель Й., Jazar Reza N., Joop P. Pauwelussen и другие отечественные и зарубежные ученые. Их труды посвящены, в частности, изучению рулевых приводов тракторов и автомобилей с передними управляемыми колесами. В них подробно рассмотрены задачи разработки механизмов рулевой трапеции. При этом недостаточно исследовано влияние изменения колеи управляемых колес трактора на его устойчивость при повороте и маневренность. Установлено, что при повороте трактора геометрические параметры механизма рулевой трапеции оказывают определяющее влияние на его кинематику и динамику. Анализ работ в области исследования криволинейного движения МТА показывает, что одним из путей повышения устойчивости криволинейного движения МТА является совершенствование конструктивно-геометрических параметров элементов системы рулевого управления.

Объектом исследования является процесс криволинейного движения МТА на базе колесного трактора с изменяемой колеёй и передними управляемыми колесами при корректируемых геометрических параметрах рулевой трапеции.

Предмет исследования: закономерности изменения геометрических параметров рычажного механизма четырехзвенной рулевой трапеции и кинематических характеристик реализуемого ею фактического поворота колесного трактора и МТА.

Цель работы: повысить устойчивость криволинейного движения МТА на базе колесного трактора с изменяемой колеёй и передними управляемыми колесами за счет совершенствования геометрии рычажного механизма рулевой трапеции.

Задачи исследования:

- провести обзор и анализ существующих технических решений и конструктивных исполнений механизмов рулевой трапеции колесных транспортных средств и обосновать необходимость изменения геометрических параметров четырехзвенной рулевой трапеции при изменении шкворневой колеи трактора;

- установить аналитические зависимости для определения минимального радиуса фактического поворота колесной машины, реализуемого четырехзвенной рулевой трапецией, и смещения мгновенного центра поворота от линии продолжения задней оси машины;

- обосновать геометрические параметры шарнирно-рычажного механизма четырехзвенной рулевой трапеции трактора Беларус-80.1 с изменяемой колеёй, разработать конструкцию шарнирно-рычажного механизма четырехзвенной рулевой трапеции и изготовить его опытный образец;

- экспериментально оценить влияние конструктивных изменений рулевой трапеции на устойчивость движения МТА на базе трактора Беларус-80.1.

Научной новизной обладают:

- установленные закономерности между геометрическими характеристиками четырехзвенной рулевой трапеции трактора Беларус-80.1 при изменении шкворневой колеи;

- полученные аналитические зависимости для определения текущего значения радиуса кривизны фактической траектории движения колесной машины и смещения мгновенного центра поворота от линии продолжения задней оси машины, отличающиеся учетом изменения шкворневой колеи и углов поворота наружного и внутреннего колес;

- обоснованные геометрические параметры четырехзвенной рулевой трапеции трактора Беларус-80.1, отличающиеся тем, что определены с учетом длин ее боковых рычагов и их углового положения;

- экспериментально установленные характеристики криволинейного движения МТА на базе трактора Беларус-80.1 с усовершенствованной рулевой трапецией, отличающиеся тем, что учитывают изменение шкворневой колеи.

Теоретическую значимость представляют формулы для определения минимального радиуса фактического поворота колесной машины, реализуемого четырехзвенной рулевой трапецией, и смещения мгновенного центра поворота от линии продолжения задней оси машины; уравнения для определения углов установки и рабочей длины поворотных рычагов, которые позволяют провести расчет их требуемых значений при регулировке колеи, дополняющие теорию криволинейного движения МТА.

Практическую значимость работы составляют: усовершенствованная конструкция рулевой трапеции, позволяющая повысить устойчивость криволинейного движения МТА при изменении колеи управляемых колес, снизить боковое скольжение управляемых колес при повороте; программные модули, которые позволяют выполнить расчет и выбор рациональных величин эксплуатационных параметров и кинематических характеристик МТА на персональном компьютере с высокими производительностью и точностью.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнены на основе положений теоретической механики и методов математического моделирования процесса криволинейного движения колесного трактора с изменяемой колеёй и передними управляемыми колесами при корректируемых геометрических параметрах рулевой трапеции. Экспериментальные исследования проведены по апробированным методикам на тракторе Беларус-80.1 в лабораторных и полевых условиях. Измерения выполняли сертифицированными и поверенными приборами, результаты регистрировались в памяти персонального компьютера. При проведении расчетов и обработке результатов экспери-

ментов использовали современные компьютеры и применяли программное обеспечение: SimInTech, Matlab, Microsoft Excel, и др.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерности, определяющие соотношения между геометрическими характеристиками четырехзвенной рулевой трапеции трактора Беларус-80.1 и позволяющие провести оценку кинематических параметров криволинейного движения колесной машины при изменении шкворневой колеи;
- аналитические зависимости, позволяющие определить текущие значения радиуса кривизны фактической траектории движения колесной машины и смещения мгновенного центра поворота от линии продолжения задней оси машины при изменении шкворневой колеи;
- геометрические параметры четырехзвенной рулевой трапеции, соответствующие конкретной шкворневой колее трактора Беларус-80.1, позволяющие разработать опытную конструкцию рулевой трапеции;
- экспериментально определенные характеристики криволинейного движения МТА на базе трактора Беларус-80.1, позволяющие оценить эффективность использования усовершенствованной рулевой трапеции.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов и выводов, полученных в диссертации, обеспечивается применением общенаучных методов и приемов. Экспериментальные исследования выполнены на сертифицированном современном оборудовании по апробированным методикам. Сходимость теоретических и экспериментальных данных позволяет говорить об адекватности полученных аналитических зависимостей и не противоречит фактам, известным из специальной литературы.

Разработанные научно-техническая документация и опытные образцы усовершенствованной конструкции рулевой трапеции используются в ООО селекционно-семеноводческое предприятие «НИВА» и Представительстве ОАО «Минский тракторный завод». Результаты, полученные в диссертации, используются в учебном процессе агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Агроинженерия» и инженеров по специальности «Наземные транспортно-технологические средства».

Основные положения работы доложены и обсуждены на ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (2022–2025 годы), на международных научно-практических конференциях (г. Воронеж, 2023, 2024 годы), на национальных научно-практических конференциях (г. Воронеж, 2023–2025 годы).

Личный вклад соискателя заключается в определении цели и задач исследования, выборе методов исследования, обосновании параметров и разработке модернизированной конструкции рулевой трапеции, проведении экспериментов и анализе полученных результатов, выполненных лично автором; в обосновании новых технических решений рулевой трапеции колесного трактора, разработке методик определения геометрических параметров рулевой трапеции и кинематических характеристик поворота колесной машины, формулировке выводов, выполненных при участии автора; подготовке научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научные работы, в том числе девять статей опубликованы в Российских журналах, включенных в перечень ВАК; получено пять патентов Российской Федерации на полезные

модели и два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, включающих 75 рисунков и 17 таблиц, заключения, списка литературы из 145 наименований, и трех приложений. Объем диссертации – 175 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведена степень ее разработанности, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, изложены теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, отражены личный вклад соискателя, количество публикаций соискателя по теме диссертации, структура и объем диссертационной работы.

В первом разделе «Обзор, анализ и обобщение результатов исследований в области совершенствования систем рулевого управления колесных машин» выполнен анализ системы рулевого управления колесных машин, рассмотрены принцип работы и геометрические соотношения между элементами четырехзвенной рулевой трапеции.

