

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный аграрный университет  
имени императора Петра I»**

*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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Беляев А.Н.

Воронеж – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЗОР, АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НАВЕСНЫХ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ.....	13
1.1 Способы агрегатирования машинно-тракторных агрегатов.....	13
1.2. Навесные машинно-тракторные агрегаты.....	15
1.2.1. Преимущества навесных машинно-тракторных агрегатов.....	15
1.2.2. Навесные системы тракторов.....	19
1.3. Способы движения машинно-тракторных агрегатов на поворотной полосе.....	24
1.4. Анализ известных исследований поворачиваемости машинно-тракторного агрегата.....	27
1.4.1. Поворачиваемость машинно-тракторного агрегата.....	27
1.4.2. Критерии оценки поворачиваемости.....	30
1.4.3. Влияние заднего навесного оборудования на поворачиваемость машинно-тракторного агрегата.....	33
1.4.4. Пути улучшения поворачиваемости машинно-тракторных агрегатов.....	35
1.5. Анализ основных теорий бокового увода пневматических движителей колесных машин.....	40
1.6. Выводы.....	44
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА.....	46
2.1. Предпосылки к теоретической оценке криволинейного движения колесного трактора.....	46
2.2. Методика определения теоретической траектории поворота колесного трактора.....	48

2.3. Методика аналитического определения действительной траектории поворота машинно-тракторного агрегата.....	57
2.4. Влияние жесткости навесной системы на поворачиваемость машинно-тракторного агрегата.....	61
2.4.1. Обоснование выбора упругого элемента для навесной системы.....	61
2.4.2. Анализ применения упругого элемента в навесной системе машинно-тракторного агрегата.....	66
2.5. Выводы.....	72
<b>3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>75</b>
3.1. Программа экспериментальных исследований.....	75
3.2. Условия и методика проведения лабораторных и полевых исследований.....	76
3.2.1. Лабораторные исследования.....	76
3.2.2. Полевые исследования.....	78
3.2.2.1. Обоснование методики полевых экспериментальных исследований.....	78
3.2.2.2. Проведение экспериментальных полевых исследований.....	83
3.3. Приборы и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях.....	83
3.4. Обработка опытных данных и оценка точности результатов.....	88
3.5. Выводы.....	93
<b>4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....</b>	<b>94</b>
4.1. Результаты лабораторных экспериментальных исследований.....	94
4.2. Результаты полевых экспериментальных исследований.....	95
4.3. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.....	108
4.4. Выводы.....	110

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЫТНОЙ КОНСТРУКЦИИ НАВЕСНОЙ СИСТЕМЫ НА ТРАКТОРЕ БЕЛАРУС-1221.2.....	112
5.1. Исходные данные для оценки эффективности применения модернизированной навесной системы.....	112
5.2. Расчет технико-экономических показателей.....	114
5.3. Выводы.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
Приложение А.....	141
Приложение Б.....	147
Приложение В.....	151
Приложение Г .....	156
Приложение Д.....	162
Приложение Е .....	169
Приложение Ж.....	171
Приложение З.....	173

## ВВЕДЕНИЕ

**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 [117].

Для возделывания земель используются тракторы с различными типами присоединения к ним рабочего оборудования. Существуют следующие типы почвообрабатывающего оборудования: прицепное, полуприцепное, навесное [134]. Все указанные виды оборудования обладают рядом преимуществ и недостатков, однако, как показывает практика, навесное оборудование является наиболее эффективным в работе. Основными преимуществами навесных устройств являются: простая конструкция, малые вес и металлоемкость, высокая маневренность и простота эксплуатации, обслуживания.

Однако, применение навесного оборудования и увеличение скорости движения машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе колесных тракторов при выполнении рабочих процессов приводит к существенному изменению эксплуатационных характеристик агрегата, которые напрямую влияют на поворачиваемость при движении на поворотной полосе. При агрегатировании сельскохозяйственного оборудования на задней навесной системе трактора происходит увеличение инерционных сил, возникающих в ней, эти силы способствуют смещению агрегата с требуемой траектории движения, 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 [27, 78, 129].

Одним из имеющихся направлений расширения посевных площадей является освоение неиспользуемых в настоящее время многопрофильных полей малых и средних размеров. Однако, при возделывании таких полей различной формы суммарный путь на поворотной полосе может достигать до 40 % от всего пути, пройденного агрегатом по полю [68]. Следовательно, в целях обеспечения требуемого качества выполнения сельскохозяйственных работ и сохранения высокого уровня ресурсосбережения необходимо улучшение такого показателя как поворачиваемость трактора – эксплуатационного свойства колесной машины совершать повороты с заданной кривизной на дороге и местности [104], являющегося комплексным понятием и совмещающим в себя такие показатели, как устойчивость и управляемость, и непосредственно оцениваемого критериями этих характеристик.

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 успеш-

но используются конструкторами при разработке новых агрегатов, а производителями – для рациональной эксплуатации машинно-тракторного парка. Огромный вклад в изучение устойчивости и управляемости МТА внесли такие ученые, как Атаманов Ю.В., Беляев А.Н., Валуженич 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 [16, 17, 18, 20, 25, 96].

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., Кривовым В.Г., Кузнецовым Н.Г., Макаровой

Т.И., Нехорошевым В.А., Поливаевым О.И., 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, расположенно-

го в месте соединения охватывающей рамки оборудования и охватываемой рамки навесной системы трактора.

**Теоретическую значимость работы** 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 работы** 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 9 таблиц, заключения, списка литературы из 164 наименований, 8 приложений. Объем диссертации – 173 страницы.

## 1. Обзор, анализ и обобщение результатов исследований в области совершенствования навесных машинно-тракторных агрегатов

### 1.1. Способы агрегатирования машинно-тракторных агрегатов

Тенденция роста посевных площадей сельскохозяйственных культур, например, на 1,4 млн. га в 2022 году в сравнении с 2021 годом, наблюдающаяся в последние годы в Российской Федерации [117], вызывает необходимость в насыщении отечественного рынка сельскохозяйственной техники новым технологичным и высокопроизводительным оборудованием, которое позволяет повысить производительность и сократить расходы при выполнении механизированных работ. Большинство операций на поле выполняют машинно-тракторные агрегаты (МТА), представляющие собой технические системы, состоящие из трактора и одной или нескольких единиц оборудования (машин, орудий и т.д.), связанных соединительными устройствами, силовыми приводами, управление которыми, как правило, осуществляется непосредственно оператором из кабины трактора при помощи различных электронных, гидравлических и пневматических систем.

МТА классифицируются по следующим признакам [134]:

1. По назначению: технологические (пахотные, посевные, по уходу за растениями, уборочные), транспортные, транспортно-технологические (кормораздатчики, машины для внесения удобрений), погрузочно-разгрузочные.
2. По способу производства работ: мобильные, стационарно-передвижные, стационарные.
3. По способу соединения оборудования с трактором: прицепные, полуприцепные, навесные (рисунок 1.1).
4. По количеству оборудования в агрегате: одномашинные и многомашинные.
5. По числу одновременно выполняемых операций: простые, сложные, комбинированные.

б. По размещению оборудования относительно трактора и его продольной оси: с передним, средним, задним, боковым, симметричным и асимметричным расположением.



а)



б)



в)

а – навесной агрегат; б – полунавесной агрегат; в – прицепной агрегат  
Рисунок 1.1 – Типы МТА по способу соединения оборудования с трактором

Важнейшей характеристикой агрегата, влияющей на большинство его кинематических, динамических и геометрических параметров является способ соединения рабочего оборудования и трактора [67, 112].

Так как производство колесных тракторов в мировом тракторостроении составляет от 85 % до 95 % ввиду их универсальности, простоты в обслуживании, меньшей металлоемкости, удобства, легкости в агрегатировании и лучшей маневренности в сравнении с гусеничными, и более 60 % тракторно-

го парка России представлено универсально-пропашными колесными тракторами, то, именно поэтому, в качестве объекта исследования выбран подобного типа трактор класса 2 Беларус-1221.2. Очевидно, тип рабочего оборудования, сопрягаемого с трактором, изменяет условия его эксплуатации, особенно при выполнении технологических операций на рыхлых деформируемых почвах, где функциональные качества ограничиваются недостаточной устойчивостью и низкой управляемостью, в том числе при криволинейном движении на поворотной полосе. Поэтому исследования по поиску путей улучшения указанных эксплуатационных показателей универсально-пропашных колесных тракторов являются перспективным направлением.

## 1.2. Навесные машинно-тракторные агрегаты

### 1.2.1. Преимущества навесных машинно-тракторных агрегатов

Агрегаты различной комплектации обладают своими преимуществами и недостатками, однако, как показывает практика, навесные агрегаты являются наиболее эффективными в работе. Основными преимуществами навесных агрегатов являются [68] следующие:

1. Относительно упрощенная конструкция ввиду отсутствия дополнительных опор и элементов шасси, что положительно сказывается на стоимости агрегата.

