

На правах рукописи



НОВИКОВ Алексей Евгеньевич

**УЛУЧШЕНИЕ ПОВОРАЧИВАЕМОСТИ
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ЗАДНЕЙ НАВЕСНОЙ СИСТЕМЫ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

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 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники»;
Сенькевич Сергей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, 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 04 июля 2024 г. в 13 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=11412>.

Автореферат разослан 15 мая 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы в Российской Федерации наблюдается тенденция роста посевных площадей сельскохозяйственных культур, поэтому увеличивается потребность в технике для возделывания сельскохозяйственных угодий, что в свою очередь является фактором стимулирования спроса на качественную сельскохозяйственную технику.

Для возделывания земель используются тракторы с различными типами присоединения к ним рабочего оборудования. Навесное оборудование является наиболее эффективным в работе, так как имеет преимущества в сравнении с другими типами оборудования.

Однако, при агрегатировании сельскохозяйственного оборудования на задней навесной системе трактора при криволинейном движении происходит увеличение инерционных сил, возникающих в ней, эти силы способствуют смещению машинно-тракторного агрегата (МТА) с требуемой траектории, происходит занос задней оси трактора, вследствие чего увеличиваются радиус поворота, расход топлива, количество воздействий оператора на органы управления, ухудшается его психофизическое состояние, что крайне отрицательно влияет на качество выполнения технологической операции и производительность агрегата.

Одним из имеющихся направлений расширения посевных площадей является освоение неиспользуемых в настоящее время многопрофильных полей малых и средних размеров, на которых суммарный путь на поворотной полосе может достигать 40 %. Следовательно, в целях обеспечения требуемого качества выполнения сельскохозяйственных работ и сохранения высокого уровня ресурсосбережения необходимо улучшение такого показателя как поворачиваемость трактора.

В связи с выше изложенным, научные исследования, направленные на улучшение управляемости и повышение устойчивости трактора с задним навесным оборудованием, и тем самым на рациональное использование ресурсов, сохранение плодородия почвы и увеличение урожайности сельскохозяйственных культур, **являются актуальными**, имеющими важное значение для развития сельского хозяйства.

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. В настоящее время накоплено достаточное количество теоретического и экспериментального материала по исследованию устойчивости и управляемости при криволинейном движении сельскохозяйственных агрегатов с прицепными средствами, которые успешно используются конструкторами при разработке новых агрегатов, а производителями – для рациональной эксплуатации машинно-тракторного парка. Огром-

ный вклад в изучение устойчивости и управляемости МТА внесли такие ученые, как Атаманов Ю.В., Беляев А.Н., Валюженич Р.Н., Ванцевич В.В., Гамаюнов П.П., Голованов Г.В., Гуськов В.В., Гячев Л.В., Зенькович А.А., Коновалов В.В., Красильников В.Е., Кринко М.С., Лефаров А.Х., Метелицин И.И., Петрушов В.А., Полетаев А.Д., Скотников В.А., Трояновская И.П., Фаробин Я.Е., Ярмашевич Ю.И., Яцкевич В.В., а также другие отечественные и зарубежные ученые. Однако процесс криволинейного движения трактора с задним навесным оборудованием исследован недостаточно. Практически не изучены методы и способы снижения влияния инерционных нагрузок со стороны навесного оборудования на поворачиваемость МТА.

Поворачиваемость колесных МТА, особенно при повороте с малыми радиусами, исследована недостаточно. Как правило, исследованию подвергался лишь отдельно трактор при движении по кругу с низкими скоростями и достаточно большими радиусами кривизны траектории. Установлено, что навесное оборудование оказывает значительное влияние на кинематику и динамику поворота трактора, а также на физико-механические свойства почвы.

Анализ работ в области исследования криволинейного движения МТА показывает, что возможны два практических направления повышения устойчивости и улучшения управляемости колесного трактора в составе навесного МТА, одно из которых можно определить как технологическое, другое как конструктивное. Первое из них связано с выбором рационального способа движения МТА, а второе с внесением изменений в конструкцию МТА путем добавления упругих связей в различные узлы.

Исследования по применению упругодемпфирующих элементов в муфте сцепления, трансмиссии, движителях, механизмах навески, непосредственно в креплениях рабочих органов, проведенные Беляевым А.Н., Гамаюновым П.П., Корсаковым А.А., Кравченко В.А., Кривовым В.Г., Кузнецовым Н.Г., Макаровой Т.И., Нехорошевым В.А., Поливаевым О.И., Сенькевичем С.Е., Стороковым В.Л., Фоминым С.Д. и другими отечественными и зарубежными учеными показали их эффективность.

В результате исследований выявлено, что независимо от места установки упругого элемента с подобранными рациональными параметрами, учитывающими эксплуатационные и конструктивные характеристики МТА, упругий элемент позволяет снизить интенсивность и величины ударных и переменных нагрузок на детали двигателя, муфты сцепления, трансмиссии, уменьшить буксование движителей, колебания внешней нагрузки и частоты вращения двигателя, снизить расход топлива и повысить производительность.

Исходя из анализа ранее выполненных исследований криволинейного движения тракторов и МТА, выдвинута **научная гипотеза**: так как силовое воздействие на колеса трактора со стороны навесного оборудования передается через продольные тяги, то уменьшение величин крутящих моментов и более равномерное их распределение по колесам возможно за счет введения упругой связи в местах сочленения трактора с навесным оборудованием.

Объектом исследования является процесс криволинейного движения трактора с задним навесным оборудованием.

Предмет исследования: закономерности изменения кинематических и динамических характеристик при криволинейном движении трактора с задним навесным оборудованием.

Цель работы: повышение устойчивости криволинейного движения МТА на базе колесного трактора путем совершенствования задней навесной системы.

Задачи исследования:

- усовершенствовать конструкцию задней навесной системы за счет применения упругого элемента в устройстве присоединения навесного оборудования к трактору;
- разработать методику аналитического представления действительной траектории криволинейного движения МТА и программные модули для расчета эксплуатационных параметров, кинематических и динамических характеристик МТА и выбора их рациональных величин;
- определить корректирующий коэффициент сдвига теоретической траектории при использовании упругого элемента в навесной системе трактора;
- провести сравнительные экспериментальные исследования по определению кинематических и динамических параметров при криволинейном движении МТА с базовой и модернизированной навесными системами.