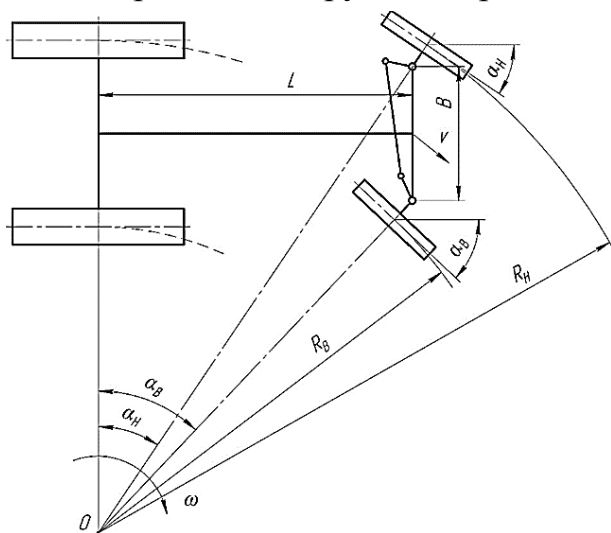


Рисунок 1 – Кинематическая схема правильного поворота колесной машины

шины, длин боковых рычагов m и поперечной тяги n) рулевая трапеция (рисунок 2) обеспечивает близкое к требуемому соотношение между углами поворота α_H и α_B колес.

Особенностями системы рулевого управления колесных сельскохозяйственных тракторов и, в частности, трактора Беларус-80.1 является конструктивно предусмотренная и технологически обусловленная возможность изменения колеи. У тракторов Беларус-80.1 колея изменяется ступенчато.

При регулировании колеи трактора происходит нарушение исходной геометрии рулевой трапеции. Это приводит также к изменению исходной кинематики поворота и положения мгновенного центра поворота (точки O_1 и O_2 на рисунке 3).

Взаимосвязь между углами поворота (рисунок 1) наружного α_H и внутреннего α_B управляемых колес, при котором обеспечивается правильный (идеальный) поворот и их чистое качение без скольжения, определяется из геометрических соотношений

$$\operatorname{ctg} \alpha_H - \operatorname{ctg} \alpha_B = \frac{B}{L}, \quad (1)$$

где B – расстояние между осями поворотных цапф (шкворневая колея), м;
 L – продольная база транспортного средства, м.

При обоснованном выборе основных параметров (угла наклона θ боковых рычагов к продольной оси ма-

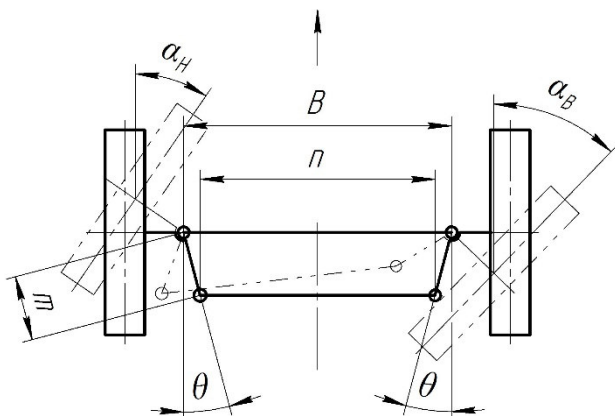
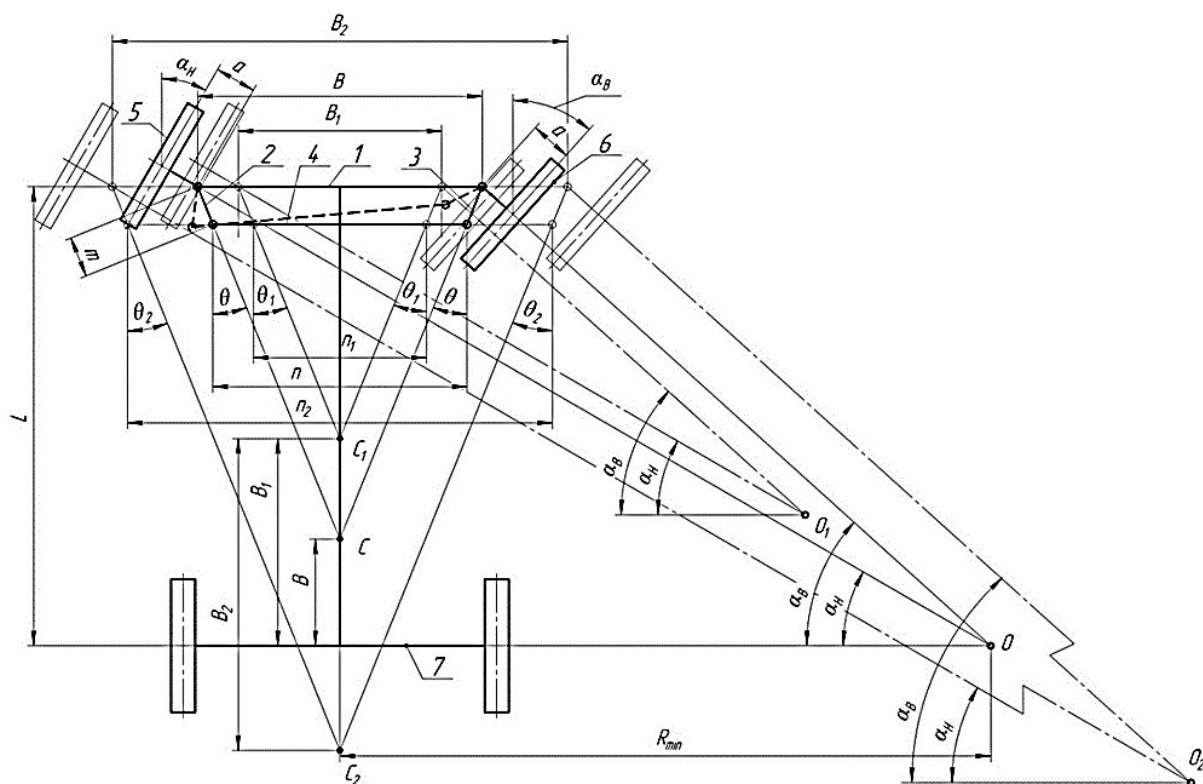


Рисунок 2 – Схема рулевой трапеции

Анализ работ в области исследования криволинейного движения МТА показал, что на его устойчивость оказывают влияние ряд технологических и конструктивных факторов. Потеря устойчивости движения характеризуется стремлением отдельного трактора или трактора в составе агрегата самопроизвольно изменять направление движения, а при повороте рулевого колеса двигаться по кривой, не точно соответствующей повороту управляемых колес.

Для навесного агрегата большинство этих факторов определяется трактором, на базе которого агрегат создан.



1 – передняя ось; 2, 3 – поворотные рычаги; 4 – поперечная рулевая тяга;
5, 6 – управляемые колеса; 7 – задний мост

Рисунок 3 – Схема поворота колесной машины с переменной колеёй

Исходя из этого, важнейшим направлением повышения устойчивости криволинейного движения и маневренности МТА является разработка конструкции рулевой трапеции, в которой предусмотрена возможность корректировки углов установки и рабочих длин боковых рычагов при регулировании колеи.

Во втором разделе «Теоретическое обоснование рациональной рулевой трапеции колесного трактора Белерус-80.1» проведено аналитическое исследование кинематики правильного и действительного (фактического, реального) поворота колесной машины.

На основании условия (1), устанавливающего вполне определенную и необходимую взаимосвязь между углами поворота α_H и α_B управляемых колес машины, рассчитаны параметры кинематики идеального поворота для различ-

ных значений шкворневой колеи. Из выражения (1) следует, что отношение B/L должно быть всегда постоянным, а мгновенный центр поворота, являющийся пересечением нормалей к траекториям движения колес, должен лежать на линии продолжения неуправляемой оси (рисунок 4). При этом машина будет совершать правильный поворот, и колеса будут двигаться без скольжения, то есть иметь чистое качение. Каждое изменение шкворневой колеи B дает различные соотношения между углами α_H и α_B , но мгновенный центр поворота машины всегда находится на продолжении оси заднего моста (на рисунке 4 – точки O_1 и O_2). При этом численные характеристики общей геометрии и кинематики правильного поворота будут отличаться.