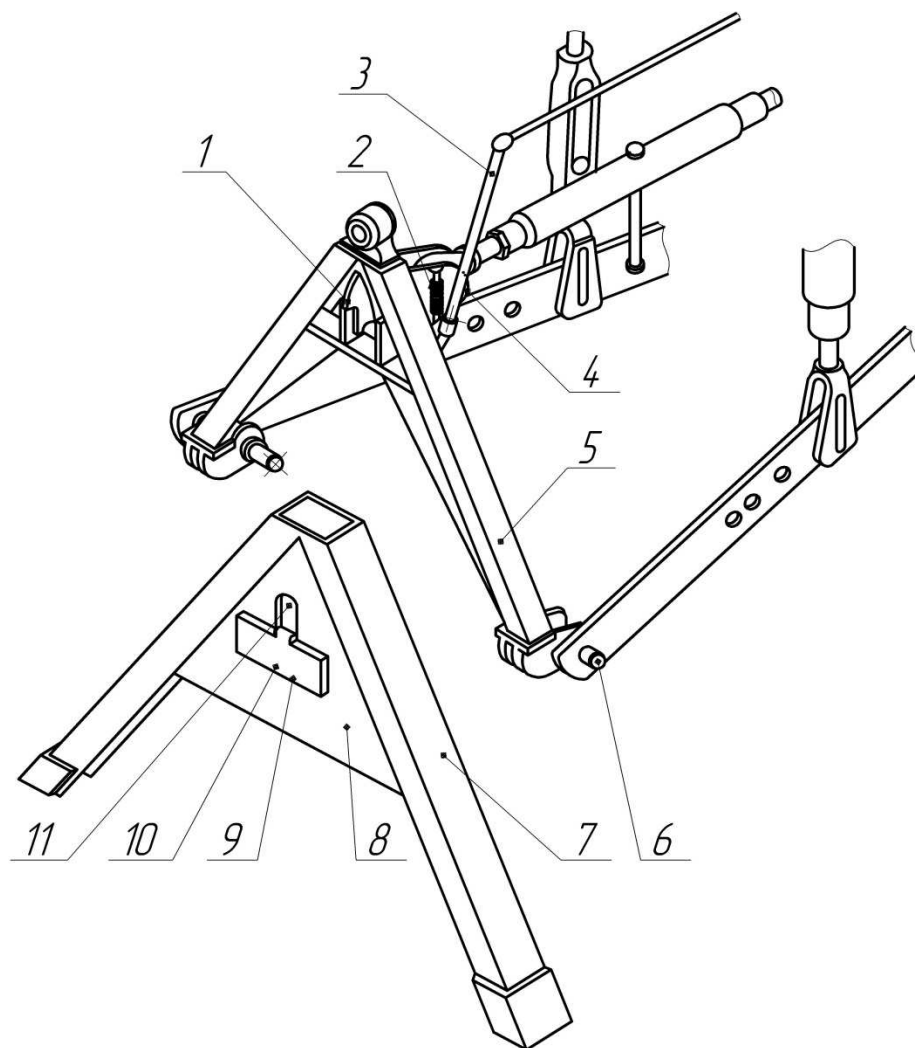
2. Меньшая металлоемкость и вес. Масса навесного оборудования в среднем в 1,5...2 раза ниже, чем прицепного, что также снижает его стоимость.

3. Повышенная маневренность при крутых поворотах, возможность движения задним ходом в транспортном положении и соответственно повышение качества обработки почвы на труднодоступных участках и краях полей, сокращение времени и расходы топлива на холостые проезды.

4. Снижение буксования ведущих колес ввиду того, что вес оборудования полностью воспринимается трактором.

5. Удобство и легкость управления за счет размещения органов управления в кабине трактора, благодаря чему не требуется отдельный работник. Так как процесс соединения трактора с навесным оборудованием не требует ручного труда тракториста и выхода его из кабины, возможность применения автосцепок – устройств для автоматического соединения трактора и оборудования, является важнейшим преимуществом навесных агрегатов.

Схема автосцепки СА-1, которая наиболее часто используется в навесных системах тракторов, представлена на рисунке 1.2 [41, 68].



1 – рамка; 2 – замок; 3 – планка; 4 – защелка; 5 – рычаг; 6 – пружина;  
7 – палец; 8 – связь; 9 – паз для защелки; 10 – эксцентрик; 11 – упор

Рисунок 1.2 – Автосцепка СА-1



Основными элементами автосцепки являются рамка 1 и замок 2. Рамка 1 представляет собой конструкцию из двух труб квадратного сечения, сваренных под углом  $65^\circ$ . В верхнем углу рамки расположены две поперечные планки 3 с отверстиями и пазами, в которые вставляется палец шарнира центральной регулируемой тяги навески. Также здесь расположен механизм фиксации, представляющий собой защелку 4, которая удерживается в рабочем положении с помощью рычага 5 и пружины 6. Рычаг 5 завершается рукояткой, с концом которой соединен тросик, протянутый в кабину. С его помощью защелка 4 оттягивается назад при необходимости отсоединения навесного оборудования. В нижней части рамки 1 установлены пальцы 7, с помощью которых она крепится к шарнирам продольных тяг навески. Замок 2 сварен из двух швеллеров под углом  $65^\circ$ , в его верхней части приварена стальная треугольная связь 8, которая обеспечивает жесткость конструкции и является элементом фиксации. В связи 8 вырезан овальный паз 9, который служит ответной частью для защелки 4, в его нижней части болтами монтируется пластина-эксцентрик 10. Упор 11 служит для надежной фиксации защелки 4.

При навешивании оборудования, рамка 1, подъемом навески, вводится в замок 2. При достижении верхней точки защелка входит в паз 9 в связи 8 на замке 2 и защелкивается. Защелка имеет крюкообразную форму, поэтому она стопорится эксцентриком 10 на замке 2, и рамка 1 не может выйти из зацепления с замком 2. При необходимости отсоединить оборудование, механизм в кабине тянет за тросик, рычаг 5 оттягивает пружину 6 и защелка 4 выходит из паза 9, что позволяет оборудованию отсоединиться от трактора.

Данная схема соединения оборудования и трактора позволяет удовлетворить ряду требований, без выполнения которых невозможно достижение необходимой производительности: надежность и простота сочленения оборудования с трактором; гарантирование требуемого интервала вертикального перемещения навешенной техники, обеспечение необходимого поперечного отклонения оборудования в рабочем положении относительно трактора при

пахоте и других операциях; устойчивое движение оборудования за трактором; легкость поворота МТА в рабочем и транспортном положениях; возможность в рабочем положении блокирования поперечного смещения оборудования, выполняющего посев или междурядную обработку; надежное блокирование при подъеме в транспортное положение оборудования от опускания, раскачивания и обеспечением достаточной проходимости агрегата по проселочным и полевым дорогам, и минимального влияния на устойчивость во время движения по поворотной полосе [71]. Поэтому при выполнении работ по возделыванию сельскохозяйственных культур работники аграрного сектора экономики отдают предпочтение навесным агрегатам [1, 120].

Однако, агрегатирование навесного оборудования имеет следующие недостатки [71, 95, 125]:

1. Вес оборудования целиком воспринимается колесами трактора, что в свою очередь увеличивает его негативное влияние на почву.

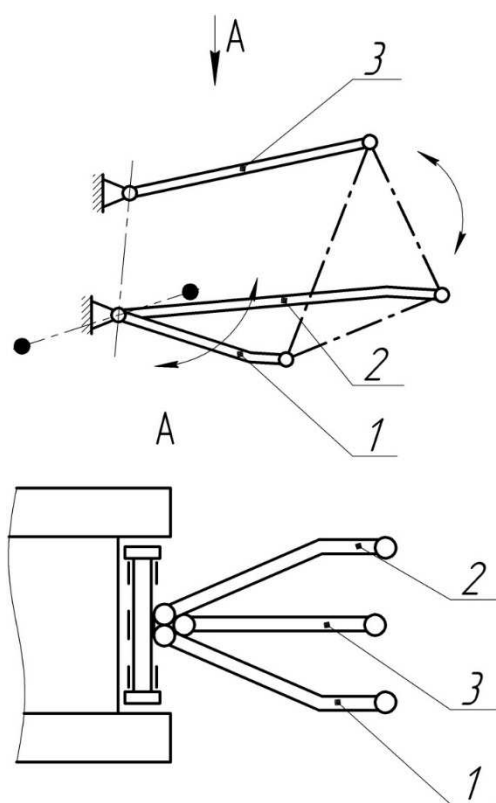
2. При эксплуатации оборудования в транспортном положении иногда возникает «эффект маятника», который сопровождается сносом задней оси трактора с первоначальной траектории движения при выполнении поворотов, ввиду того, что происходит смещение центра тяжести за счет того, что в местах присоединения оборудования к навеске возникают значительные инерционные нагрузки.

Исходя из сказанного, важнейшим направлением повышения устойчивости криволинейного движения 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 их воздействие на ее структуру и физико-механические свойства.

### 1.2.2. Навесные системы тракторов

Механизмы навески по способу присоединения к трактору подразделяются на двухточечные и трехточечные [41].

При двухточечном соединении нижние продольные тяги 1 и 2 соединены в одной точке (рисунок 1.3), что позволяет агрегату отклоняться от прямолинейной траектории на угол величиной до  $20^\circ$ . Данную схему используют на тракторах классов 3, 4, 5, 6, 7, 8 при работе с плугами, свеклоподъемниками и другими устройствами, рабочие органы которых глубоко заглубляются в почву.

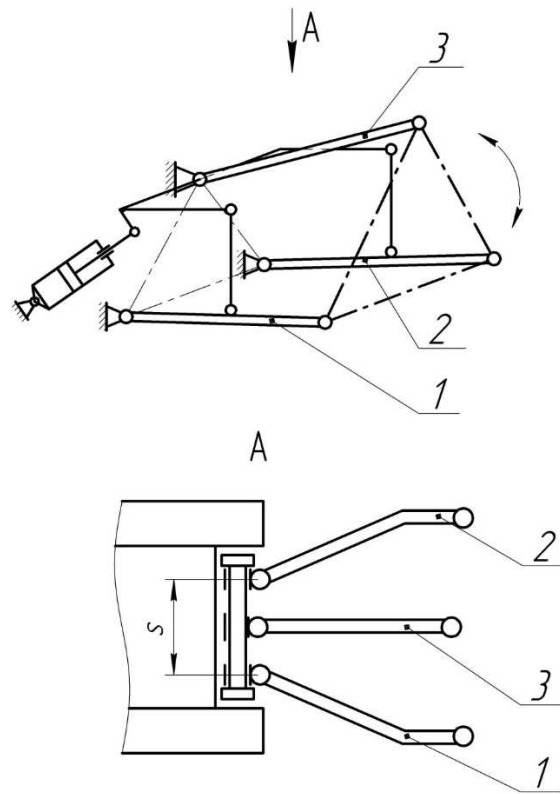


1, 2 – нижние продольные тяги; 3 – верхняя продольная тяга

Рисунок 1.3 – Схема двухточечного механизма навески

Трехточечные механизмы применяются для тракторов тяговых классов 0,6; 0,9; 1,4; 2. Отличительной особенностью данного способа соединения является то, что нижние продольные тяги 1 и 2 навески крепятся в разных точках (рисунок 1.4). Верхние продольные тяги 3 при этом в обоих случаях имеют симметричное расположение относительно продольной оси трактора

(рисунки 1.3, 1.4). Трехточечный способ соединения отличается повышенной жесткостью сопряжения оборудования и трактора, обеспечивает устойчивое прямолинейное движение агрегата, применяется на вспашке, при агрегатировании культиваторов, сеялок и других широкозахватных устройств.