Научной новизной обладают:

- полученные в параметрической форме уравнения для определения текущих координат теоретической криволинейной траектории движения кинематического центра колесного трактора при входе в поворот, отличающиеся тем, что включают конструктивные и эксплуатационные характеристики МТА;
- установленная аналитическая зависимость для описания кривой действительной траектории поворота МТА, отличающаяся тем, что получена путем умножения функций траекторий участков входа в поворот и установившегося поворота теоретической траектории на корректирующий коэффициент сдвига, учитывающий использование упругого элемента в навесной системе трактора;
- разработанные программные модули для расчета эксплуатационных параметров, кинематических и динамических характеристик МТА и выбора их рациональных величин, отличающиеся реализацией положений предложенной методики аналитического представления действительной траектории криволинейного движения МТА;
- экспериментально определенные зависимости ускорения в базовых точках навесного оборудования и усилия в тягах заднего навесного устройства трактора от поступательной скорости движения МТА при повороте, отличающиеся тем, что учитывают влияние упругого элемента, расположенного в месте соединения охватывающей рамки оборудования и охватываемой рамки навесной системы трактора.

Теоретическую значимость представляют полученные в параметрической форме уравнения для определения текущих координат криволинейной траектории движения кинематического центра колесного трактора при входе в поворот, которые позволяют провести расчет значений координат, а методом

нелинейной аппроксимации массива этих координат – выбрать для траектории функцию явного вида; аналитическая зависимость для описания кривой траектории поворота МТА, которая дает возможность рассчитать отклонения агрегата от заданной траектории при выполнении маневра поворота, дополняющая теорию криволинейного движения МТА.

Практическую значимость имеют усовершенствованная конструкция задней навесной системы, позволяющая улучшить поворачиваемость МТА, снизить ускорения в базовых точках навесного оборудования и усилия в тягах заднего навесного устройства трактора при повороте; программные модули, которые позволяют выполнить расчет и выбор рациональных величин эксплуатационных параметров, кинематических и динамических характеристик навесного МТА в автоматизированном режиме на персональном компьютере.

Методология и методы исследования. Аналитическое описание процесса криволинейного движения МТА выполнено на основе положений теоретической механики и методов математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены по апробированным методикам на тракторе Беларус-1221.2 с усовершенствованной задней навесной системой и навесным оборудованием (плуг ПЛН-4-35, сеялка СТВ-12) в полевых условиях. Измерения выполняли сертифицированными и поверенными приборами, результаты регистрировались в памяти персонального компьютера посредством программного обеспечения Lgraph2. При проведении расчетов и обработке результатов эксперимента использовали современные компьютеры и применяли программное обеспечение: Microsoft Excel, Mathcad, Maple.

Положения, выносимые на защиту:

- параметрические уравнения, позволяющие определить текущие координаты теоретической криволинейной траектории движения кинематического центра колесного трактора при входе в поворот в зависимости от конструктивных и эксплуатационных характеристик МТА;
- методика аналитического представления действительной траектории поворота МТА, связывающая ее с теоретической траекторией корректирующим коэффициентом сдвига и позволяющая оценить боковое отклонение МТА от требуемой траектории движения и повысить точность расчетов;
- программные модули для расчета эксплуатационных параметров, кинематических и динамических характеристик МТА и выбора их рациональных величин, позволяющие выполнять эти расчеты на персональном компьютере с высокой производительностью и точностью в автоматизированном режиме;
- результаты экспериментальных исследований, позволяющие оценить влияние динамического воздействия со стороны заднего навесного оборудования на поворачиваемость МТА и эффективность использования упругого элемента в устройстве присоединения навесного оборудования к трактору.

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 предложенных математических моделей и не противоречит фактам, известным из специальной литературы.

Разработанная научно-техническая документация, опытные образцы модернизированной конструкции задней навесной системы и системы автоматизированного рулевого управления используются на сельскохозяйственных предприятиях Воронежской области ООО НПКФ «Агротех-Гарант Березовский» и ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений». Результаты, полученные в диссертации, используются в учебном процессе агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ по направлению подготовки бакалавров 35.03.06 «Агроинженерия» и направлению магистерской подготовки 35.04.06 «Агроинженерия».

Основные положения работы доложены и обсуждены на ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (2019–2023 годы), на студенческой научной конференции (г. Воронеж, 2020 г.), на международных научно-практических конференциях (г. Воронеж, 2021, 2022 годы), на национальных научно-практических конференциях (г. Воронеж, 2019–2023 годы).

Личный вклад соискателя заключается в определении цели и задач исследования, выборе методов исследований, в разработке и реализации модернизированной конструкции задней навесной системы, проведении экспериментов и анализе полученных результатов, выполненных лично автором; в обосновании новых технических решений, выводе формул и разработке методики для определения кинематических характеристик криволинейного движения трактора, создании алгоритмов расчета кинематических и динамических характеристик криволинейного движения трактора, формулировке выводов, выполненных при участии автора; подготовке научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 научных работ, в том числе пять статей в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы материалы диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, четыре патента на полезные модели и четыре свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, включающих 42 рисунка и девять таблиц, заключения, списка литературы из 164 наименований, восьми приложений. Объем диссертации – 173 страницы.

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 навесных машинно-тракторных агрегатов» выполнен анализ конструкций навесных систем, дана оценка влияния навесного оборудования на процесс криволинейного движения МТА, проведен обзор известных исследований поворачиваемости колесных машин, приведены критерии ее оценки.

Наиболее востребованной в настоящее время схемой комплектации МТА на базе колесных тракторов является задняя трехточечная навеска оборудования, обеспечиваемая автоматическим сцепным устройством. Основным способом движения указанного МТА на поворотной полосе является круговой беспетлевой поворот, поэтому он должен лежать в основе теоретических и экспериментальных исследований. Наиболее объективную оценку поворачиваемости дает характер изменения ширины и высоты поворотной полосы. При этом боковое отклонение трактора или МТА от требуемой траектории движения следует оценивать по методике, которая рассматривает его как единый объект.

Анализ работ в области исследования криволинейного движения МТА показал, что одним из перспективных направлений стабилизации нагрузочных режимов, повышения устойчивости и улучшения управляемости является введение упругих звеньев в отдельные механизмы трактора или агрегируемого с ним оборудования. Наиболее фундаментальные исследования в этой области связаны с введением упругих связей в тягово-сцепное устройство в тракторно-транспортном агрегате между трактором и прицепом.

Исходя из сказанного, важнейшим направлением улучшения поворачиваемости МТА является снижение динамических нагрузок на него со стороны навесного оборудования, что позволит также увеличить производительность агрегата, повысить тягово-сцепные свойства, уменьшить энергетические затраты на передвижение трактора и нормальное давление движителя на почву, что ограничит воздействие на ее структуру и физико-механические свойства.