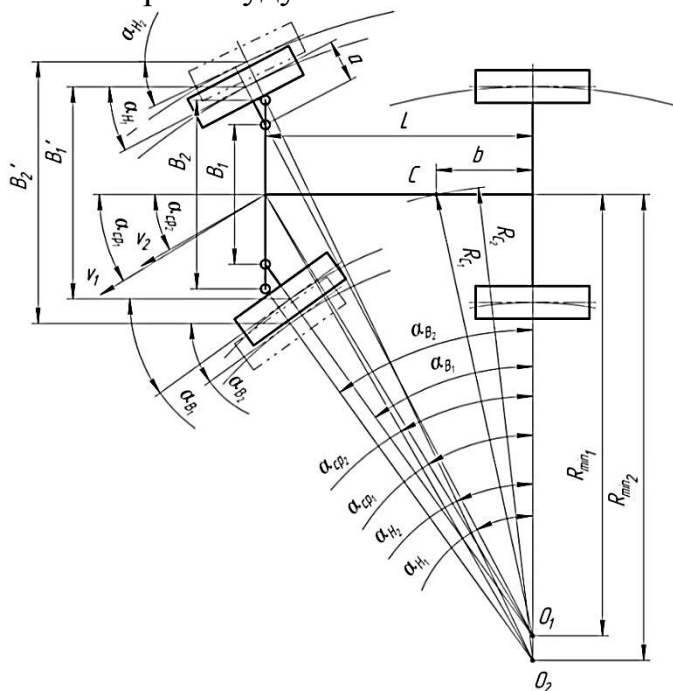


Рисунок 4 – Кинематическая схема идеального поворота колесной машины при изменении колеи

Таким образом, от рулевого привода требуется, чтобы он обеспечивал вытекающие из геометрии поворота требуемые соотношения между углами поворота управляемых колес за счет применения в рулевом приводе четырехзвенной рулевой трапеции (рисунок 5). Между углами поворота наружного и внутреннего управляемых колес при реальном повороте, осуществляемом рулевой трапецией, существуют аналитические взаимосвязи, выраженные обобщающей, записанной непосредственно с учетом параметров трапеции трактора формулой

$$\alpha_H = \varphi + \arctg \frac{m \cos(\varphi + \alpha_B)}{B - m \sin(\varphi + \alpha_B)} - \arcsin \frac{m + 2B \sin \varphi - 2m \sin^2 \varphi - B \sin(\varphi + \alpha_B)}{\sqrt{B^2 + m^2 - 2Bm \sin(\varphi + \alpha_B)}}, \quad (2)$$

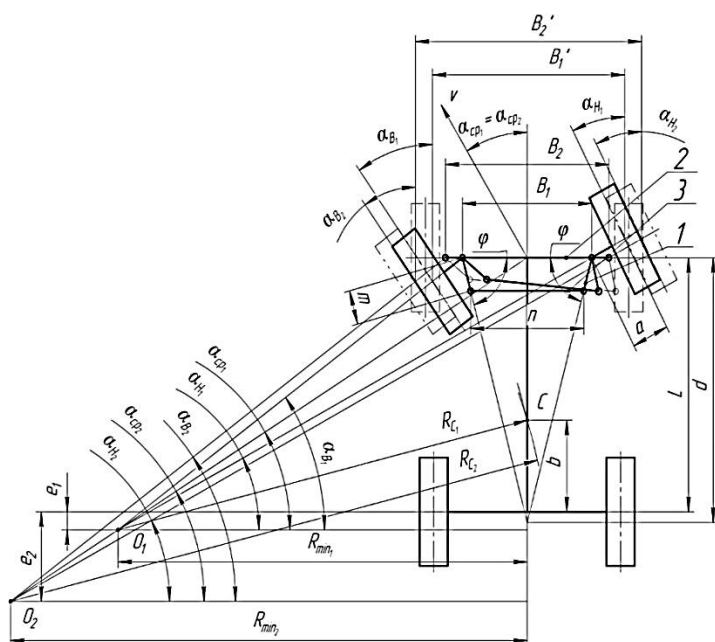
где φ – угол наклона рулевого рычага к оси качения колеса ($\varphi + \theta = 90^\circ$), град;

Сравнение выражений (1) и (2) показывает, что они не тождественные, и, следовательно, между теоретически необходимыми углами поворота колес α_B и α_H , полученными согласно кинематике правильного поворота (1), и фактическими, реализуемыми рулевой трапецией (2), будет неизбежно существовать разность.

Следовательно, известные расчетные зависимости для определения геометрических и кинематических характеристик правильного поворота не могут быть использованы для оценки фактического поворота. С целью прогнозирования устойчивости и маневренности колесной машины, управляемой посредством рулевой трапеции, и движущейся по криволинейной траектории, установлены зависимости R_{min} и e .

Минимальный радиус поворота колесной машины, обеспечиваемого рулевой трапецией, согласно рисунку 5, определяется по выражению

$$R_{min} = B \cdot \left(\frac{tg \alpha_H}{tg \alpha_B - tg \alpha_H} + \frac{1}{2} \right). \quad (3)$$



1 – боковой поворотный рычаг; 2 – поперечная ось машины; 3 – поперечная тяга трапеции

Рисунок 5 – Кинематическая схема действительного поворота колесной машины, реализуемого рулевой трапецией

Мгновенный радиус кривой траектории центра тяжести равен (рисунок 5)

$$R_C = \sqrt{(b + e)^2 + R_{min}^2}, \quad (4)$$

где e – расстояние от задней оси до мгновенного центра поворота

$$e = B \cdot \frac{tg\alpha_H \cdot tg\alpha_B}{tg\alpha_B - tg\alpha_H} - L. \quad (5)$$

Сравнение результатов, полученных с использованием (3) и (4), показали отличие радиусов кривизны траекторий от их значений при идеальном повороте.

Анализ полученных графиков показал, что для реального поворота, осуществляемого базовой рулевой трапецией, увеличение колеи ведет к

значительному возрастанию кинематических характеристик поворота (рисунок 6) и смещению центра поворота от задней оси (рисунок 7). Изменение B с 1,02 м до 1,42 м при $\alpha_B = 20^\circ$ приводит к увеличению R_{min} на величину $\Delta R_{min} = 3,669$ м или на 30,74%, а R_C – на $\Delta R_C = 3,87$ м (31,26%); при $\alpha_B = 40^\circ$ – $\Delta R_{min} = 1,379$ м (31,11 %), $\Delta R_C = 1,672$ м (33,40 %). Сравнение этих параметров с рассчитанными по формулам правильного поворота показало, что при $B = 1,02$ м и $\alpha_B = 20^\circ$ R_{min} возрастает на величину $\Delta R_{min} = 1,245$ м (15,06%), а R_C – на $\Delta R_C = 1,446$ м (16,99 %); при $B = 1,02$ м и $\alpha_B = 40^\circ$ R_{min} и R_C уменьшаются на $\Delta R_{min} = 0,283$ м (8,5%) и $\Delta R_C = 0,093$ м (2,71 %). В последнем случае мгновенный центр поворота лежит внутри колесной базы.