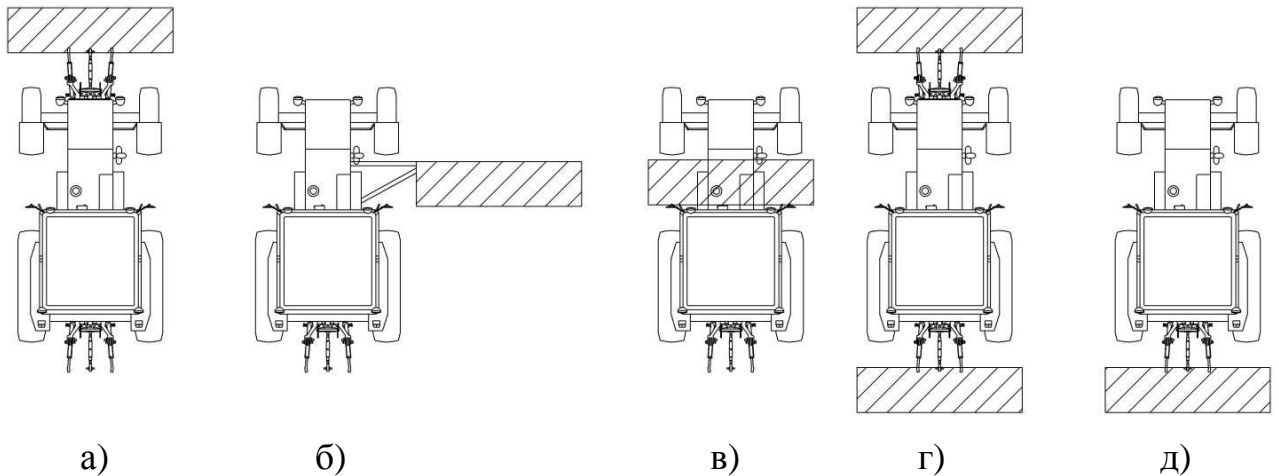


1, 2 – нижние продольные тяги; 3 – верхняя продольная тяга

Рисунок 1.4 – Схема трехточечного механизма навески

Колесные тракторы оснащены трехточечным навесным устройством, в то время как на гусеничных тракторах существует возможность переоборудования трехточечной схемы навешивания на двухточечную.

По месту сопряжения оборудования и трактора навесные системы бывают фронтальные, боковые, передние, комбинированные, задние (рисунок 1.5) [71, 95, 125].



а)

б)

в)

г)

д)

а – фронтальная навесная система; б – боковая навесная система;  
 в – передняя навесная система; г – комбинированная навесная система;  
 д – задняя навесная система

Рисунок 1.5 – Способы навески оборудования на трактор

Фронтальная навеска – способ навески, при котором оборудование находится спереди трактора вне его базы. При таком способе сопряжения агрегатируемое оборудование находится в зоне видимости оператора, догружаются передние колеса, что уменьшает их буксование. Однако, существенным недостатком является то, что прикладываемое усилие к оборудованию является не тяговым, а толкающим, которое требует больших энергозатрат (рисунок 1.5а).

Боковая навеска – способ навески оборудования, при котором оно располагается сбоку трактора, как правило, с правой стороны, так как эта зона особенно хорошо просматривается трактористом. Основным недостатком является то, что сила сопротивления асимметричная и стремится повернуть трактор в направлении расположения оборудования. Чаще всего данный способ применяется для навешивания косилок (рисунок 1.5б).

Передняя навеска (средняя) – способ навески, при котором оборудование располагается внутри базы трактора между передней и задней осями. Недостатком данного способа является необходимость наличия достаточного пространства в точке крепления оборудования. Очевидно, что такой вариант

навески возможен только с тракторами, имеющими в указанной зоне достаточное свободное пространство (рисунок 1.5в).

Комбинированная навеска – одновременное закрепление оборудования на фронтальной и задней навесках. Данный способ навешивания является достаточно перспективным и эффективным, так как позволяет агрегатировать сразу два вида оборудования, что увеличивает производительность МТА до 30 %, снижает число проходов по полю в два раза. Чаще всего в этой схеме используются универсально-пропашные тракторы класса 2 (рисунок 1.5г) [16, 25, 28, 54, 56, 57, 70, 72, 102, 103, 114].

Задняя навеска – способ навески, при котором оборудование находится сзади трактора вне его базы. Данный способ навески применяется для большинства агрегатов, в частности почвообрабатывающих и посевных. Такой способ навески способствует лучшему сцеплению задних колес с почвой и меньшему буксованию. Из недостатков можно отметить отсутствие оборудования в зоне видимости тракториста, ухудшение управляемости и снижение, а зачастую даже, потеря устойчивости при совершении поворотов ввиду дополнительного нагружения задней оси трактора, и неравномерного распределения весовой, тяговой и инерционной нагрузок по его мостам и бортам (рисунок 1.5д) [71, 125].

Так как в настоящее время комбинированное агрегатирование находится в стадии развития из-за недостаточного количества номенклатуры тракторов для реализации данного способа, на большинстве универсально-пропашных тракторов предусмотрена задняя навеска оборудования при трехточечном соединении. Схема заднего трехточечного механизма навески согласно ГОСТ ISO 730-2019 представлена на рисунке 1.6 [41].



### 1.3. Способы движения машинно-тракторных агрегатов на поворотной полосе

Основными элементами движения МТА при работе являются прямолинейные рабочие ходы и холостые повороты. Совершение поворота – наиболее сложный для изучения и выполнения элемент. Выбор не правильного способа движения агрегата влечет за собой увеличение ширины поворотной полосы и соответственно длины холостого хода, что в свою очередь повышает расход топлива, время маневра и площадь отрицательного воздействия движителей на почву.

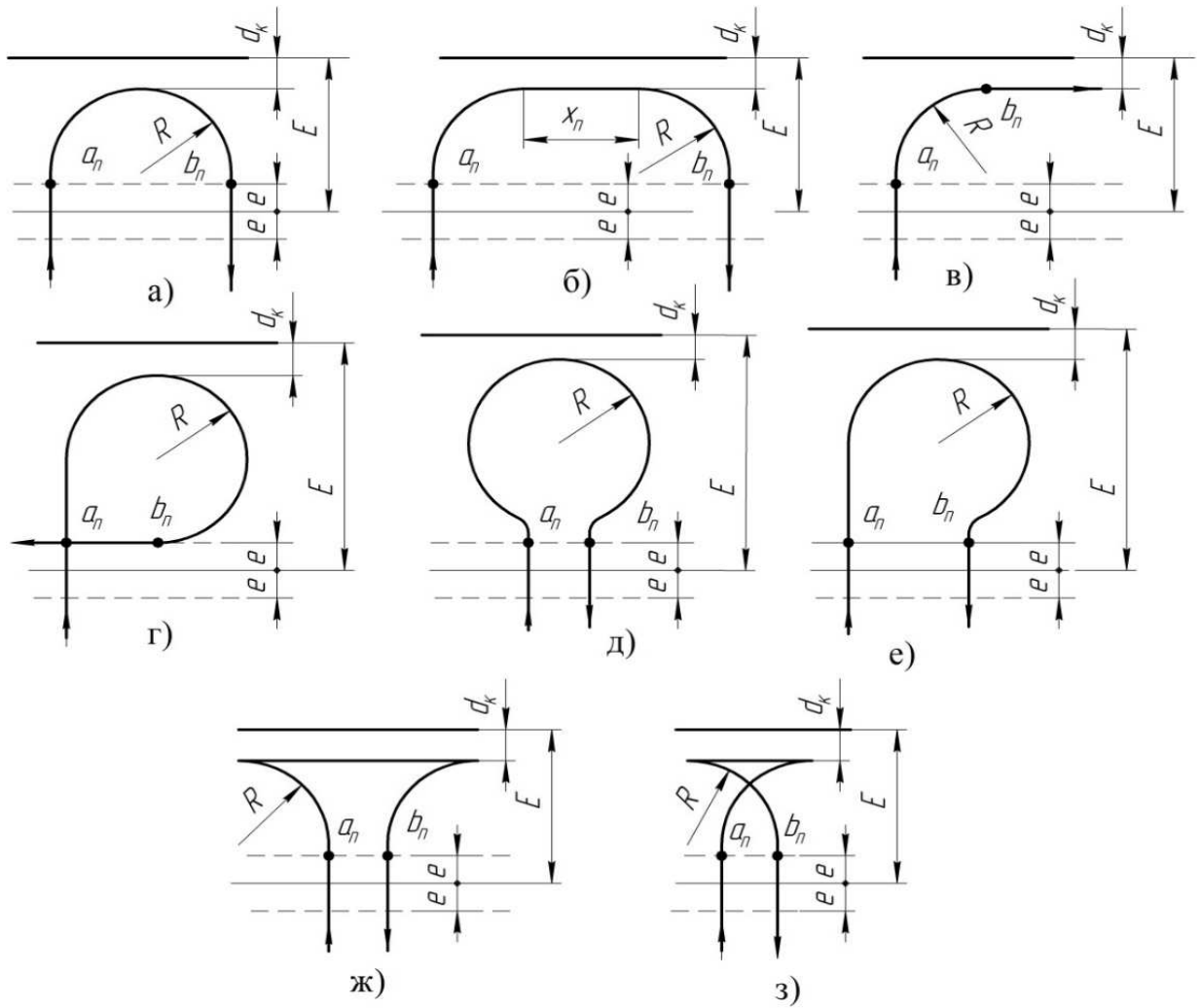
При движении МТА по полю различают петлевые и беспетлевые повороты. Их схемы проезда показаны на рисунке 1.7 [71, 74, 130].