Во втором разделе «Теоретическая оценка кинематических характеристик криволинейного движения машинно-тракторного агрегата» предложена методика определения теоретической и действительной траекторий криволинейного движения МТА.

Параметрические уравнения движения кинематического центра для участка «вход в поворот» имеют вид (рисунок 1):

$$x(t) = -v \int \sin \frac{v \ln(\cos \omega t)}{L \omega} dt; \quad (1)$$

$$y(t) = v \int \cos \frac{v \ln(\cos \omega t)}{L \omega} dt, \quad (2)$$

где v – скорость поступательного движения трактора, м/с;

$\omega = \alpha/t$ – угловая скорость поворота управляемых колес трактора, с⁻¹;

α – угол поворота управляемых колес, град.;

t – время поворота управляемых колес, с;

L – база трактора, м.

«Склейка» функции явного вида, полученной на основе аппроксимации массива данных (1) и (2) с окружностью радиуса R_T участка установившегося

поворота даёт кусочно-гладкую функцию, представляющую собой теоретическую траекторию поворота трактора до его максимальной ординаты

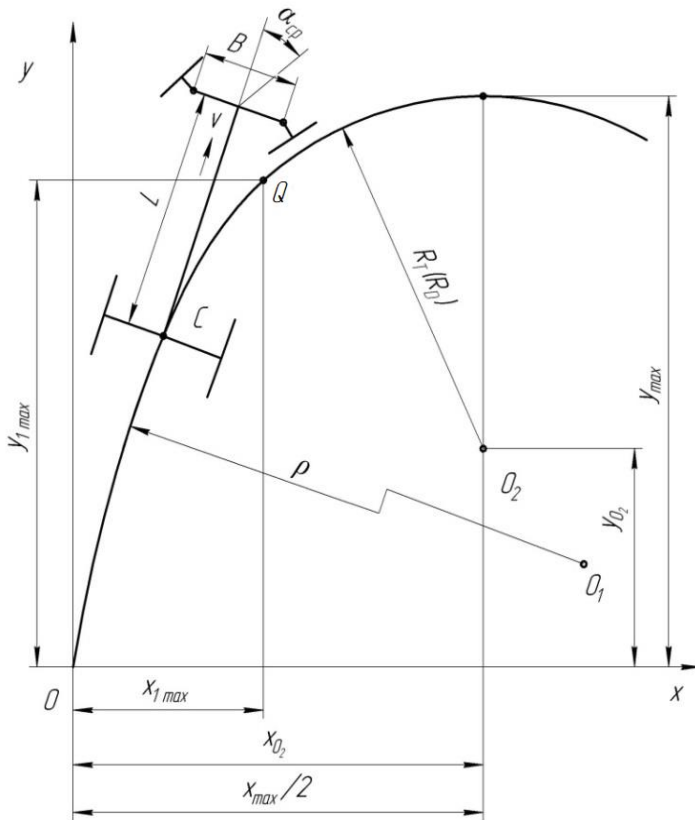


Рисунок 1 – Расчетная кинематическая схема криволинейного движения колесного трактора

$$y(x) = \begin{cases} f_1(x), & x \leq x_Q; \\ f_2(x), & x > x_Q, \end{cases}$$

где x_Q – максимальная абсцисса участка «вход в поворот», м.

Для колесного трактора Беларус-1221.2 при $v = 2,556$ м/с, $\omega = 0,155$ с⁻¹, $L = 2,78$ м, $\alpha_{max} = 0,62$ рад. явная аппроксимирующая (1) и (2) функция участка входа в поворот принимает следующий вид

$$y_B(x) = 6,445x^{0,33} - 0,0848x^{1,932}. \quad (3)$$

График функции (3), представленный на рисунке 2, и координаты точек, полученные по зависимостям (1) и (2), показывают практически их полное соответствие.

Радиус траектории постоянной кривизны участка установившегося поворота, описываемой функцией (3), определяется по формуле

$$\rho(x) = \frac{\left(1 + \left[\frac{dy(x)}{dx}\right]^2\right)^{1,5}}{\left|\frac{d^2y(x)}{dx^2}\right|} = \frac{\left(1 + \left(\frac{2,128}{x^{0,67}} - 0,164x^{0,932}\right)^2\right)^{1,5}}{-\frac{1,425}{x^{1,67}} - \frac{0,153}{x^{0,068}}}. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4), кусочно-гладкая функция теоретической траектории поворота определяется системой (рисунок 3):

$$y_{II} = \begin{cases} 6,445x^{0,33} - 0,085x^{1,932}, & x \leq 3,643; \\ 5,168 + \sqrt{15,163 - (x - 4,924)^2}, & x > 3,643. \end{cases} \quad (5)$$

Исследованию подвергается только левая ветвь траектории выбранного вида поворота, для правой ветви будем считать траекторию абсолютно «зеркальной» левой ветви.

Корректность выполненных действий по аппроксимации исходных параметрических функций (1) и (2) доказывает тот факт, что в конце участка «вход в поворот» – начале участка «установившийся поворот» теоретический радиус кривизны траектории $R_T = 3,894$ м, а полученный по формуле (4) – $\rho(x) = 3,899$ м.

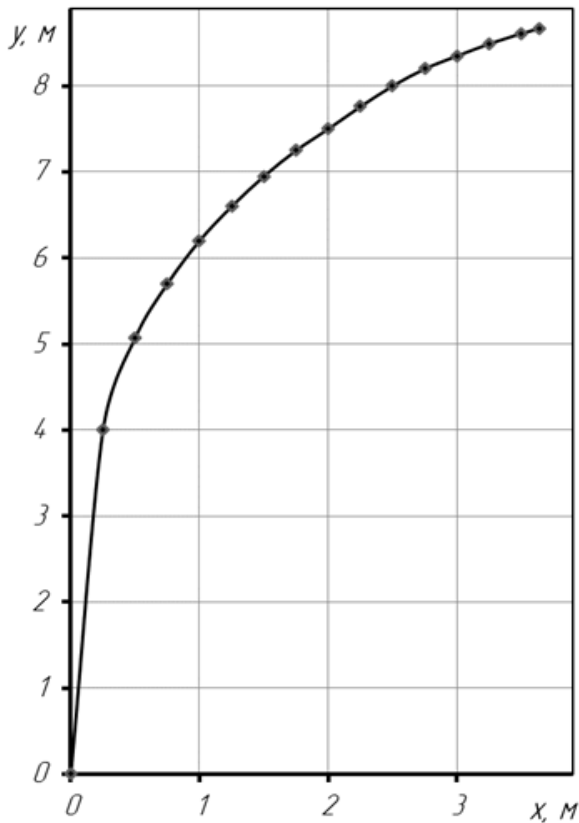


Рисунок 2 – График теоретической функции $y(x)$ и координаты точек $x(t)$ и $y(t)$ кривой траектории входа в поворот при $v = 2,556$ м/с, $\omega = 0,155$ с⁻¹