а)

б)

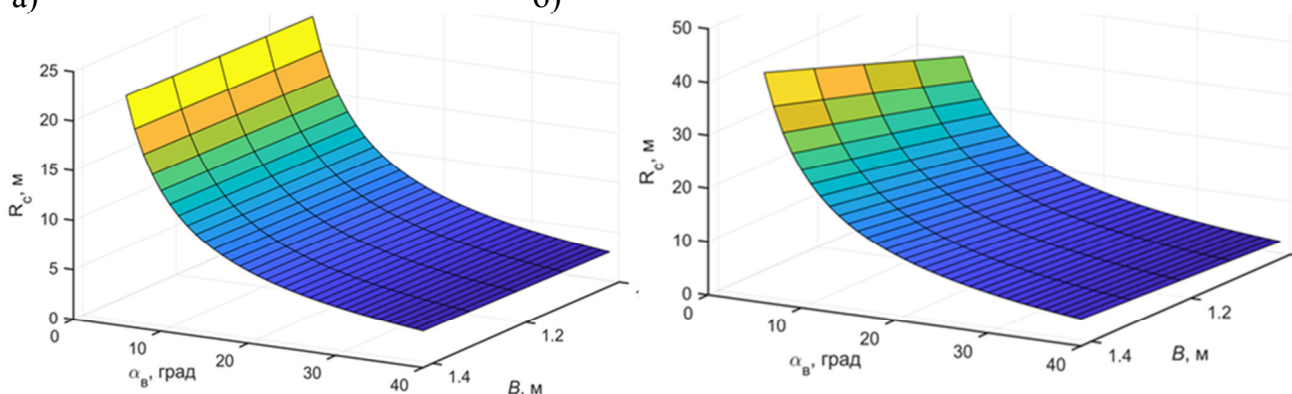


Рисунок 6 – Зависимости теоретического радиуса кривизны траектории, описываемой центром тяжести, от шкворневой колеи и угла поворота внутреннего управляемого колеса при правильном (а) и реальном (б), реализуемом базовым вариантом рулевой трапеции, повороте трактора Беларус-80.1

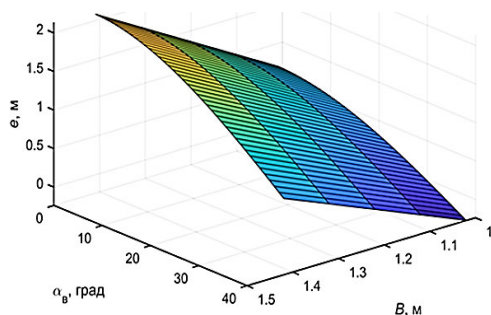
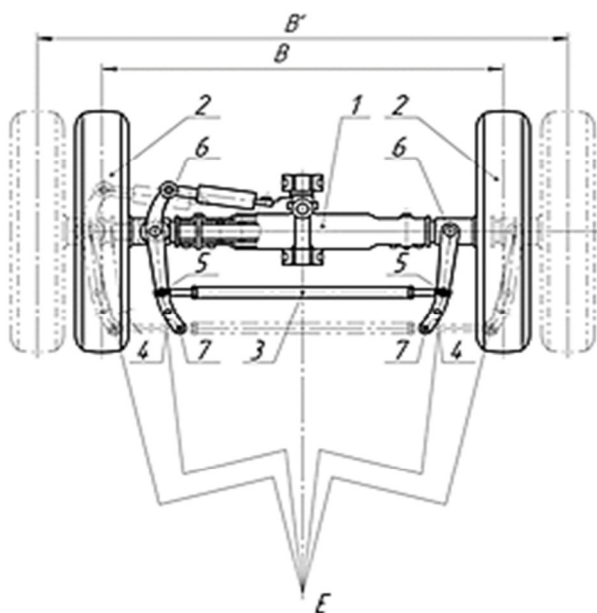


Рисунок 7 – Зависимость расстояния от задней оси до мгновенного центра поворота от шкворневой колеи и угла поворота внутреннего управляемого колеса при реальном повороте трактора Беларус-80.1



1 – передний мост; 2 – управляемые колеса; 3 – поперечная тяга; 4 – поворотные рычаги; 5 – сферические шарниры; 6 – шкворни; 7 – дополнительные отверстия
Рисунок 8 – Предлагаемая рулевая трапеция колесного транспортного средства с изменяемой колеей

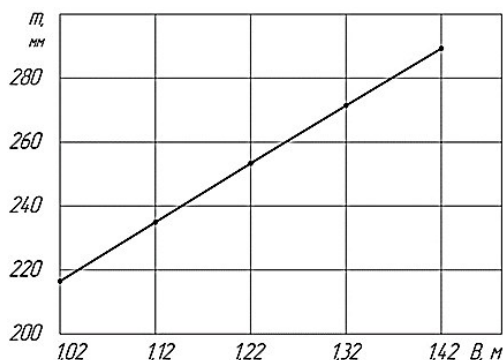


Рисунок 9 – График зависимости длины поворотного рычага от шкворневой колеи

поворота трактора Беларус-80.1, осуществляемого рулевой трапецией с рациональными геометрическими параметрами. Во всех трех вариантах

При $B = 1,42$ м изменение α_B от 20° до 40° приводит к увеличению R_{min} и R_C , соответственно на $\Delta R_{min} = 4,713$ м (39,49%), $\Delta R_C = 5,117$ м (41,33%) и $\Delta R_{min} = 0,895$ м (20,21%), $\Delta R_C = 1,384$ м (27,65%).

Для компенсации выявленного кинематического несоответствия определены рациональные геометрические размеры элементов рулевой трапеции для заданных значений шкворневой колеи трактора Беларус-80.1. Установлено, что основным параметром рулевой трапеции, которым можно управлять при изменении колеи является угол наклона φ боковых рычагов к оси передней балки. Предложена конструкция рулевой трапеции (рисунок 8), позволяющая изменять этот угол за счет перестановки поперечной тяги по соответствующим отверстиям на рычаге, не нарушая жесткости шлицевого соединения рычагов со шкворнями.

Результаты вычисления рациональных величин углов φ и длин рычагов m для трактора Беларус-80.1 в зависимости от шкворневой колеи приведены соответственно, на рисунках 9 и 10. Расчет основывался на данных из технической характеристики трактора и учитывал принятые ранее для расчета значения: $L = 2,37$ м; $B = 1,02 \dots 1,42$ м; $\Delta B = 0,1$ м; $d = 0,75L$; $m/n = 0,24$.

По результатам вычислений при $B = 1,02$ м получено $m = 216$ мм и $\varphi = 73,99^\circ$, при $B = 1,22$ м – $m = 253$ мм и $\varphi = 71,06^\circ$, при $B = 1,42$ м – $m = 289$ мм и $\varphi = 68,23^\circ$. Проведена аналитическая оценка кинематических характеристик

исследуемых ширин колеи B характер изменения зависимостей $\Delta\alpha_H = f(\alpha_B)$ при применении опытной трапеции для совершения поворота идентичен другому.

Сравнение результатов расчета минимального радиуса поворота R_{min} для правильного поворота и поворота, реализуемого рулевой трапецией с рациональными геометрическими параметрами показало, что при $\alpha_B = 20^\circ$ и $\alpha_B = 40^\circ$ и $B = 1,22$ м – $\Delta R_{min} = 1,106$ м (13,44%) и $\Delta R_{min} = 0,338$ м (10,92%); при $B = 1,42$ м – $\Delta R_{min} = 0,938$ м (11,49%) и $\Delta R_{min} = 0,401$ м (12,79%). При $B=1,02$ м они практически не отличаются, получено расхождение 0,48% при $\alpha_B = 20^\circ$ и 0,27% при $\alpha_B = 40^\circ$.

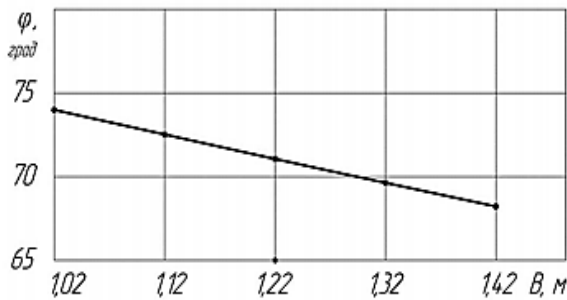


Рисунок 10 – График зависимости углового положения поворотного рычага от шкворневой колеи

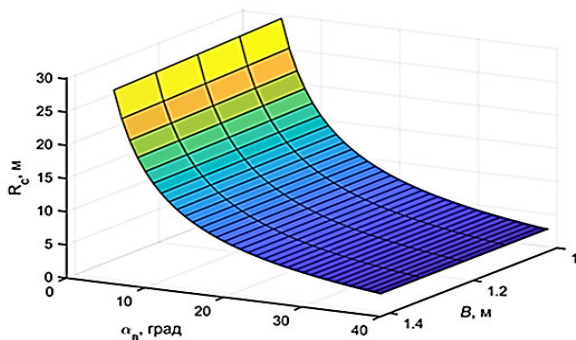


Рисунок 11 – Зависимость теоретического радиуса кривизны траектории, описываемой центром тяжести, от шкворневой колеи и угла поворота внутреннего управляемого колеса при повороте трактора Беларус-80.1 с опытным вариантом рулевой трапеции

Расчетом установлено, что применение опытной рулевой трапеции позволяет заметно уменьшить R_{min} в сравнении с базовым вариантом: при $B = 1,22$ м и $\alpha_B = 20^\circ$ – $\Delta R_{min} = 1,873$ м (18,54 %), $B = 1,22$ м и $\alpha_B = 40^\circ$ – $\Delta R_{min} = 0,644$ м (17,22 %), $B = 1,42$ м и $\alpha_B = 20^\circ$ – $\Delta R_{min} = 3,775$ м (31,63 %), $B = 1,42$ м и $\alpha_B = 40^\circ$ – $\Delta R_{min} = 1,296$ м (29,26%) (рисунок 11).