Беспетлевые повороты применяются в том случае, если расстояние между смежными проходами агрегата больше либо равно сумме двух радиусов его поворота. Беспетлевые повороты бывают круговые (рисунок 1.7а), с прямолинейным участком (рисунок 1.7б) и угловые (рисунок 1.7в).

Петлевые повороты применяются в том случае, если расстояние между смежными проходами агрегата меньше двух радиусов его поворота. Различают следующие виды петлевых поворотов: с закрытой петлей (рисунок 1.7г), грушевидный (рисунок 1.7д), односторонний (рисунок 1.7е), а также грибовидные с открытой (рисунок 1.7ж) и закрытой (рисунок 1.7з) петлей.

Основными кинетическими характеристиками всех видов поворота являются:  $l$  – длина траектории поворота;  $t$  – время поворота;  $R$  – радиус поворота;  $E$  – требуемая ширина поворотной полосы. Обычно под  $R$  и  $E$  подразумевают их минимально возможные значения с учетом изложенных выше требований, а под  $l$  – длину траектории центра агрегата от точки  $a_{п}$  начала поворота до точки  $b_{п}$  его завершения (рисунок 1.7).





а – круговой; б – с прямолинейным участком; в – угловой; г – с закрытой петлей; д – грушевидный; е – односторонний; ж – грибовидный с открытой петлей; з – грибовидный с закрытой петлей

Рисунок 1.7 – Виды поворотов

Путь, пройденный агрегатом при выполнении одного поворота, определяется по формуле [74, 130]

$$L = l + 2e,$$

где  $e$  – длина выезда МТА, м.

Значение  $l$  зависит от радиуса поворота  $l = f(R)$ , ширина поворотной полосы  $E$  – от радиуса  $R$ , кинематической ширины  $d_k$  и длины выезда  $e$  МТА  $E = f(R, d_k, e)$ .

В таблице 1.1 приведены зависимости для определения пути  $L$  и минимальной ширины поворотной полосы  $E$  для различных видов поворотов.

Таблица 1.1 – Основные кинематические параметры различных способов поворота

Вид поворота	$L$ , м	$E$ , м
Беспетлевые:		
круговой	$(3,2\dots4,0)R + 2e$	$1,1R + d_{\kappa} + e$
с прямолинейным участком	$(1,4\dots2,0)R + x_{\pi} + 2e$	$1,1R + d_{\kappa} + e$
угловой	$(1,6\dots1,8)R + 2e$	$1,1R + d_{\kappa} + e$
Петлевые:		
с закрытой петлей	$(5,0\dots6,5)R + 2e$	$2R + d_{\kappa} + e$
грушевидный	$(6,6\dots8,0)R + 2e$	$2,8R + d_{\kappa} + e$
односторонний	$(6,0\dots7,5)R + 2e$	$2,6R + d_{\kappa} + e$
грибовидный с открытой петлей	$(4,1\dots5,0)R + 2e$	$1,1R + d_{\kappa} + e$
грибовидный с закрытой петлей	$(5,0\dots5,5)R + 2e$	$1,1R + d_{\kappa} + e$

Анализируя данные таблицы 1.1, где  $x_{\pi}$  – длина прямолинейного участка траектории, можно отметить, что с учетом коэффициентов при расчете пути поворота  $L$ , длина траектории при движении по беспетлевому повороту значительно меньше, чем при движении по петле. Поэтому беспетлевой поворот является наиболее рациональным выбором при криволинейном движении трактора на поворотной полосе [25].

## 1.4. Анализ известных исследований поворачиваемости машинно-тракторного агрегата

### 1.4.1. Поворачиваемость машинно-тракторного агрегата

Изучение криволинейного движения МТА необходимо для анализа поворачиваемости трактора – эксплуатационного свойства колесной машины совершать повороты с заданной кривизной на дороге и местности [138], являющегося комплексным понятием и совмещающим в себя такие показатели, как устойчивость и управляемость, и непосредственно оценивающийся критериями этих характеристик [128].

Если не обеспечены требуемые управляемость и устойчивость МТА, то повышаются динамические нагрузки на трактор и сельскохозяйственное оборудование, что в свою очередь является причиной увеличения энергозатрат, ухудшаются психологическое и физическое состояния оператора, снижаются технико-экономические показатели работы агрегата и качество выполнения агротехнических операций, не исключено частичное, а в некоторых случаях полное уничтожение культурных растений на засеянных поворотных полосах [7, 23, 25].

Ввиду того, что как при прямолинейном, так и при криволинейном движении на трактор влияет множество различных внешних факторов, оператор, воздействуя только лишь на рулевое колесо, не может обеспечить движение строго по теоретической траектории движения, которая является наиболее короткой. Он может лишь максимально возможно к ней приблизиться, пытаясь сохранить необходимую скорость и избежать заноса колес [25].

Устойчивость и управляемость являются взаимосвязанными параметрами. При достаточном уровне устойчивости МТА оператору нет необходимости излишне воздействовать на органы управления для сохранения скорости и траектории движения, что говорит о хорошей управляемости, поэтому комплекс данных понятий и определяет поворачиваемость [125, 138]. Разли-

чают статическую и динамическую поворачиваемости.

Статическая поворачиваемость – свойство машины, движущейся по окружности с закрепленным рулем (при неизменном повороте управляемых колес), изменять кривизну траектории в зависимости от скорости движения под действием боковой составляющей силы инерции, аэродинамической силы или какого-либо другого возмущения, включая изменение характеристик шин и подвески [104, 128, 134, 138].

Динамическая поворачиваемость – свойство машины изменять кривизну траектории в соответствии с поворотом руля и изменением скорости движения [104, 134, 138].

Исследованиям устойчивости и управляемости МТА посвящены работы следующих ученых: Атаманова Ю.В., Беляева А.Н., Валуженича Р.Н., Ванцевича В.В., Гамаюнова П.П., Голованова Г.В., Гуськова В.В., Гячева Л.В., Зеньковича А.А., Коновалова В.В., Красильникова В.Е., Кринко М.С., Лефарова А.Х., Метелицина И.И., Петрушова В.А., Полетаева А.Д., Скотникова В.А., Трояновской И.П., Фаробина Я.Е., Ярмашевича Ю.И., Яцкевича В.В. и др.

Среди отечественных ученых, кто впервые в своих работах затронул понятие устойчивости движения колесной машины, был Чудаков Е.А, который [63, 142, 143] рассматривал устойчивость автомобиля не как его отдельное эксплуатационно-техническое свойство, а всего лишь как один из факторов, влияющих на тормозные и тяговые свойства, а именно как фактор, ограничивающий скорость движения на повороте и интенсивность торможения автомобиля. Но в дальнейшем он отнес это понятие к основным эксплуатационно-техническим свойствам машины, характеризующим способность держать дорогу при скользкой или неровной поверхности [142].

Коновалов В.Ф. [73,74] определяет устойчивость как соотношение факторов, которые изменяют характер движения и сил, стремящихся его вернуть к прежнему состоянию. Сам же параметр устойчивости агрегата представляет собой совокупность свойств, благодаря которым возможно сохранение ис-

ходных параметров движения как во время воздействия внешних сил, так и после их прекращения. При этом в отличие от управляемости, которая должна быть обеспечена при любых условиях, устойчивость как свойство возникает лишь при малых смещениях и исчезает при больших.

Гячев Л.В. предложил теорию деформации пневматической шины, на основе которой была разработана теория устойчивости движения сельскохозяйственных агрегатов [53], которая устанавливает зависимости между кинематическими и динамическими параметрами с целью получения лучшей устойчивости движения.

Гусяцкий Л.М. теоретически исследовал устойчивость колесных навесных агрегатов для посева и обработки междурядий и обосновал закономерности изменения кинематических (поступательная скорость, угловая скорость поворота, угол поворота управляемых колес) и динамических факторов (сила реакции почвы на рабочие органы, боковая сила); им выявлены условия бокового скольжения колес трактора, а также предложены пути улучшения управляемости [52].

Как видно, большинство авторов рассматривают понятие устойчивости в совокупности с управляемостью. Обеспечив, к примеру, идеальную устойчивость, можно привести показатель управляемости к необходимым требованиям, поэтому следует помнить об этом и решать вопрос обеспечения устойчивости, не нарушая при этом управляемость [30, 31, 55, 65]. Именно поэтому большинство ученых используют понятие поворачиваемости трактора, как совокупность таких факторов как устойчивость и управляемость [128, 143, 150].

Также, исходя из анализа литературы следует, что изучение поворачиваемости проводилось в основном для отдельного трактора [37, 38, 39]. Однако, в работах [16, 17, 18, 20, 25] экспериментально доказано и теоретически обосновано, что навесные устройства оказывают значительное влияние на кинематические и динамические характеристики агрегата при криволинейном движении. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования

поворачиваемости необходимо проводить не только для отдельного трактора, но и для МТА в целом. Экспериментальные исследования всех этапов криволинейного движения навесного МТА в условиях реальной эксплуатации не проводились, а при решении большинства различных аналитических задач, связанных с выбором параметров агрегатов и режимов их работы, конструктивной увязкой трактора с навесным оборудованием за основу принимаются статические модели и методы теории равновесия механических систем. В реальных условиях эксплуатации МТА представляет собой комплекс сложных динамических процессов, вызванных неравномерными колебаниями трактора, навесного оборудования, скорости и направления движения [80, 83].