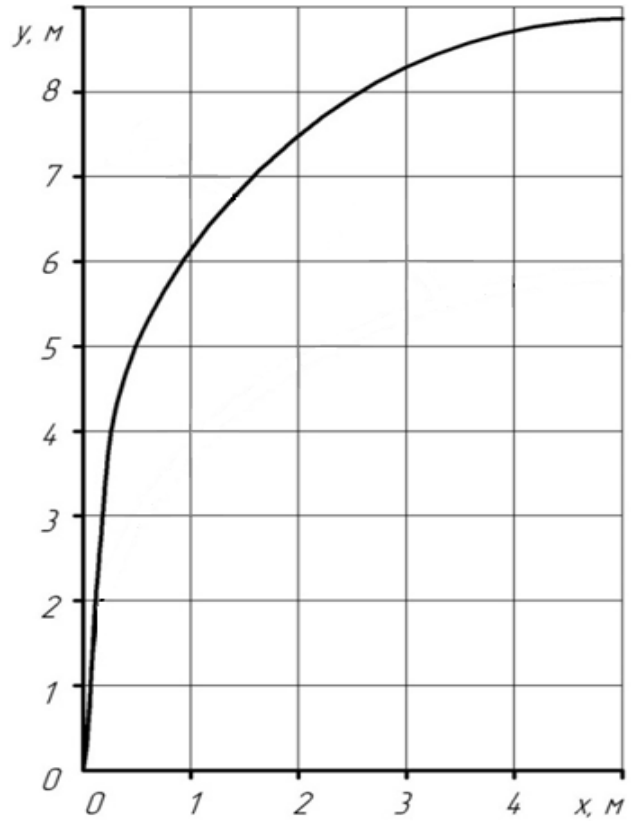


Рисунок 3 – График теоретической функции кривой траектории входа в поворот и установившегося поворота при $v = 2,556$ м/с, $\omega = 0,155$ с⁻¹

На основании анализа и сравнения экспериментального массива точек абсцисс и ординат кинематического центра, полученных для агрегата, составленного по схеме Беларусь-1221.2+СТВ-12, а также массива теоретических абсцисс и ординат для аналитического получения действительной траектории был принят корректирующий коэффициент сдвига теоретической траектории $k=1,2$.

С учетом коэффициента k уравнение (3) действительной траектории входа в поворот для рассматриваемого варианта примет вид

$$y_B(x) = k y_B = 7,734x^{0,33} - 0,1018x^{1,932}. \quad (6)$$

Радиус окружности участка установившегося поворота с учетом (4) и коэффициента k будет равен

$$\rho(x) = \frac{(1 + k^2 y_x'^2)^{1,5}}{|k y_x''|} = \frac{\left(1 + \left(\frac{3,0643}{x^{0,67}} - 0,23x^{0,932}\right)^2\right)^{1,5}}{-\frac{1,71}{x^{1,67}} - \frac{0,184}{x^{0,068}}}. \quad (7)$$

Исходя из зависимостей (6) и (7) кусочно-гладкая функция, описывающая действительные траектории движения для рассматриваемых эксплуатационных параметров, будет иметь вид:

$$y_{II}(x) = \begin{cases} 7,734x^{0,33} - 0,1018x^{1,932}, & x \leq 3,643; \\ 8,043 + \sqrt{7,769 - (x - 4,717)^2}, & x > 3,643. \end{cases} \quad (8)$$

На рисунке 4 представлен график функции (8) с наложенными экспериментальными данными, отличие между которыми не превышает 2,5 %, что дает основание использовать предложенную методику для оценки криволинейного движения колесной машины.

Уменьшение силового воздействия на трактор со стороны навесного оборудования возможно посредством установки в места сочленения трактора и навесного оборудования упругих элементов из полиуретана, которые способны уменьшить более чем на 60 % прикладываемую к нему величину силы инерции (рисунок 5).

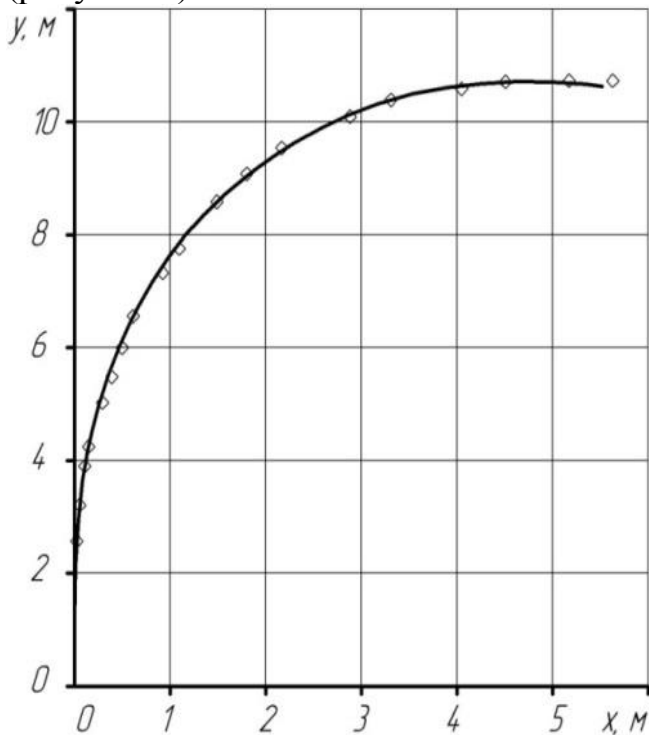


Рисунок 4 – Сравнение графика действительной траектории движения с экспериментальными данными при $v = 2,556 \text{ м/с}$, $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$