Опытная трапеция позволяет обеспечить кинематические характеристики поворота, наиболее близки к полученным для правильного поворота.

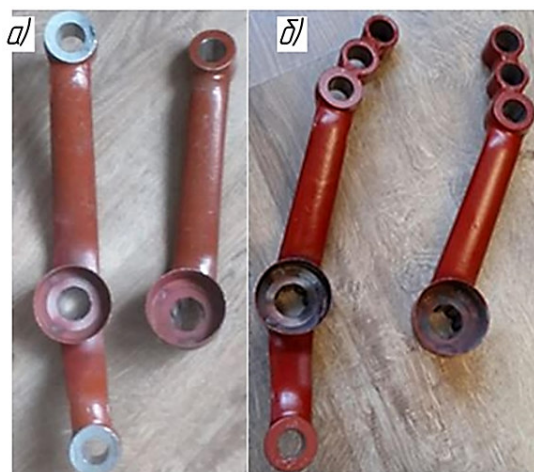
Выполненное в программе SimInTech математическое моделирование бокового отклонения колесной машины при повороте подтвердило правильность ранее проведенных расчетов. Анализ результатов расчетов подтвердил целесообразность разработки конструкции рулевой трапеции, которая при изменении колеи имела бы оптимальную геометрию, позволяющую со-

хранить кинематические параметры, близкие к правильному повороту.

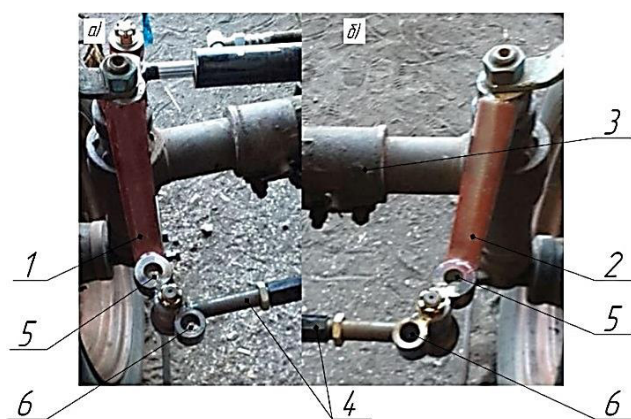
В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований» разработаны методики лабораторных и полевых испытаний для подтверждения эффективности применения на тракторе Беларус-80.1 усовершенствованной системы рулевого управления и подтверждения адекватности теоретических математических моделей реальному технологическому процессу.

В качестве объекта испытаний выбран трактор тягового класса 1,4 Беларус-80.1 с передними управляемыми колесами в агрегате с плугом ПЛН-4-35 и сеялкой СТВ-12. Для оценки эффективности применения модернизированной

рулевой трапеции были проведены также опыты с одиночным трактором.



а – базовый вариант; б – опытный вариант
Рисунок 12 – Боковые поворотные рычаги рулевой трапеции трактора Беларус-80.1



1, 2 – поворотные рычаги;
3 – передняя ось; 4 – поперечная тяга;
5, 6 – отверстия для поперечной тяги
а – левая сторона; б – правая сторона

Рисунок 13 – Установка элементов опытной рулевой трапеции на трактор Беларус-80.1

На основе базовых рычагов (рисунок 12а) разработаны конструкции и изготовлены боковые рычаги модернизированной рулевой трапеции (рисунок 12б). Трактор оборудовался базовым и опытным вариантами рулевой трапеции (рисунок 13).

Движение трактора по криволинейной траектории при проведении экспериментальных исследований осуществлялось, в зависимости от решаемой задачи, или по кругу, или по круговому беспетлевому повороту.

Для выполнения программы экспериментальных исследований на тракторе была установлена навигационная система Starfire-3000 с дисплеем GreenStar-4240, рулевое колесо от AutoTrac Universal-300 для задания, измерения и фиксации величин необходимых параметров, среди которых: время опыта; путь, пройденный трактором; координаты траектории движения трактора.

Выполненная оценка точности измерений по предельным ошибкам подтвердила корректность разработанной методики и выполненных экспериментальных исследований, так как суммарная

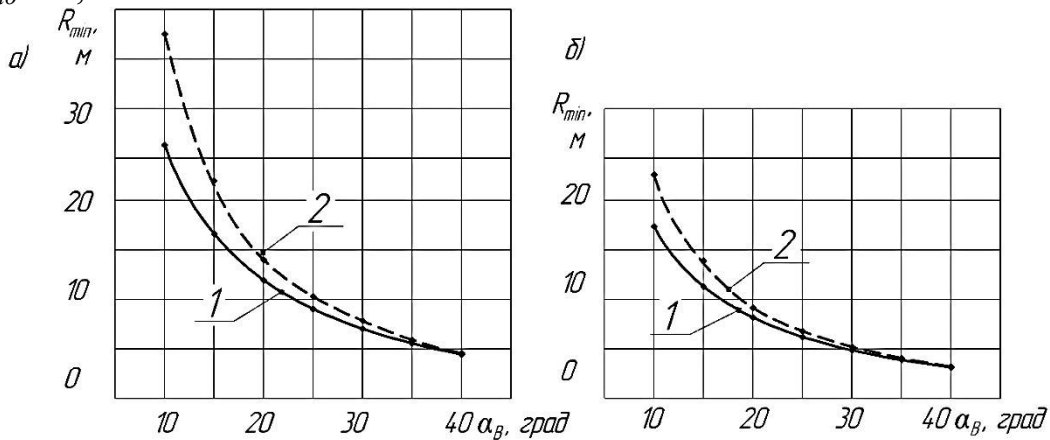
относительная ошибка не превышает 3 %.

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований рулевого привода трактора Беларус-80.1 и их анализ» приведены результаты и анализ экспериментальных исследований по применению модернизированной системы рулевого управления на тракторе Беларус-80.1.

В результате лабораторных исследований определены углы поворота управляемых колес. При этом, согласно разработанной методике, угол поворота внутреннего колеса задавался, а наружного измерялся. Полученные при измерениях значения углов в абсолютном значении в среднем отличаются от расчетных на $\Delta\alpha_H = 0,317^\circ$; $\Delta\alpha_H = 0,290^\circ$ и $\Delta\alpha_H = 0,325^\circ$ при шкворневой колее $B = 1,02$ м, $B = 1,22$ м и $B = 1,42$ м, соответственно, что находится в пределах погрешности угломера.

При определении минимальных радиусов поворота трактора установлено, что опытная трапеция на всем интервале углов поворота внутреннего колеса обеспечивает меньшие радиусы поворота по сравнению с базовой. При шквор-

невой колее $B = 1,42$ м и $\alpha_B = 20^\circ$ для базовой трапеции опытное значение $R_{\min} = 13,98$ м, а для модернизированной – $R_{\min} = 9,13$ м (рисунок 14). Для опытной трапеции изменение колеи фактически не влияет на значения минимального радиуса поворота. Для $\alpha_B = 40^\circ$ при $B = 1,02$ м – $R_{\min} = 3,194$ м, а при $B = 1,42$ м – $R_{\min} = 3,190$ м.