Выявлено также, что практически отсутствуют исследования по поиску путей повышения эксплуатационных качеств МТА при криволинейном движении на поворотной полосе, в том числе по снижению влияния на трактор со стороны навесного оборудования.

#### 1.4.2. Критерии оценки поворачиваемости

Повышение рабочих скоростей агрегата, рост энергонасыщенности тракторов приводит к возрастанию знакопеременных усилий, повышению динамической нагруженности МТА и почвы, что существенно ухудшает его эксплуатационные характеристики, в том числе при криволинейном движении [22, 24, 26, 28, 115, 116]. Поэтому необходимой является оценка поворачиваемости трактора, так как без этого невозможно повысить не только качество выполняемой технологической операции, но и обеспечить безопасность работы [17, 25, 77, 140].

В настоящее время предложено достаточное количество оценочных критериев устойчивости и управляемости колесных машин, но лишь некоторые из них возможно использовать для исследования указанных свойств криволинейного движения МТА.

Общепринятыми критериями для оценки поворачиваемости трактора являются следующие [52, 77, 134, 138, 141]:

1. Минимальный радиус поворота трактора при криволинейном движении.
2. Предельное значение скорости изменения кривизны траектории.
3. Количество энергии, затраченное на управление трактором при его движении по заданной траектории.
4. Удельная сила тяги, необходимая для выполнения поворота.
5. Коэффициент использования сцепной силы движителя.

Параметры, влияющие на критерии поворачиваемости, бывают управляемыми, на которые возможно влияние оператора, и неуправляемые. К управляемым параметрам относят угол и угловую скорость поворота управляемых колес, угловую скорость поворота и скорость поступательного движения трактора, время поворота и путь, пройденный трактором. Остальные параметры (в основном конструктивные) – неуправляемые [66, 82, 87, 113].

На большинство вышеперечисленных параметров возможно влияние оператора, как управляющего звена, поэтому, чтобы его исключить, необходимо выбрать такие критерии поворачиваемости, которые отражают только конструктивные параметры агрегата.

Чудаков Д.А. предложил критерий оценки статической поворачиваемости, являющийся отношением фактического и теоретического радиусов поворота [141]

$$\frac{1}{U} = \frac{R_{\phi}}{R_m}, \quad (1.1)$$

где  $R_{\phi}$  – фактический радиус поворота, м;

$R_m$  – теоретический радиус поворота, м.

Однако, при совершении поворота важнейшими факторами являются время, затрачиваемое на разворот, и изменение при этом скорости движения МТА относительно прямолинейного участка, так как момент сопротивления повороту зависит от угла поворота управляемых колес и скорости движения трактора. Длина пути тех участков, которые трактор проходит с переменным радиусом кривизны траектории (вход в поворот, выход из поворота), и участ-

ков с постоянной кривизной также должна является необходимым составляющим показателей, характеризующих поворачиваемость трактора.

На основе вышесказанного Иофинов С.А. предложил следующий показатель поворотливости трактора [68]

$$K_n = \frac{L \cdot v}{\omega} \quad (1.2)$$

где  $L$  – база трактора, м;

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

$\omega$  – угловая скорость поворота управляемых колес трактора,  $\text{с}^{-1}$ .

Одним из заслуживающих также внимания показателей поворачиваемости, в этой связи, является критерий Струхаля, который показывает зависимость угла поворота агрегата за время проезда пути, равного длине колесной базы [73]

$$\rho = \frac{L \cdot \Omega}{v} \quad (1.3)$$

где  $\Omega$  – угловая скорость поворота трактора,  $\text{с}^{-1}$ .

В работе [74] Коновалов В.Ф. рекомендует для использования в качестве оценки поворачиваемости на переходных участках поворота следующий комплексный критерий управляемости, являющийся совокупностью показателей (1.1), (1.2) и (1.3)

$$U = \frac{L}{\omega \cdot R_\phi \cdot T_\phi},$$

где  $R_\phi$  – мгновенный фактический радиус поворота, м;

$T_\phi$  – время, необходимое для достижения данного радиуса поворота, с.

При криволинейном движении Гуськов В.В. рекомендует использовать тяговую силу в качестве критерия для оценки тяговой способности трактора. Чем меньше ее величина при прочих идентичных условиях, тем ниже затраты мощности двигателя трактора, реализуемой на криволинейное движение. При повороте коэффициент использования сцепной силы колеса оценивается отношением разности возможной силы по сцеплению и суммарной силы,



действующей в контакте движителя с опорной поверхностью, к возможной силе тяги по сцеплению. Чем больше значение коэффициента использования сцепной силы, тем выше возможности трактора к выполнению криволинейного движения и меньше вероятность потери управляемости и поворачиваемости [134]. Однако, вычисление составляющих формулы для определения данного коэффициента является достаточно трудоемким процессом, поэтому, в том числе для более полного анализа энергетического баланса в работе [28] авторы предлагают следующий метод оценки энергетических свойств трактора на повороте по величине удельных энергетических затрат:

$$E_{y\phi} = \frac{M\phi}{S},$$

где  $M$  – ведущий момент движителя, Н·м;

$\phi$  – угол поворота движителя в окружном направлении на пройденном пути  $S$  (м), рад.

Характер изменения траектории кинематического центра при криволинейном движении трактора даёт достаточно полное представление об устойчивости при повороте трактора. Для оценки траектории поворота рекомендуется применять величины ширины (абсциссы  $x$ ) и высоты (ординаты  $y$ ) поворотной полосы, показывающие поперечные и продольные отклонения МТА, так как при выполнении сельскохозяйственных операций поворот необходимо стремиться проводить с минимально возможным радиусом, что приводит к сокращению площади поворотных полос, значительному уменьшению количества повреждаемых растений на них и снижению уплотнения и распыления почвы [27, 28].

#### 1.4.3. Влияние заднего навесного оборудования на поворачиваемость машинно-тракторного агрегата

Существующие теоретические и экспериментальные подходы к оценке характеристик криволинейного движения навесного МТА на базе колесного трактора не всегда в полной мере отражают реальную картину его движения.

Во многих исследованиях, посвященных вопросам обеспечения устойчивости и управляемости криволинейного движения МТА, не получила достаточного развития оценка влияния навесных систем на эти эксплуатационные свойства.

Большинство исследований криволинейного движения проведено для отдельного трактора. Однако, экспериментально и теоретически доказано, что заднее навесное оборудование оказывает негативное влияние на поворачиваемость трактора, особенно на поворотной полосе, где происходит значительное отклонение его действительной траектории движения от теоретической, в основном за счет бокового скольжения под действием инерционных сил, что приводит к ухудшению технико-экономических показателей при выполнении сельскохозяйственных операций. Научно-обоснованные решения этой проблемы отсутствуют; практически не изучен вопрос снижения влияния динамических факторов в цепи передачи нагрузки от оборудования на движители трактора при повороте [16, 17, 18, 21, 25, 28].

В работе [16] авторы указывают, что использование заднего навесного оборудования с одной стороны улучшает сцепление колес с почвой, а с другой – увеличивает центробежную силу инерции, действующую на трактор, вызывает рост боковых реакций на колесах, что в значительной степени изменяет траекторию движения и приводит к увеличению радиуса поворота. Установлено, что при этом происходит не только боковое скольжение, но и занос МТА, обусловленный, в основном, действием момента сил инерции, величина которого определяется по формуле [149]

$$M_u = -J_s \cdot \varepsilon = -J_s \cdot \frac{v \cdot a \cdot t}{\left(\rho_0 + \frac{a \cdot t^2}{2}\right)^2}, \quad (1.4)$$

где  $J_s$  – момент инерции МТА, кг·м<sup>2</sup>;

$\varepsilon$  – угловое ускорение МТА, с<sup>-2</sup>;

$a$  – линейное ускорение центра масс МТА, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_0$  – начальный радиус поворота, м.

Выявлено [25], что радиус  $\rho$  и скорость  $v$  не являются постоянными даже на участке установившегося поворота. Это приводит к изменению угловой скорости поворота трактора и появлению углового ускорения  $\varepsilon$ . При этом происходит замедление поворота, и момент инерции (1.1) совпадает по направлению с направлением поворота, что способствует возникновению заноса задней оси трактора.

Увеличение радиуса кривизны траектории в работах [19, 25] объясняется влиянием центробежной силы инерции, действующей на трактор. При этом происходит боковой увод направляющих колес, вследствие чего возникает сдвиг и сминание слоя почвы. Для мягких грунтов данное явление особенно характерно. Доказано, что повышение скорости движения МТА с навешанным на заднюю навесную систему оборудованием приводит к значительному увеличению пути поворотной полосы и времени на выполнение поворота.

Все вышеперечисленное указывает на то, что применение навесного оборудования оказывает негативное влияние на поворачиваемость МТА. Происходит увеличение радиуса и времени прохождения поворота, наблюдаются боковое скольжение и занос, повышается количество воздействий оператора на рулевое колесо, что приводит к ухудшению технико-экономических показателей работы трактора и снижению общего качества выполненных работ, а также ввиду увеличения нагрузки на движители, вследствие возросшей общей массы МТА, повышается уплотнение почвы.

#### 1.4.4. Пути улучшения поворачиваемости машинно-тракторных агрегатов

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 направление связано с выбором рациональных эксплуатационных характеристик, обеспечивающих повышение эффективности работы изучаемого МТА при движении на поворотной полосе. К этим характеристикам можно отнести скорость поступательного движения трактора  $v$ , угловую скорость поворота рулевого колеса  $\omega_r$ , и следовательно – управляемых колес. От их величин, очевидно, зависит и время, затрачиваемое на совершение поворота, и угловая скорость. Для более устойчивого и управляемого движения значение как  $v$ , так и  $\omega_r$  должны уменьшаться [15]. Однако, это влечет за собой снижение производительности МТА, увеличение площади поворотной полосы [25]. Поэтому выбор данных характеристик должен быть обоснован в зависимости от условий работы, типа и состава агрегата, его массово-геометрических параметров и оптимизирован, исходя из условий эффективного функционирования агрегата [76].