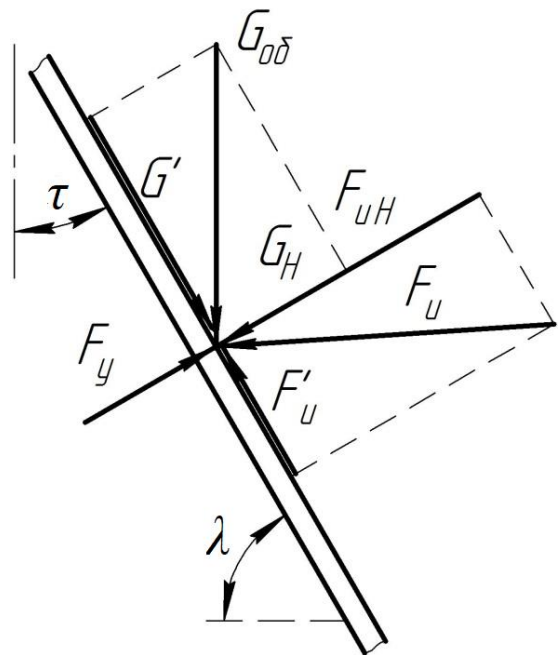


Рисунок 5 – Схема сил, действующих на боковую поверхность треугольника автосцепки

Сила, действующая на боковую поверхность треугольника автосцепки

$$F_n = m_{об} (a \cos \tau + g \cos \lambda),$$

где $m_{об}$ – масса навесного оборудования, кг;

a – боковое ускорение МТА, м/с^2 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

τ – половина угла вершины треугольника автосцепки, град.;

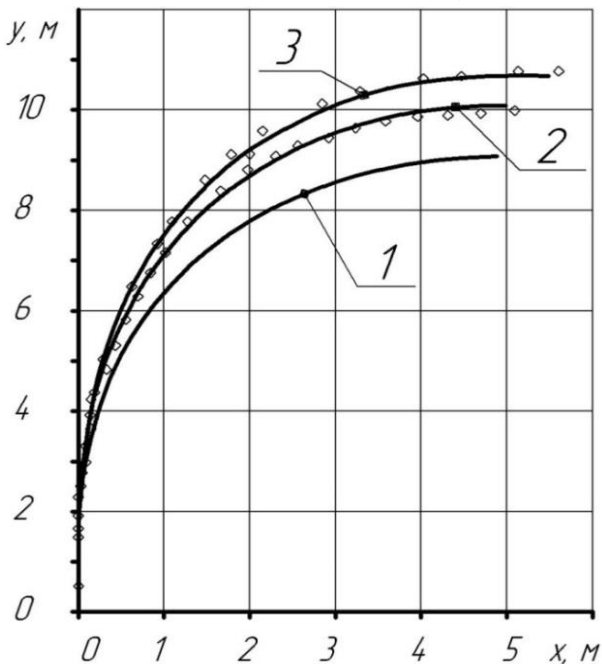
λ – угол между боковой поверхностью и основанием треугольника автосцепки, град.

На основании анализа и сравнения экспериментального массива точек абсцисс и ординат кинематического центра, полученных для вышеуказанного

агрегата с модернизированной навесной системой и при тех же эксплуатационных характеристиках, а также массива теоретических абсцисс и ординат для аналитического получения действительной траектории движения был принят корректирующий коэффициент сдвига теоретической траектории $k_y=1,12$.

С учетом коэффициента k_y получена кусочно-гладкая функция действительной траектории поворота, график которой показан на рисунке 6 (кривая 2):

$$y_{дп}(x) = \begin{cases} 7,218x^{0,33} - 0,095x^{1,932}, & x \leq 3,643; \\ 6,473 + \sqrt{13,221 - (x - 4,959)^2}, & x > 3,643. \end{cases}$$



◇ – экспериментальные точки траекторий поворота;

1 – график аппроксимирующей явного вида функции теоретической траектории поворота; 2 – график аппроксимирующей явного вида функции действительной траектории поворота (опытная навеска); 3 – график аппроксимирующей явного вида функции действительной траектории поворота (базовая навеска)

Рисунок 6 – Траектории поворота МТА при $v=2,556$ м/с, $\omega=0,155$ с⁻¹

Умножение на корректирующие коэффициенты 1,2 и 1,12 параметрических функций (1) и (2) и теоретического минимального радиуса поворота дали графики, практически совпадающие и с экспериментальными точками кривых траекторий, и с соответствующими графиками аппроксимирующих функций явного вида, что также доказывает корректность проведенных исследований.

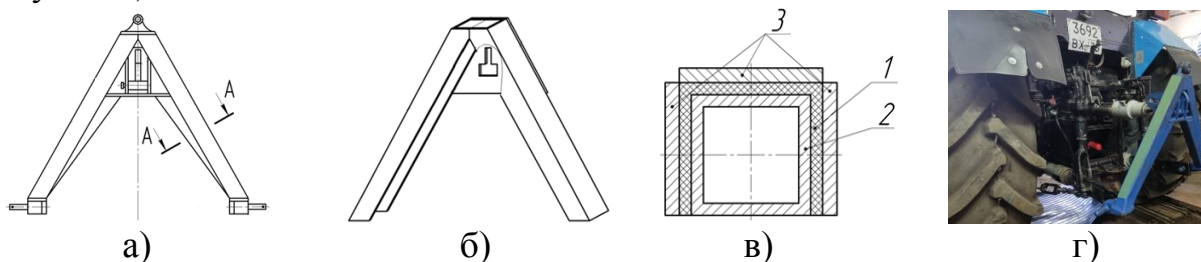
Анализ результатов расчетов подтвердил целесообразность использования упругих элементов в местах сочленения трактора с оборудованием, так как отклонение действительной траектории от теоретической при базовой комплектации по высоте поворотной полосы больше на 1,6...2,25 м, а при опытной – на 0,6...1,13 м, длина траектории поворота при этом уменьшается на 1,9...3,14 м. Выявленные значения коэффициентов сдвига 1,2 и 1,12 теоретической траектории от действительных являются постоянными для выбранной комплектации агрегата и условий движения.

В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований» разработаны методики лабораторных и полевых испытаний для получения необходимых опытных данных для моделирования процесса криволинейного движения МТА.

В качестве объекта испытаний выбран трактор класса 2 со всеми ведущими и передними управляемыми колесами Беларус-1221.2, который агрегатировался с плугом ПЛН-4-35 и сеялкой СТВ-12. Для определения степени влияния

навесного оборудования на поворачиваемость были поставлены также опыты с одиночным трактором.

В ходе испытаний трактор оборудовался модернизированной и серийной задней навесной системой. В модернизированной конструкции навесной системы между охватываемой навесной рамкой трактора и охватывающей навесной рамкой орудия размещена прокладка из упругого материала – полиуретана. Прокладка установлена на внешних охватываемых поверхностях треугольника (рисунок 7).