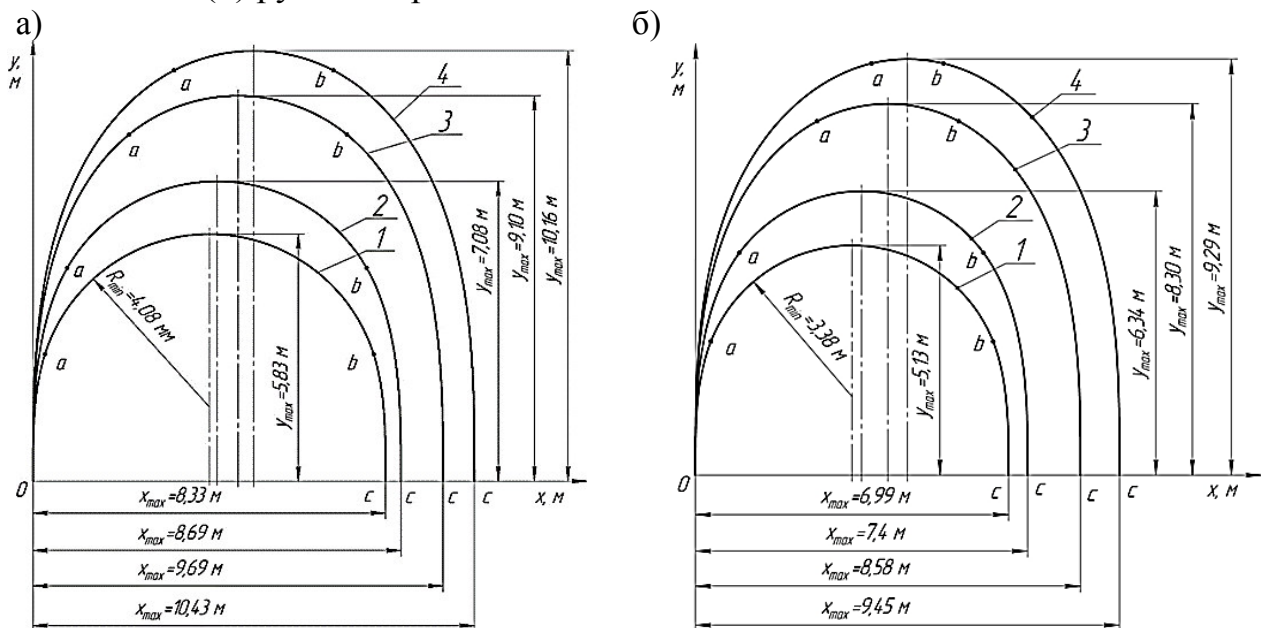
1 – расчетные значения $R_{\min}$; 2 – опытные значения $R_{\min}$

а – базовая трапеция; б – экспериментальная трапеция

Рисунок 14 – Графики зависимостей расчетных и опытных значений минимальных радиусов поворота трактора от угла поворота внутреннего управляемого колеса при шкворневой колее $B = 1,42$ м

Для базовой трапеции с увеличением колеи значения минимального радиуса увеличивается. Для того же значения $\alpha_B = 40^\circ$ при $B = 1,02$ м – $R_{\min} = 3,194$ м, а при $B = 1,42$ м – $R_{\min} = 4,550$ м.

В результате полевых экспериментальных исследований при изучении движения одиночного трактора Беларус-80.1 получены траектории движения его центра масс (рисунок 15) при различных скоростях с базовой (а) и экспериментальной (б) рулевой трапецией.



1 – $v = 0,694$ м/с; 2 – $v = 1,183$ м/с; 3 – $v = 2,014$ м/с; 4 – $v = 2,472$ м/с

Рисунок 15 – Опытные траектории движения одиночного трактора Беларус-80.1 при различных скоростях с базовой (а) и экспериментальной (б) рулевой трапецией при шкворневой колее $B = 1,22$ м и времени входа в поворот $t = 4$ с

Выявлено, что применение экспериментальной трапеции позволяет уменьшить текущие параметры траектории. Так при скорости движения $v = 2,014$ м/с значение ординаты $y_{\max} = 8,3$ м для экспериментальной трапеции, что на 9,6 % меньше, чем $y_{\max} = 9,1$ м для базовой. Значение поперечной координаты при этом уменьшается на 12,9 % с $x_{\max} = 9,69$ м при базовой трапеции до $x_{\max} = 8,58$ м при экспериментальной.

При этом увеличение поступательной скорости движения трактора в повороте приводит к возрастанию геометрических характеристик поворота. Как следует из рисунка 16, экспериментальная рулевая трапеция позволяет приблизить геометрические параметры поворота к параметрам, рассчитанным из условия правильного поворота. При полевых испытаниях трактора Беларус-80.1 в агрегате с плугом ПЛН-3-35 исследовались зависимости максимальных ординат $y_{\max}$ и длины L кривой траектории от скорости движения в повороте v . Замеры производились для траекторий, полученных при скоростях, соответствующих I, II, III и IV передачам движения трактора, при номинальной частоте вращения двигателя с базовой и экспериментальной рулевыми трапециями.

Анализ графиков, приведенных на рисунке 17, показывает, что для пахотного агрегата по сравнению с одиночным трактором происходит увеличение значений максимальных ординат $y_{\max}$ и длины L кривой траектории в среднем на 3,7 %. Так, для одиночного трактора при скорости $v = 2,014$ м/с и базовой трапеции максимальная ордината $y_{\max} = 9,1$ м, а для пахотного агрегата – $y_{\max} = 9,44$ м. В опытах с модернизированной трапецией для одиночного трактора и пахотного агрегата такая тенденция сохраняется. При той же скорости $v = 2,014$ м/с для одиночного трактора максимальная ордината $y_{\max} = 8,3$ м, а для пахотного агрегата – $y_{\max} = 8,6$ м. Применение экспериментальной трапеции позволяет уменьшить максимальную ординату кривой траектории при движении в повороте пахотного агрегата до $y_{\max} = 8,6$ м с $y_{\max} = 9,44$ м для базовой трапеции (на 9,8 %).