Выбор рационального способа поворота навесного МТА также является важным резервом сохранения устойчивости и управляемости, поэтому ведутся исследования по разработке новых способов движения трактора на поворотной полосе [11, 97, 98, 99, 107, 108, 109, 147, 162, 163]. Решение этой задачи очень подробно изложено в специальной литературе [68].

Беляевым А.Н. предложен комбинированный способ поворота МТА [110] и обоснована его эффективность [25]. Применение этого способа позволило улучшить тяговую динамику трактора, обеспечило снижение поперечного и продольного отклонения от заданной траектории криволинейного движения.

Как показали исследования, потенциальные возможности тракторов с навесным сельскохозяйственным оборудованием значительно ограничиваются из-за негативного влияния последних на процесс криволинейного движения. Для повышения скорости движения МТА при обеспечении качественных условий качения колес по деформируемому рыхлому опорному основанию, необходимо, с учетом этого, определить рациональные параметры некоторых узлов, определяющие характер взаимодействия навесного оборудо-

вания с трактором и провести поиск путей выбора конструктивных решений для их дальнейшей реализации.

Наиболее перспективным направлением стабилизации нагрузочных режимов трактора в составе МТА и борьбы с негативными последствиями увеличения динамических нагрузок является введение упругих звеньев в отдельные механизмы трактора и навесного оборудования с целью уменьшения воздействия постоянно изменяющихся нагрузок на трактор или отдельные его узлы и агрегаты.

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 объекта, он 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 [36, 139].

Наиболее фундаментальные исследования в изучаемой области были проведены для тракторно-транспортных агрегатов, которые выявили, что одним из самых перспективных путей снижения средних величин и амплитуд колебаний внешней нагрузки является введение упругой связи в тягово-сцепное устройство (ТСУ) между трактором и прицепным средством.

Мандрик И.И. [88] предложил конструкцию активного упругодемпфирующего ТСУ, основным элементом которого является гидроамортизатор. Применение усовершенствованного ТСУ позволило повысить производи-

тельность труда на 9...14 % за счет увеличения средней скорости на повороте на 10...15 %.

Алексеев С.А. экспериментально и теоретически доказал, что применение ТСУ с установленным в нем гидравлическим аккумулятором позволяет уменьшить тормозной путь на 12...28 %, что способствует повышению производительности МТА на 10...17 % и снижению расхода топлива до 5 % [3].

Прицепное устройство, предложенное Шишкиным А.В. [144], которое включает в себя рессорный упругий элемент, показало свою эффективность при экспериментальных исследованиях. Так, снизилась динамичность нагружения трактора в составе МТА на 20...25 %, крюковая нагрузка уменьшилась на 10...12 %, производительность увеличилась на 12...15 % при полной загрузке трактора.

Улучшение поворачиваемости МТА с навесным оборудованием стало возможно благодаря применению упругодемпфирующих приводов (УДП), которые устанавливаются в ходовую часть трактора вместо жестких полуосей [28, 115, 116]. Как для одиночного трактора, так и для МТА применение УДП позволило уменьшить минимальный радиус поворота на 8...10 % по сравнению с базовой конструкцией привода ведущих колес. При этом повышается устойчивость трактора к заносу, так как интенсивность бокового скольжения трактора с УДП ниже, а скорость движения, на которой оно возникает выше. Помимо вышесказанного, применение УДП в конструкции трактора позволило уменьшить среднеквадратические ускорения вертикальных колебаний мостов при повороте на 8...16 %, а среднеквадратические ускорения поступательного движения – на 10...18 %.

Снижение энергозатрат от применения УДП на передвижение навесного комбинированного МТА на поворотной полосе составило 14...25 %. Удалось также увеличить среднюю поступательную скорость движения на 5...7 % и снизить негативное влияние движителей на почву.

Одним из конструктивных решений, позволяющих улучшить поворачиваемость трактора, в том числе в составе навесного МТА, является приме-

нение кинематических схем подвесок, обеспечивающих при повороте машины выбор необходимого угла наклона колес передней оси трактора для сохранения заданной траектории движения. Недостатком этого способа является возможность применения исключительно на тракторах с четырьмя управляемыми колесами и необходимость внесения сложных технических решений в конструкцию подвески [106].

В работе [75] отмечено, что для повышения эффективности использования любого МТА возможно применять пневмогидравлическую навеску, что позволило улучшить тягово-сцепные свойства, снизить расход топлива и увеличить производительность. Однако, применение гидротрансформатора снижает КПД двигателя и увеличивает расход топлива. Нивелировать эти недостатки возможно за счет применения двигателя постоянной мощности. Данный способ повышения эффективности использования МТА требует значительных изменений конструкции, как самого трактора, так и навесной системы.

Рыжих Н.Е. предложил [119] одноточечную конструкцию навесной системы, применение которой позволило снизить жесткость соединения трактора и орудия и повысить равномерность хода плуга по глубине при выполнении вспашки. Такой подход позволил повысить производительность пахотного агрегата в среднем на 22 % и сократить расход топлива на 28 % при выполнении пахотных работ.

Проведенный анализ показал, что возможность применения упругих элементов в местах бокового соединения навесного оборудования с трактором не исследовались. В связи с этим особую актуальность приобретает вопрос поиска и научного обоснования конструктивного решения, касающегося упругой боковой связи в навеске для оптимизации режима криволинейного движения МТА, направленный на наиболее полное использование тяговых свойств, энергетических ресурсов, сохранение требуемой траектории движения.

Таким образом, одним из возможных способов повышения устойчивости трактора на поворотной полосе с задним навесным оборудованием является усовершенствование конструкции навесной системы введением упругих элементов в цепи передачи инерционных усилий, возникающих от оборудования, на движители трактора.

### 1.5. Анализ основных теорий бокового увода пневматических движителей колесных машин

Основными внешними силовыми факторами, вызывающими отклонение колесной машины от заданной траектории при криволинейном движении являются действующие на нее инерционные силы [18]. Как следствие, им противодействуют боковые реакции, возникающие в контакте колес с опорной поверхностью [135]. Поэтому основной задачей при исследовании криволинейного движения колесной машины является именно определение направления и величины этой боковой силы. Однако, как показывает анализ исследований в области криволинейного движения колесных машин, решение указанной проблемы носит достаточно сложный и неоднозначный характер [25].

Определение боковой силы осуществляется в соответствии с той или иной теорией бокового увода, которая описывает соответствующую принятым условиям модель качения колеса.

Наиболее полные и значимые исследования криволинейного движения колесных машин связаны с автомобилем [6, 154, 156], и которые, в основном, посвящены оценке влияния эксплуатационных и конструктивных факторов на его устойчивость движения и управляемость. Гипотеза бокового увода эластичного колеса по твердой опорной поверхности является научным фундаментом теорий устойчивости движения и управляемости автомобиля. Исходя из этого разработано множество теорий бокового увода, в основе большинства которых лежит линейная теория Рокара И. [118]



$$P_b = k \cdot \delta, \quad (1.5)$$

где  $P_b$  – боковая сила, Н;

$k$  – коэффициент бокового увода, Н/рад.;

$\delta$  – угол бокового увода, рад.

Эта гипотеза применима лишь при изучении движения транспортных средств по твердому опорному основанию, оси колес которых остаются всегда параллельными плоскости дороги, поэтому область использования гипотезы Рокара И. является довольно ограниченной. Так, например, при работе автомобиля в тяжелых дорожных, а трактора в полевых условиях, опорной поверхностью является рыхлое деформируемое основание, на котором, особенно при криволинейном движении, описание качения каждого колеса указанной теорией бокового увода будет не совсем корректно. Однако, некоторые теории, разработанные на основе линейной гипотезы Рокара И., получили развитие и широко используются при исследовании криволинейного движения колесных машин в различных условиях качения колес.

Наиболее адекватно описывает процесс взаимодействия пневматического колеса с грунтом нелинейная теория бокового увода, разработанная Антоновым Д.А. Сущность ее заключается во введении в уравнение (1.5) коэффициента коррекции  $k$ , который учитывает эксплуатационные факторы, оказывающие влияние на процесс криволинейного движения колесной машины [9]

$$k_y = k \cdot k_0 \quad (1.6)$$

или

$$k_y = k_\varphi \cdot k_N \cdot k_T \cdot k_{ш} \cdot k_B \cdot k_{\Pi} \cdot k_{Гр} \cdot k_{неуст} \cdot k_0,$$

где  $k_0$  – коэффициент сопротивления боковому уводу при свободном режиме качения колеса, когда значение коэффициента коррекции равно единице.

Общий коэффициент коррекции представляет собой произведение частных коэффициентов коррекции, определенных при проведении экспериментальных исследований, величины которых учитывают соответственно:

движение по поверхности с определенным коэффициентом сцепления  $k_{\varphi}$ , изменение нормальной нагрузки  $k_N$ , изменение продольной реакции  $k_T$ , отклонение давления воздуха в шинах от рекомендуемого  $k_{ш}$ , наклон колеса к опорной поверхности  $k_B$ , колебание колеса на неровной поверхности  $k_{П}$ , движение по деформируемому грунту  $k_{гр}$ , качение колеса в режиме неустановившегося увода  $k_{неуст}$ .

С учетом (1.6) выражение (1.5) примет следующий вид:

$$P_b = k_y \cdot \delta.$$

Конструктивные, массово-геометрические особенности МТА, вызванные, в том числе его постоянно меняющейся комплектацией с различным сельскохозяйственным оборудованием, условия эксплуатации МТА указывают, что результаты исследований и методы расчета автомобиля не смогут в полной мере использоваться для анализа поведения трактора на рыхлой деформируемой опорной поверхности.