а – охватываемая рамка навесной системы; б – охватывающая рамка навесной системы; в – сечение А–А охватываемой рамки навесной системы; г – общий вид навесной системы на тракторе

Рисунок 7 – Усовершенствованная конструкция задней навесной системы трактора Беларус-1221.2

Схема траектории движения кинематического центра трактора при проведении экспериментальных исследований соответствовала круговому беспетлевому повороту, который лежит в основе методик при проведении испытаний на управляемость тракторов и автомобилей согласно действующим ГОСТам.

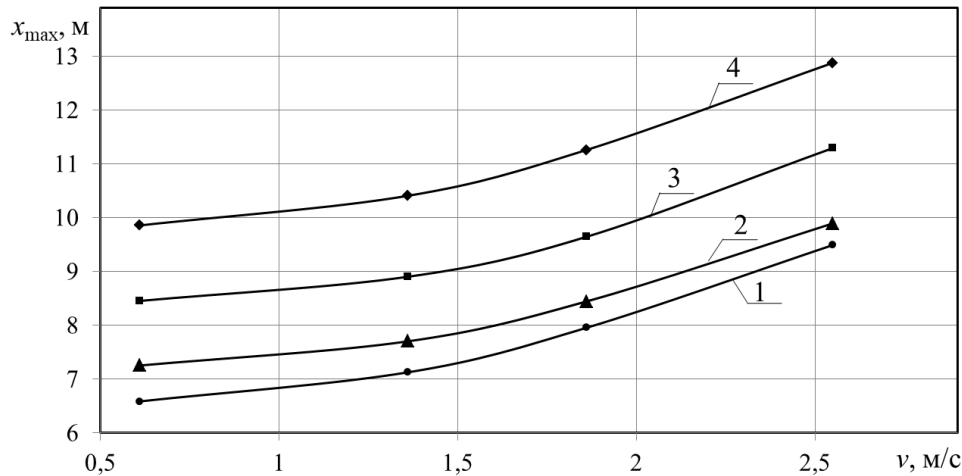
Для выполнения программы экспериментальных исследований на тракторе был смонтирован комплекс датчиков и регистрирующих устройств для контроля и фиксации величин необходимых параметров, среди которых: время опыта; линейные ускорения в базовых точках оборудования; усилия в продольных тягах навесного устройства трактора; 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 5 %.

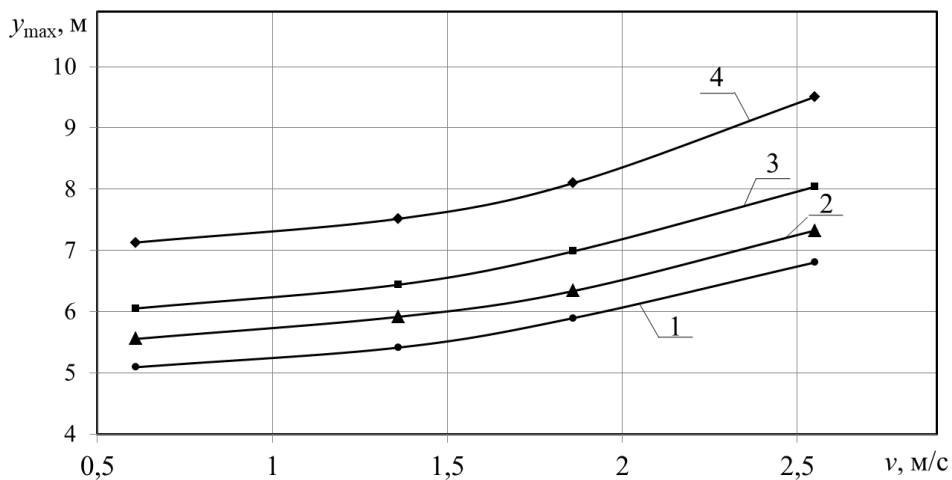
В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты и анализ экспериментальных исследований по применению модернизированной навесной системы на тракторе Беларус-1221.2.

Анализ графиков зависимостей предельных абсцисс x_{\max} и предельных ординат y_{\max} от скорости поступательного движения v одиночного трактора, МТА с базовой и модернизированной навесными системами в составе трактора Беларус-1221.2 и сеялки СТВ-12 при угловой скорости поворота $\omega=0,31 \text{ с}^{-1}$ управляемых колес показал, что заднее навесное оборудование оказывает значительное влияние на процесс криволинейного движения МТА (рисунки 8 и 9).

Отклонение в сторону увеличения действительной траектории навесного МТА Беларус-1221.2+СТВ-12 достигает 2,6...2,9 м (23,17...26,4 %) по оси x и 1,57...2,18 м (21,31...22,96 %) по оси y по сравнению с одиночным трактором.



1 – теоретическая траектория движения трактора;
 2 – действительная траектория движения трактора;
 3 – действительная траектории движения МТА (опытная навеска);
 4 – действительная траектория движения МТА (базовая навеска)
 Рисунок 8 – Графики зависимости абсциссы x_{max} от поступательной скорости движения v при $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$



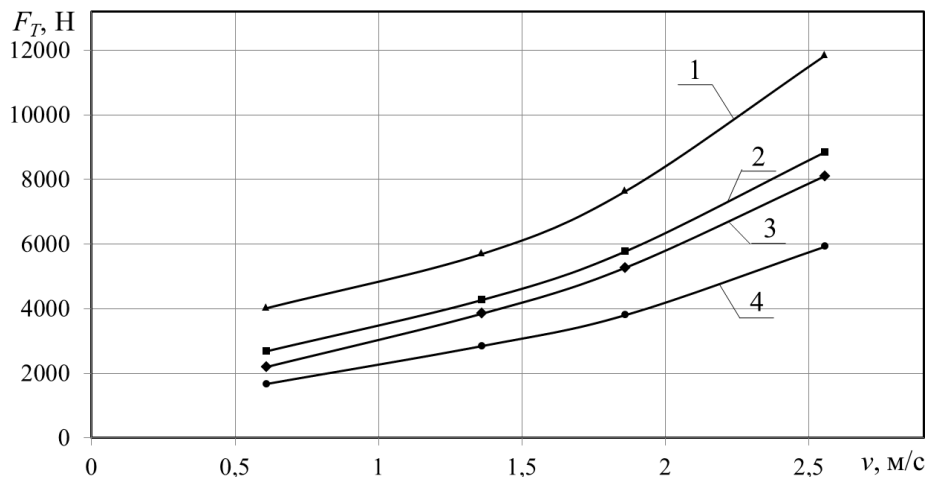
1 – теоретическая траектория движения трактора;
 2 – действительная траектория движения трактора;
 3 – действительная траектории движения МТА (опытная навеска);
 4 – действительная траектория движения МТА (базовая навеска)
 Рисунок 9 – Графики зависимости абсциссы y_{max} от поступательной скорости движения v при $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$

Применение опытной задней навесной системы трактора Беларус-1221.2 позволяет приблизить действительную траекторию движения МТА к требуемой. Получено уменьшение предельных значений абсциссы x_{max} на 1,4...1,61 м (12,3...14,45 %) и ординаты y_{max} на 1,08...1,47 м (13,77...15,45 %) поворотной

полосы для МТА с модернизированной навесной системой в сравнении с базовой.