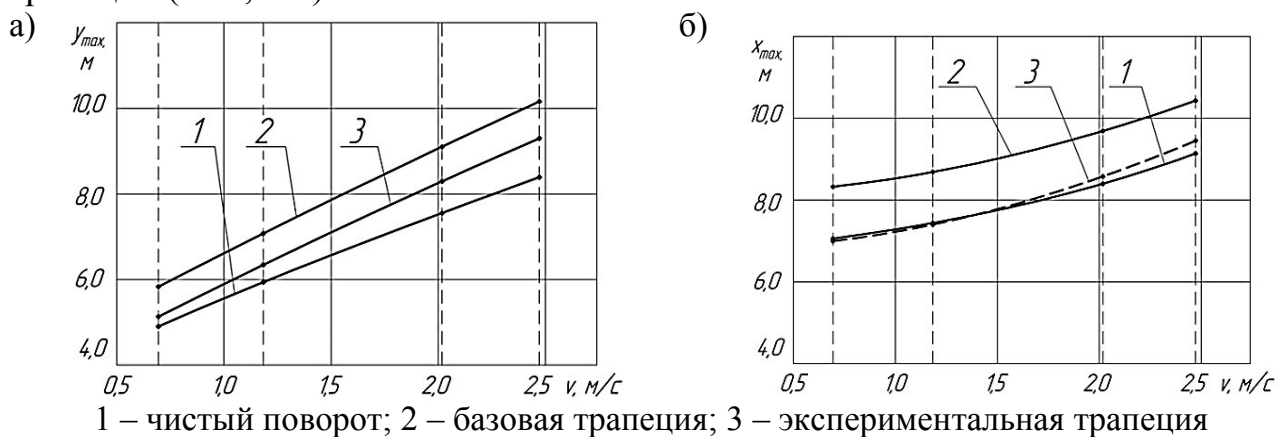
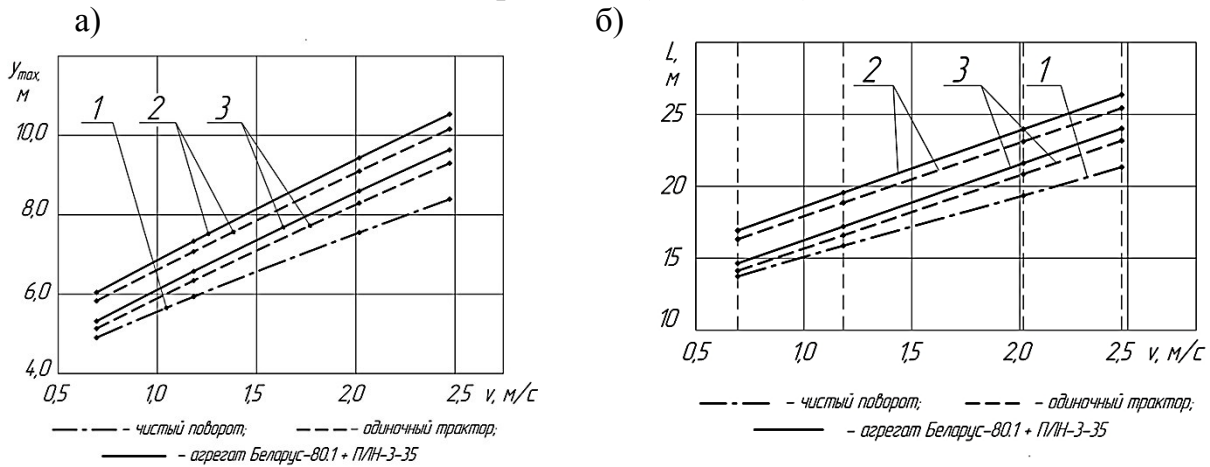


Рисунок 16 – Графики зависимости ординаты $y_{\max}$ (а) и поперечной координаты $x_{\max}$ (б) кривой траектории, описываемой кинематическим центром трактора на поворотной полосе, от скорости движения при $B = 1,22$ м и $t = 4$ с

Это характерно и для посевного агрегата. Длина кривой L траектории движения в повороте для посевного агрегата увеличивается по сравнению с одиночным трактором. Для одиночного трактора при скорости $v = 2,014$ м/с и базовой трапеции длина кривой траектории $L = 27,5$ м, а для посевного агрегата – $L = 29,8$ м.

В опытах с экспериментальной трапецией для одиночного трактора и посевного агрегата при скорости $v = 2,014$ м/с для одиночного трактора длина

кривой траектории движения в повороте $L = 20,9$ м, а для посевного агрегата – $L = 22,9$ м. Применение экспериментальной трапеции позволяет уменьшить длину кривой траектории при движении в повороте посевного агрегата до $L = 22,9$ м с $L = 29,8$ м для базовой трапеции (на 23,2 %).



1 – правильный поворот; 2 – базовая трапеция; 3 – опытная трапеция

Рисунок 17 – Зависимости максимальных ординат $y_{\max}$ (а) и длины L (б) кривой траектории от скорости движения при $B = 1,22$ м и $t = 4$ с

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что предложенные аналитические зависимости для расчета параметров траектории криволинейного движения МТА достоверно описывают процесс криволинейного движения МТА. Расхождения между теоретическими и опытными значениями искомых параметров составляют не более 3%.

В пятом разделе «Экономическая эффективность применения модернизированной рулевой трапеции на тракторе Беларус-80.1» выполнена оценка эффективности применения модернизированной рулевой трапеции на тракторе Беларус-80.1. Экономический эффект получается за счет уменьшения длины траектории движения МТА на поворотной полосе и повышения производительности ввиду сокращения времени, необходимого для выполнения технологической операции, при сопоставлении затрат от использования модернизированной навесной системы по сравнению с базовым вариантом.

Установлено, что внедрение предложенной конструкции рулевой трапеции трактора экономически целесообразно, так как позволяет получить годовой экономический эффект в размере 16370 рублей, срок окупаемости инвестиций составляет 0,69 года, что значительно меньше срока службы трактора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный обзор, анализ и обобщение результатов исследований в области совершенствования систем рулевого управления колесных машин позволили установить, что изменение шкворневой колеи трактора приводит к искажению заложенных конструктивно соотношений между углами поворота внутреннего и наружного управляемых колес, и соответственно нарушению исходной кинематики криволинейного движения. Обосновано, что одним из путей повышения устойчивости криволинейного движения трактора является обеспечение режима качения управляемых колес максимально близкого к чистому качению за счет изменения угловых координат боковых рычагов рулевой трапеции при регулировании колеи.

2. Предложенная методика аналитического исследования кинематики

действительного поворота колесной машины позволила обосновать рациональные геометрические параметры рулевой трапеции трактора Беларус-80.1 при изменении колеи и предложить конструкцию боковых рычагов рулевой трапеции, предусматривающую изменение их углов наклона к продольной оси трактора за счет перестановки пальцев крепления шарниров поперечной тяги по соответствующим отверстиям указанных рычагов.

3. Выявлено, что при увеличении шкворневой колеи трактора Беларус-80.1 с 1,22 м до 1,42 м при угле поворота внутреннего управляемого колеса 25° минимальный радиус поворота, реализуемого базовой рулевой трапецией, увеличивается на 1,39 м или на 15,41 %. По сравнению с правильным поворотом он увеличивается на 1,94 м (25,45 %) при шкворневой колее 1,22 м, и на 3,234 м (35,83 %) – при шкворневой колее 1,42 м. Для рулевой трапеции с рекомендуемыми геометрическими параметрами при увеличении шкворневой колеи трактора с 1,22 м до 1,42 м при том же угле поворота внутреннего управляемого колеса минимальный радиус поворота фактически остается неизменным, уменьшаясь всего на 0,03 м (0,48 %). По сравнению с правильным поворотом для этой трапеции минимальный радиус увеличивается на 0,54 м (9,53 %) при шкворневой колее 1,22 м, и на 0,41 м (7,13 %) – при шкворневой колее 1,42 м. При тех же условиях рулевая трапеция с рекомендуемыми геометрическими параметрами по сравнению с базовой позволяет уменьшить минимальный радиус поворота на 1,4 м (18,3 %) при шкворневой колее 1,22 м, и на 2,82 м (31,3%) – при шкворневой колее 1,42 м.

4. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение модернизированной трапеции при изменении шкворневой колеи на всем интервале углов поворота внутреннего управляемого колеса обеспечивает меньшие радиусы поворота по сравнению с базовой. Так, при угле поворота внутреннего управляемого колеса 20° и шкворневой колее 1,22 м для базовой трапеции опытное значение минимального радиуса поворота составляет 10,76 м, а для модернизированной трапеции – 8,64 м. Применение модернизированной рулевой трапеции на тракторе Беларус-80.1 позволяет приблизить действительную траекторию движения МТА к требуемой. С увеличением скорости движения в повороте как одиночного трактора Беларус-80.1, так и различных МТА на его базе приводит к возрастанию геометрических характеристик опытной траектории движения кинематического центра трактора. Однако, при увеличении скорости движения в повороте с 0,694 м/с до 2,472 м/с для базовой трапеции продольная координата увеличивается с 5,83 м до 10,16 м, а для модернизированной – с 5,13 м до 9,29 м. Длина траектории поворота при этом для базовой трапеции увеличивается с 16,33 м до 25,44 м, а для модернизированной рулевой трапеции такое увеличение происходит с 14,14 м до 23,17 м.

5. Установлено уменьшение предельных значений ординаты кривой траектории до 9,06 м с 10,8 м (на 16,1%) и длины траектории поворота до 22,9 м с 29,8 м (на 23,2 %) для посевного агрегата на базе трактора Беларус-80.1 с модернизированной рулевой трапецией в сравнении с аналогичным агрегатом на базе трактора Беларус-80.1 с базовой трапецией. При использовании модернизированной рулевой трапеции производительность посевного агрегата увеличивается в среднем на 2%.

6. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что предложенные аналитические зависимости для расчета параметров траектории криволинейного движения МТА достоверно описывают

процесс его криволинейного движения. Расхождения между теоретическими и опытными значениями искомых параметров составляют не более 3%.

7. Экономический эффект от применения модернизированной рулевой трапеции на тракторе Беларус-80.1 получается в результате снижения расхода топлива за счет уменьшения длины траектории движения МТА на поворотной полосе и повышения производительности ввиду сокращения времени, необходимого для выполнения технологической операции. Годовой экономический эффект для посевного агрегата Беларус-80.1+ТСМ-4150А при выполнении работы на площади 50 га составляет 16370 рублей. Срок окупаемости инвестиций – 0,69 года, что значительно меньше срока службы трактора.

8. Полученные результаты диссертационной работы внедрены в производство (приложения А и Б) и используются в учебном процессе (приложение В), и позволяют рекомендовать применение модернизированной рулевой трапеции (патенты на полезные модели № 224040 РФ и № 225960 РФ) в системе рулевого управления колесного трактора для повышения устойчивости криволинейного движения МТА при изменении колеи трактора.

9. Перспективы дальнейшей разработки темы – это исследования по бесступенчатому изменению углового положения точки крепления пальцев шарниров поперечной тяги на боковых рычагах рулевой трапеции при регулировании колеи колесного трактора.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в Российских журналах, включенных в перечень ВАК

1. Обоснование геометрических параметров рулевой трапеции колесной машины / А.Н. Беляев, В.И. Оробинский, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 16, № 2(77). – С. 116-123.

2. Методика аналитического определения действительной траектории поворота колесной машины / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, П.В. Шередекин, И.А. Высоцкая // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 16, № 3(78). – С. 151-158.

3. Влияние жесткости навесной системы на устойчивость криволинейного движения машинно-тракторного агрегата / А.Н. Беляев, Д.Н. Афоничев, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, П.В. Шередекин, И.А. Высоцкая // Наука в Центральной России. – 2023. – № 2(62). – С. 115-126.

4. Согласование геометрических и кинематических характеристик криволинейного движения транспортного средства / А.Н. Беляев, В.И. Оробинский, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин, А.Е. Новиков // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2024. – Т. 17, № 1(80). – С. 94-101.

5. Определение положения мгновенного центра поворота и радиуса поворота при изменении ширины колеи колёсного трактора / А.Н. Беляев, В.И. Оробинский, А.В. Химченко, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин // Наука в Центральной России. – 2024. – № 3(69). – С. 73-84.

6. Согласование геометрических характеристик фактического поворота колёсной машины / А.Н. Беляев, В.И. Оробинский, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин, А.М. Мухин // Наука в Центральной России. – 2024. – № 5(71), – С. 105-112.

7. Математическое моделирование бокового скольжения колесной машины при повороте / А.Н. Беляев, Д.Н. Афоничев, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин // Наука в Центральной России. – 2024. – № 5(71). – С. 113-128.

8. Исследование кинематики поворота колесной машины с изменяемой колеей /

А.Н. Беляев, А.В. Химченко, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин // Тракторы и сельхозмашины. – 2024. – Т. 91, № 5. – С. 542-552.

9. Обоснование рациональной геометрии рулевой трапеции транспортного средства с изменяемой колеей / А.Н. Беляев, В.И. Оробинский, А.В. Химченко, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин // Наука в Центральной России. – 2025. – № 1(73). – С. 43-55.

Патенты

10. Патент на полезную модель № 217686 U1 РФ, МПК В62D 7/14, В62D 12/00. Рулевая система поворота транспортного средства / А.Н. Беляев, В.Д. Бурдыкин, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, П.В. Шередекин, И.А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2023105280; заявл. 07.03.2023; опубл. 12.04.2023. – Бюл. № 11. – 7 с.

11. Патент на полезную модель № 217687 РФ, МПК В62D 7/14, В62D 12/00. Рулевая система поворота шарнирно-сочлененного транспортного средства / А.Н. Беляев, В.Д. Бурдыкин, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин, И.А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2023105281; заявл. 07.03.2023; опубл. 12.04.2023. – Бюл. № 11. – 9 с.

12. Патент на полезную модель № 223125 РФ, МПК В62D 53/04. Устройство для соединения полурам сочлененного транспортного средства / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, В.В. Шередекин, П.В. Шередекин, И.А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2024100138; заявл. 24.10.2023; опубл. 01.02.2024. – Бюл. № 4. – 4 с.

13. Патент на полезную модель № 224040 РФ, МПК В62D 7/16. Рулевая трапеция колесного транспортного средства с изменяемой колеей / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2024100138; заявл. 09.01.2024; опубл. 13.03.2024. – Бюл. № 8. – 6 с.

14. Патент на полезную модель № 225960 РФ, МПК В62D 7/16, 7/00. Рулевая трапеция колесного транспортного средства с изменяемой колеей / А.Н. Беляев, П.В. Шередекин, Т.В. Тришина, А.В. Химченко, А.М. Мухин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2024108708; заявл. 02.04.2024; опубл. 15.05.2024. – Бюл. № 14. – 7 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612456 РФ. Программа расчета, построения и сравнения теоретической и действительной траекторий кругового беспетлевого поворота колесной машины / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, П.В. Шередекин, И.А. Высоцкая; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2023611594; заявл. 03.02.2023; опубл. 03.02.2023.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617466 РФ. Аналитическое и численное сравнительное исследование кинематики трактора с переменной колеей для чистого поворота и кинематики, обеспечиваемой возможностями рулевой трапеции / А.Н. Беляев, А.В. Химченко, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин, А.М. Мухин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2024616558; заявл. 02.04.2024; опубл. 02.04.2024.

Статьи в материалах научных конференций

17. Беляев А.Н. Методика исследования кинематики поворота колесной машины / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции (Россия, Воронеж, 20 февраля 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 101-106.

18. Беляев А.Н. Методика определения момента сопротивления повороту колесной машины / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, П.В. Шередекин // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-

практической конференции (Россия, Воронеж, 20 февраля 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 106-110.

19. Беляев А.Н. Основные типы систем рулевых управлений автомобилей / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, П.В. Шередкин // Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения: материалы всероссийской научно-технической конференции (Россия, Воронеж 12 апреля 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 2023. – С. 24–32.

20. Шередкин П.В. Рулевая трапеция колесной машины / А.С. Зенин, П.В. Шередкин, А.Н. Беляев // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 74-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов (Россия, Воронеж, 1 апреля – 31 мая 2023 года). – Ч. VI. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 13-16.

21. Беляев А.Н. Рулевое управление колесных тракторов / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, П.В. Шередкин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции (Россия, Воронеж, 06 – 07 июня 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 427-436.

22. Основные геометрические параметры рычажного механизма рулевой трапеции транспортного средства / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, П.В. Шередкин, И.А. Высоцкая // Актуальные вопросы физико-математических и технических наук в свете современных исследований АПК: материалы национальной научно-практической конференции (Россия, Воронеж, 23 октября 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 109-114.

23. Беляев А.Н. Обоснование геометрических параметров рулевой трапеции транспортного средства с изменяемой колеей / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, П.В. Шередкин // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы международной научно-практической конференции (Россия, Воронеж, 30 ноября 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 8-11.

24. Шередкин П.В. Рулевая система поворота транспортного средства / П.В. Шередкин, А.М. Мухин, А.Н. Беляев // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 75-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов (Россия, Воронеж, 15 февраля – 31 марта 2024 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 192-196.

Просим принять участие в работе диссертационного совета 35.2.008.01 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю Афонищеву Д.Н. Телефон: +7(473)224-39-39 (доб. 3320), e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 20.10.2025 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ № 27759.

Типография ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.