Уровень современного тракторостроения позволяет с той или иной степенью приближения и рядом уточнений применять положения теории криволинейного движения автомобиля для колесного трактора ввиду того, что цели и задачи подобных исследований зачастую совпадают и предполагают изучение изменения кинематических и динамических характеристик под влиянием конструктивных и технологических параметров, а также поиск путей по возможному улучшению эксплуатационных свойств машины. Однако, особенности технологического процесса в сельскохозяйственном производстве накладывают дополнительные условия на характер криволинейного движения трактора, что является причиной необходимости решения ряда дополнительных проблем, связанных, в первую очередь, с податливостью опорного основания.

Одной из сложных проблем, возникающих в процессе работы колесного трактора, является сохранение устойчивости и управляемости при криволинейном движении, особенно на деформированном рыхлом опорном осно-

вании, и изучение криволинейного движения трактора необходимо, главным образом, именно для анализа и расчета этих эксплуатационных свойств [25].

В работе [134] авторами установлена зависимость коэффициента сопротивления боковому уводу от следующих факторов.

1. Размеры, конструкция и давление в шине.
2. Значение и характер приложения сил, действующих на колесо.
3. Поступательная скорость движения трактора.
4. Тип опорной поверхности.
5. Траектория движения центра масс.

Основываясь на этих условиях, были выведены зависимости, устанавливающие связь между боковыми силами на колесах трактора  $P_{bi}$  и углами бокового увода колес  $\gamma_i(\gamma'_1, \gamma''_1, \gamma'_2, \gamma''_2)$ , которые имеют следующий вид:

$$P_{bi} = \gamma_i \cdot k_{yi}, \quad (1.7)$$

где  $k_{yi}(k'_{y1}, k''_{y1}, k'_{y2}, k''_{y2})$  – коэффициенты сопротивления боковому уводу,  $\frac{\text{Н}}{\text{рад}}$ .

$$k_{yi} = k_0 \cdot \beta_{Gi} \cdot \beta_{Fi} \cdot \beta_{\varphi i},$$

где  $\beta_{Gi}, \beta_{Fi}, \beta_{\varphi i}$  – корректирующие коэффициенты.

Благодаря учету описанных выше факторов через использование корректирующих коэффициентов, выражение (1.7) возможно использовать для нелинейных участков зависимости  $P_{bi} = f(k_{yi})$ .

Так же установлено, что при небольших значениях боковой силы угол увода практически пропорционален ей. Увеличение боковой силы вызывает частичное проскальзывание шины в поперечном направлении и линейная зависимость нарушается. На этот фактор также влияет проскальзывание отпечатка пятна контакта и деформируемость грунта [128].

Как показал анализ литературы, основой математической теории движения колеса трактора являются дифференциальные уравнения кинематических связей, которые включают нелинейную зависимость боковой силы от угла увода, учитывающие податливость грунта и неустановившийся процесс

бокового увода. Необходимость учета данных параметров в расчетных моделях для каждого колеса трактора усложняет расчеты и делает их практически нереализуемыми без ряда существенных допущений. Поэтому разработка и реализация новых методов аналитического определения бокового отклонения МТА от требуемой траектории и поиск путей повышения его поворачиваемости является необходимым условием для оценки криволинейного движения.

Из анализа вышеуказанных методик для определения бокового увода колесной машины от заданной траектории при движении по мягкому грунту следует, что необходимо руководствоваться методикой, которая рассматривает машину как единый объект [25].

#### 1.6. Выводы

1. Наиболее распространенной в настоящее время схемой комплектации МТА на базе колесных тракторов является задняя трехточечная навеска оборудования, обеспечиваемая автоматическим сцепным устройством.

2. Выбор способа движения навесного МТА на поворотной полосе является задачей, относящейся к конкретным условиям эксплуатации (тип оборудования, размеры и конфигурация поля, вид технологического процесса и др.), но в основе каждого из известных способов поворота лежат элементы кругового беспетлевого поворота, поэтому результаты его исследования можно переносить на другие способы.

3. Одним из важнейших эксплуатационных свойств любого МТА, работающего в условиях рыхлых деформируемых грунтов, влияющих на производительность и экономичность, является поворачиваемость, для оценки которой используются критерии, относящиеся к устойчивости движения и управляемости.

4. Вероятным решением проблемы снижения динамической нагрузки со стороны навесного оборудования на трактор при криволинейном движе-

нии является применение упругой связи между ними посредством встроенных без нарушения исходной конструкции в боковых элементах навесной системы упругих элементов.

5. При моделировании процесса криволинейного движения колесного трактора на рыхлой деформируемой почве определение бокового отклонения от заданной траектории необходимо проводить по методике, которая рассматривает трактор как единый объект, а не описывает качение отдельного колеса в виду сложности и неоднозначности процессов, происходящих при качении каждого из них.

## 2. Теоретическая оценка кинематических характеристик криволинейного движения машинно-тракторного агрегата

### 2.1. Предпосылки к теоретической оценке криволинейного движения колесного трактора

В связи с ростом скоростей движения колесных тракторов проблема повышения их устойчивости и улучшения управляемости становится все более актуальной [136]. Для оценки устойчивости и управляемости в настоящее время используют многие критерии [52, 127, 128], основывающиеся на различных показателях, определение которых, как правило, требует проведения многочисленных и дорогостоящих натурных испытаний, к тому же некоторые из них, по нашему мнению, не в полной мере отражают реальную картину функционирования колесного трактора, особенно при движении по криволинейной траектории – одном из сложных и опасных режимов эксплуатации. Проведенный анализ литературных источников, описывающих процесс криволинейного движения колесных машин с боковым уводом, показал, что наиболее достоверную оценку можно получить сравнением теоретической и действительной траекторий движения характерных точек трактора, выявляющим степень отклонения трактора от заданной траектории и позволяющим учесть множество факторов, вызывающих боковой увод шин и их скольжение по почве [25]. Для этого в первую очередь необходимо разработать и обосновать методику расчета теоретической и действительной траекторий для основных этапов поворота: «вход в поворот» и «установившийся поворот» и определить вид указанных траекторий [94].

Колесный трактор должен совершать движение по траектории, определяемой оператором, и изменять ее своевременно в соответствии с величиной управляющих воздействий [52, 127, 128]. Однако, как известно, в реальных условиях функционирования под воздействием многочисленных факторов как эксплуатационного, так и конструктивного характера, происходит значи-

тельное отклонение действительной траектории движения трактора от требуемой [25, 105, 106, 160, 161]. Известные оценочные параметры устойчивости движения и управляемости трактора, полученные в ходе проведения экспериментов, отличающихся, как правило, используемыми методиками, характеризуют в основном систему оператор-машина, а не сам трактор, поэтому полученные результаты испытаний, проведенных в различных условиях с разными операторами, могут оказаться несопоставимы, так как включают в себя субъективные входные показатели [61, 62, 136, 145, 146].

Практически любой маневр, совершаемый колесным трактором, может являться поворотом, поэтому важное значение приобретает проблема сохранения и повышения устойчивости и управляемости трактора при криволинейном движении, которое является одним из сложных и опасных режимов эксплуатации. Весьма важным условием качества выполняемого технологического процесса, а также безопасности движения на повороте является правильный выбор траектории движения. Поэтому для анализа и оценки поворачиваемости колесного трактора, а также выявления причин ее потери необходимо иметь представление о теоретической и действительной траекториях, описываемых его характерными (базовыми) точками, например, серединой заднего моста, обычно принимаемой за кинематический центр, в условиях не только установившегося поворота с постоянным радиусом, но и с переменным положением центра кривизны [4, 25, 34]. Очевидно, способ поворота трактора зависит от типа и состава агрегата, агротехнических требований, размеров обрабатываемого участка. Так как в каждом способе движения на поворотной полосе заложены элементы кругового беспетлевого поворота, то именно он является объектом исследований. В связи с этим в основу методики теоретических и экспериментальных исследований должны быть положены: участок входа в поворот и участок установившегося поворота – кругового беспетлевого поворота, включающие в себя основные элементы, которые выполняет трактор при криволинейном движении [25, 68].

В соответствии с вышесказанным разработка методик аналитического получения теоретической и действительной траекторий движения кинематического центра колесного трактора при круговом беспетлевом повороте является актуальной задачей [25, 94, 157, 158, 159].

При исследовании устойчивости криволинейного движения колесного трактора важно определить насколько траектория, задаваемая оператором, будет отличаться от действительной, а поэтому для ее сравнительной оценки более корректно использовать функцию явного вида [79, 131, 133].

## 2.2. Методика определения теоретической траектории поворота колесного трактора

Исходя из правильности поворота [52, 127, 128] мгновенный теоретический радиус  $R$  кривизны траектории кинематического центра трактора, за который принята середина заднего моста – точка  $C$  (рисунок 2.1), определяется из уравнения [79]

$$R = R(t) = \left| \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{1,5}}{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}} \right|, \quad (2.1)$$

где  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$  – координаты траектории, описываемой точкой  $C$ , м;

$\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{y}$  – соответственно первые и вторые производные от координат  $x$  и  $y$  по времени  $t$ .

Скорость поступательного движения и перемещение трактора соответственно равны [128]:

$$v = \frac{dS}{dt},$$

$$dS = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}.$$

Из этих зависимостей можно получить следующее уравнение

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2.$$

Проекции скорости  $v$  на оси координат (рисунок 2.1) составляют:



$$\dot{x} = v \cos \psi;$$

$$\dot{y} = v \sin \psi,$$

где  $\psi = \psi(t)$  – угол между продольной осью трактора и осью координат  $x$ .