Экспериментально доказано, что увеличение угловой скорости поворота управляемых колес приводит к возрастанию отклонений Δx_{\max} и Δy_{\max} от требуемой траектории движения, что обусловлено увеличением момента сопротивления повороту, основной составляющей которого является сила инерции, возникающая в местах соединения навесного оборудования и трактора.

На рисунке 10 показаны графики зависимостей усилия в тягах от скорости поступательного движения.



1 – базовая навесная система при $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$;

2 – базовая навесная система при $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$;

3 – модернизированная навесная система при $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$;

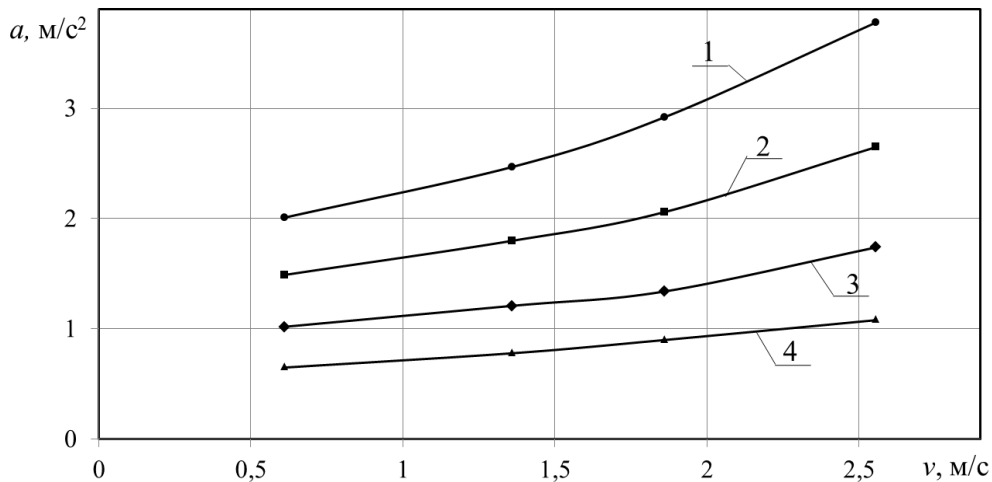
4 – модернизированная навесная система при $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$

Рисунок 10 – Графики зависимости усилия в тягах навесного устройства F_T от поступательной скорости движения v

Применение прокладки из полиуретана в конструкции задней навесной системы позволило снизить значение передаваемого от навесного оборудования на трактор усилия на 24...27 %.

Ввиду уменьшения усилия в тягах навесного устройства было зафиксировано снижение бокового ускорения в характерных точках навесного оборудования на 51...59 % (рисунок 11), что позволяет сделать вывод о повышении плавности хода МТА, снижении ударных нагрузок со стороны навесного оборудования на трактор.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтвердили целесообразность применения модернизированной навесной системы, так как она способствует снижению инерционных нагрузок, передаваемых от навесного оборудования трактору через навесную систему и уменьшению абсциссы и ординаты поворота, что позволяет сократить ширину и высоту поворотной полосы, а, следовательно, и ее площадь. Расхождения между теоретическими и опытными значениями искомых параметров составляют не более 5 %.



1 – базовая навесная система при $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$;

2 – базовая навесная система при $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$;

3 – модернизированная навесная система при $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$;

4 – модернизированная навесная система при $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$

Рисунок 11 – Графики зависимости бокового ускорения a в характерных точках навесного оборудования от поступательной скорости v

В пятом разделе «Экономическая эффективность применения опытной конструкции навесной системы на тракторе Беларус-1221.2» дана оценка эффективности применения модернизированной навесной системы на тракторе Беларус-1221.2 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 модернизированной навесной системы трактора Беларус-1221.2 целесообразно, так как позволяет получить годовой экономический эффект в размере 15770 рублей, срок окупаемости инвестиций составляет 0,31 года, что значительно меньше срока службы трактора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Одним из путей снижения динамической нагрузки со стороны навесного оборудования на трактор является введение в конструкцию задней навесной системы трактора упругих элементов в местах сочленения трактора с оборудованием, что также, в свою очередь позволит устранить асимметрию передачи весовой нагрузки от оборудования на навесное устройство трактора, которая возникает ввиду неплотного прилегания между соединительной рамкой оборудования и треугольником на тракторе, и устранить неравномерное распределение крутящих моментов по колесам.

2. Предложенная методика определения бокового отклонения МТА от требуемой траектории позволяет аналитически описать действительную траекторию движения МТА, а изменяя поступательную скорость движения и угло-

вую скорость поворота управляемых колес – определить параметры, необходимые для выполнения оптимального беспетлевого поворота.

3. Полученные значения корректирующих коэффициентов сдвига постоянны для принятых конструктивных и эксплуатационных условий движения (комплектация агрегата, агрофон, продольная база, максимальный угол и угловая скорость поворота колес) и не зависят от скорости поступательного движения колесного трактора.

4. Анализ результатов расчетов по полученным аналитическим функциям явного вида для описания теоретической и действительной кривых траектории поворота МТА подтвердил целесообразность использования упругих элементов в местах сочленения трактора с оборудованием, так как отклонение действительной траектории от теоретической при базовой комплектации по высоте поворотной полосы больше на 1,6...2,25 м, а при модернизированной – на 0,6...1,13 м, длина траектории поворота при этом уменьшается на 1,9...3,14 м.

5. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение модернизированной задней навесной системы трактора Беларус-1221.2 позволяет приблизить действительную траекторию движения МТА к требуемой. Получено уменьшение предельных значений абсциссы на 1,4...1,61 м (12,3...14,45 %) и ординаты на 1,08...1,47 м (13,77...15,45 %) поворотной полосы для МТА с модернизированной навесной системой в сравнении с базовой. При этом снижаются величины усилия в тягах навесного устройства на 24...27 % и ускорения в базовых точках навесного оборудования – на 51...59 %.

6. 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 5 %.

7. Внедрение предложенной конструкции навесной системы трактора экономически целесообразно, так как позволяет получить годовой экономический эффект в размере 15770 рублей, срок окупаемости инвестиций составляет 0,31 года, что значительно меньше срока службы трактора.

8. Результаты диссертационной работы внедрены в производство и используются в учебном процессе. Полученные результаты позволяют рекомендовать применение упругих элементов (патент на полезную модель РФ № 204692) в местах сочленения трактора с навесным оборудованием для улучшения поворачиваемости МТА, а также снижения ускорений в базовых точках и усилий в тягах заднего навесного устройства трактора при повороте.

9. Перспективы дальнейшей разработки темы – это исследования по выбору и обоснованию материалов с рациональными упругими и диссипативными характеристиками и адаптация их в узлах навесной системы трактора.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы материалы диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. Исследование движения колесной машины по криволинейной траектории / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко, И.А. Высоцкая // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14. – № 4 (71). – С. 21-29.

2. Обоснование выбора системы рулевого управления трактора / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, В.Д. Бурдыкин, А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 15. – № 2(73). – С. 39-44.

3. Методика определения теоретической траектории поворота колесной машины / А.Н. Беляев, В.П. Шацкий, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, И.А. Высоцкая // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 16. – № 1(76). – С. 90-97.

4. 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.

5. 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.

Патенты

6. Патент на полезную модель № 204692 U1 РФ, МПК А01В 61/02. Устройство для навески машин на трактор / А.Н. Беляев, В.Д. Бурдыкин, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2020128722; заявл. 28.08.2020; опубл. 07.06.2021. Бюл. № 16.

7. Патент на полезную модель № 207574 U1 РФ, МПК В62D 7/14. Система рулевого управления транспортного средства со всеми управляемыми колесами / А.Н. Беляев, В.Д. Бурдыкин, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2021109574; заявл. 06.04.2021; опубл. 02.11.2021. Бюл. № 31.

8. Патент на полезную модель № 213863 U1 РФ, МПК В62D 7/14. Система рулевого управления транспортного средства со всеми управляемыми колесами / А.Н. Беляев, В.Д. Бурдыкин, В.А. Гулевский, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, И.А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2022103780; заявл. 14.02.2022; опубл. 04.10.2022. Бюл. № 28.

9. 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.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614611 РФ. Программа расчета геометрических характеристик и построения траектории криволинейного движения колесной машины / А.Н. Беляев, В.А. Гулев-

ский, Т.В. Тришина, И.А. Высоцкая, А.Е. Новиков; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2022613591; заявл. 15.03.2022; опубл. 23.03.2022.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667064 РФ. Программа расчета и построения действительной траектории поворота колесного трактора / А.Н. Беляев, В.П. Шацкий, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2022666519; заявл. 07.09.2022; опубл. 14.09.2022.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667725 РФ. Программа определения коэффициента бокового отклонения колесного трактора от заданной криволинейной траектории движения / А.Н. Беляев, В.П. Шацкий, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2022666603; заявл. 07.09.2022; опубл. 23.09.2022.

13. 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. Шердекин, И.А. Высоцкая; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2023611594; заявл. 03.02.2023; опубл. 03.02.2023.

Статьи в материалах научных конференций

14. Анализ исследований по вопросам устойчивости и управляемости автомобиля / А.Н. Беляев, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина, Ю.В. Дьяченко, А.Е. Новиков // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. нац. науч.-практ. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 51-56.

15. Критерии оценки управляемости и устойчивости колесного трактора / А.Н. Беляев, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина, Ю.В. Дьяченко, А.Е. Новиков // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. нац. науч.-практ. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 140-145.

16. Анализ теорий бокового увода пневматических движителей колесных машин / А.Н. Беляев, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина, Ю.В. Дьяченко, А.Е. Новиков // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. нац. науч.-практ. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 25-36.

17. Перспективы развития машинно-тракторных агрегатов / А.Н. Беляев, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина, Ю.В. Дьяченко, А.Е. Новиков // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. нац. науч.-практ. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 39-48.

18. Анализ исследований по вопросам устойчивости и управляемости колесного трактора / А.Н. Беляев, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина, Ю.В. Дьяченко, А.Е. Новиков // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. нац. науч.-практ. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 13-25.

19. Новиков А.Е. Система рулевого управления колесного трактора / А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко, В.В. Шердекин // Молодежный вектор развития аграрной науки: матер. 71-й студ. науч. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 489-494.

20. Новиков А.Е. Способ поворота трактора со всеми управляемыми колесами / А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко, В.В. Шередкин // Молодежный вектор развития аграрной науки: матер. 71-й студ. науч. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 494-500.

21. Новиков А.Е. Классификация и преимущества навесных систем тракторов / А.Е. Новиков // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: матер. междунар. науч.-пр. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2021 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 223 -228.

22. Обоснование методики экспериментальных исследований криволинейного движения колесной машины / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2022 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – Ч. I. – С. 168-175.

23. Обоснование методики экспериментального определения траектории движения колесной машины / А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко, В.В. Шередкин, А.А. Заболотная // Прикладные вопросы физики (к 120-летию со дня рождения академиков И.В. Курчатова и А.П. Александрова): матер. нац. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 20 октября 2022 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 249-255.

24. Система параллельного вождения FJDynamics / А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко, В.В. Шередкин, А.А. Заболотная // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 56-62.

25. Оценка влияния заднего навесного орудия на траекторию движения машинно-тракторного агрегата / А.Е. Новиков, В.В. Шередкин, А.А. Заболотная // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 ноября 2022 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 63-68.

26. Адаптация навигационной системы на тракторе Беларус-1221.2 / А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко, А.Н. Беляев, А.Н. Кузнецов // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2022 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – Ч. I. – С. 230-236.

27. Методика лабораторных исследований по определению усилий в тягах навесного устройства трактора / А.Е. Новиков, Ю.В. Дьяченко, А.Н. Кузнецов, А.А. Заболотная // Теория и практика инновационных технологий в АПК: матер. нац. науч.-практ. конф. (19-21 апреля 2022 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – Ч. I. – С. 264-271.

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 Афоничеву Д.Н. Телефон: +7(473)224-39-39 (доб. 3320), e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 26.04.2024 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ № 25766.

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