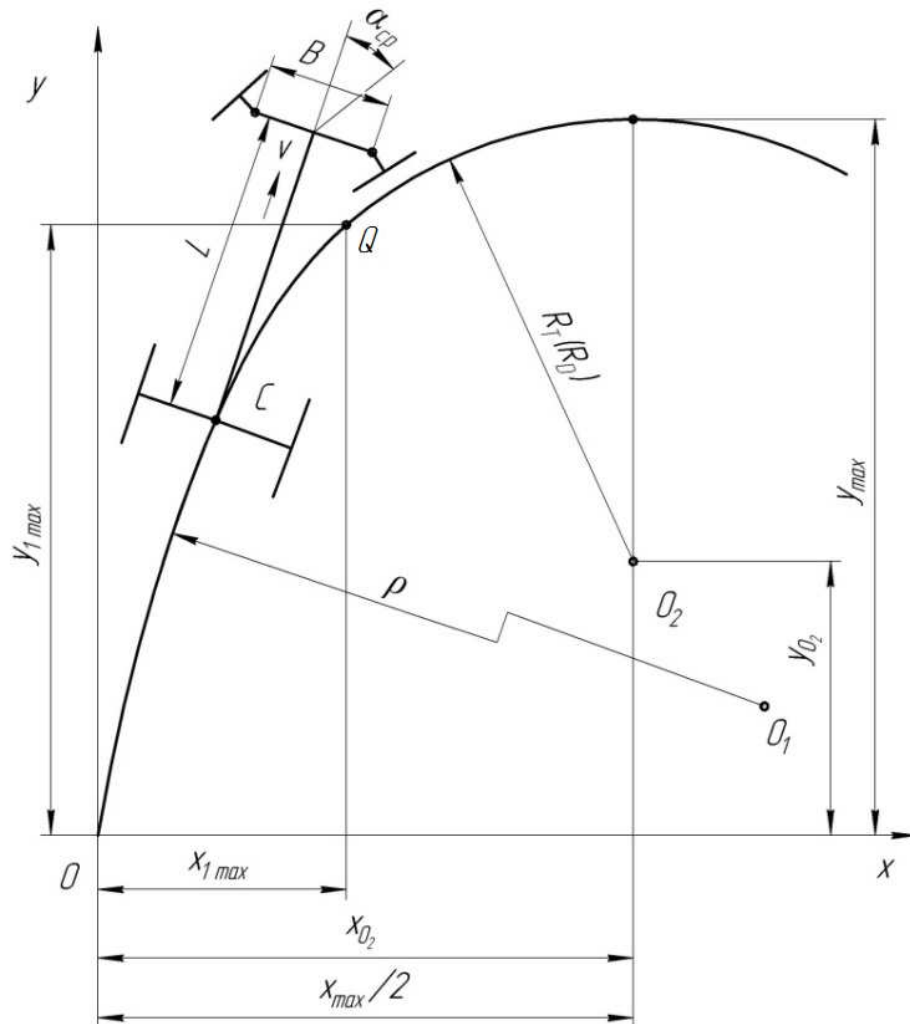


Рисунок 2.1 – Расчетная кинематическая схема криволинейного движения колесного трактора

Исходя из этого, уравнения, описывающие равномерное движение трактора, будут иметь вид [79, 133]:

$$x(t) = v \int \cos \psi dt; \quad (2.2)$$

$$y(t) = v \int \sin \psi dt. \quad (2.3)$$

Так как в начальный момент времени (при  $t=0$ ) при переходе с прямолинейного на криволинейное движение кинематический центр трактора

находится в начале координат, а радиус кривизны кривой траектории равен бесконечности – расположен на оси  $x$ , то имеем [79, 133]:

$$x = x_0 = 0; y = y_0 = 0; R = R_0 = \infty; \psi = \psi_0 = 90^\circ.$$

Так как угол между продольной осью трактора и осью координат  $y$  – курсовой угол движения (рисунок 2.1)  $\beta = \frac{\pi}{2} - \psi$ , то уравнения (2.2) и (2.3) принимают следующий вид:

$$x(t) = v \int \sin \beta dt; \quad (2.4)$$

$$y(t) = v \int \cos \beta dt. \quad (2.5)$$

Уравнения (2.4) и (2.5) определяют траекторию кинематического центра трактора [133].

Так как  $dS = R d\beta$ , то  $\frac{dS}{dt} = R \frac{d\beta}{dt} = v$  и  $v \frac{dt}{R} = d\beta$ . Интегрирование последнего равенства дает выражение:

$$v \int \frac{dt}{R} = \beta + C.$$

Постоянная интегрирования  $C$  при начальных условиях  $t = 0$  и  $\beta = 0$  равна нулю ( $C = 0$ ) [79, 133].

При этом формула для определения курсового угла примет окончательный вид:

$$\beta = v \int \frac{dt}{R}. \quad (2.6)$$

Допустим, что, независимо от скорости поступательного движения трактора управляющее воздействие на передние колеса через рулевой механизм водитель передает с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , тогда их поворот на угол  $\alpha_{cp}$  за время  $t$  [25]

$$\alpha_{cp} = \alpha = \omega t. \quad (2.7)$$

Согласно рисунку 2.1 [52, 127, 128]

$$R = \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha_{cp}}, \quad (2.8)$$

где  $L$  – продольная база трактора, м.

С учетом формул (2.6), (2.7) и (2.8) окончательно параметрические уравнения движения кинематического центра трактора (2.4) и (2.5) для участка входа в поворот будут такими:

$$x(t) = v \int \sin\left(v \int \frac{tg(\omega t)}{L} dt\right) dt; \quad (2.9)$$

$$y(t) = v \int \cos\left(v \int \frac{tg(\omega t)}{L} dt\right) dt. \quad (2.10)$$

Внутренний интеграл в (2.9) и (2.10) может быть вычислен непосредственно по формуле [79]

$$\int \frac{tg(\omega t)}{L} d\tau = -\frac{\ln(\cos(\omega t))}{L\omega}.$$

Тогда, после преобразований, формулы (2.9) и (2.10) примут вид:

$$x(t) = -v \int \sin\left(\frac{v \ln(\cos \omega t)}{L\omega}\right) dt; \quad (2.11)$$

$$y(t) = v \int \cos\left(\frac{v \ln(\cos \omega t)}{L\omega}\right) dt. \quad (2.12)$$

Первые производные по времени от координат (2.11) и (2.12) определяются по следующим формулам:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = -v \sin\left(\frac{v \ln(\cos(\omega t))}{L\omega}\right);$$

$$\frac{dy}{dt} = \dot{y} = v \cos\left(\frac{v \ln(\cos(\omega t))}{L\omega}\right).$$

а вторые –

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} = \frac{v^2 \cos\left(\frac{v \ln(\cos(\omega t))}{L\omega}\right) \sin(\omega t)}{L \cos(\omega t)};$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \ddot{y} = \frac{v^2 \sin\left(\frac{v \ln(\cos(\omega t))}{L\omega}\right) \sin(\omega t)}{L \cos(\omega t)}.$$

Из формулы (2.8) текущий радиус кривизны траектории

$$\rho(t) = Lctg\omega t, \quad (2.13)$$

Полное время входа в поворот согласно (2.7)  $T = \alpha_{max}/\omega$ , тогда радиус кривизны в момент времени  $T$  равен

$$R = Lctg\alpha_{max}. \quad (2.14)$$

Исходя из этих соотношений, координата  $x_Q$  (рисунок 2.2) окончания входа в поворот определяется по формуле

$$x_Q = x(T).$$

По формулам (2.11) и (2.12) вычисляем массив данных для получения явной аппроксимирующей функции траектории движения при входе в поворот  $y = f(x)$ . Вид этой функции должен согласовываться со значениями радиуса кривизны в точке  $x_Q$ , определенного по формулам (2.1) и (2.13).

Дальнейшее движение при постоянном угле поворота колес продолжается на участке установившегося поворота по окружности радиуса  $R_T$ . В связи с этим, строим сопряженную с кривой траектории входа в поворот  $y = f(x)$  окружность этого радиуса из условий их непрерывности и гладкости [79]

$$(x - x_{o_r})^2 + (y - y_{o_r})^2 = R_T^2. \quad (2.15)$$

Окружность должна удовлетворять следующим условиям

$$y(x_Q) = f(x_Q); \quad \frac{dy(x_Q)}{dx} = \frac{df(x_Q)}{dx}. \quad (2.16)$$

Затем составляется кусочно-гладкая функция  $y(x)$  вида

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

Полученная функция представляет собой теоретическую траекторию движения трактора до его максимальной ординаты.

Так как тангенс угла  $\psi$  наклона касательной  $T-T$  к траектории в точке  $Q$  равен производной функции  $y = p(v)x^q$  в точке  $x_Q$  (рисунок 2.2) [79]

$tg\psi = p(v)q \cdot x_Q^{q-1}$ , то

$$\sin\psi = \frac{tg\psi}{\sqrt{1+tg^2\psi}} = \frac{p(v)q \cdot x_Q^{q-1}}{\sqrt{1+(p(v)q \cdot x_Q^{q-1})^2}};$$

$$\cos\psi = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\psi}} = \frac{1}{\sqrt{1+(p(v)q \cdot x_Q^{q-1})^2}}.$$

Согласно рисунку 2.2 координата центра  $O_T$  окружности радиуса  $R_T$  по оси  $x$  на участке установившегося движения

$$x_{O_T} = x_Q + R_T \sin \psi. \quad (2.17)$$

Так как окружность проходит через точку  $Q(x_Q, y_Q)$ , определяем координату центра  $O_T$  окружности радиуса  $R_T$  по оси  $y$  на участке установившегося движения из общего уравнения окружности (2.15) по формуле

$$y_{O_T} = y_Q - \sqrt{R_T^2 - (x_Q - x_{O_T})^2} = y_Q - \sqrt{R_T^2 - R_T^2 \sin^2 \psi} = y_Q - R_T \cos \psi. \quad (2.18)$$

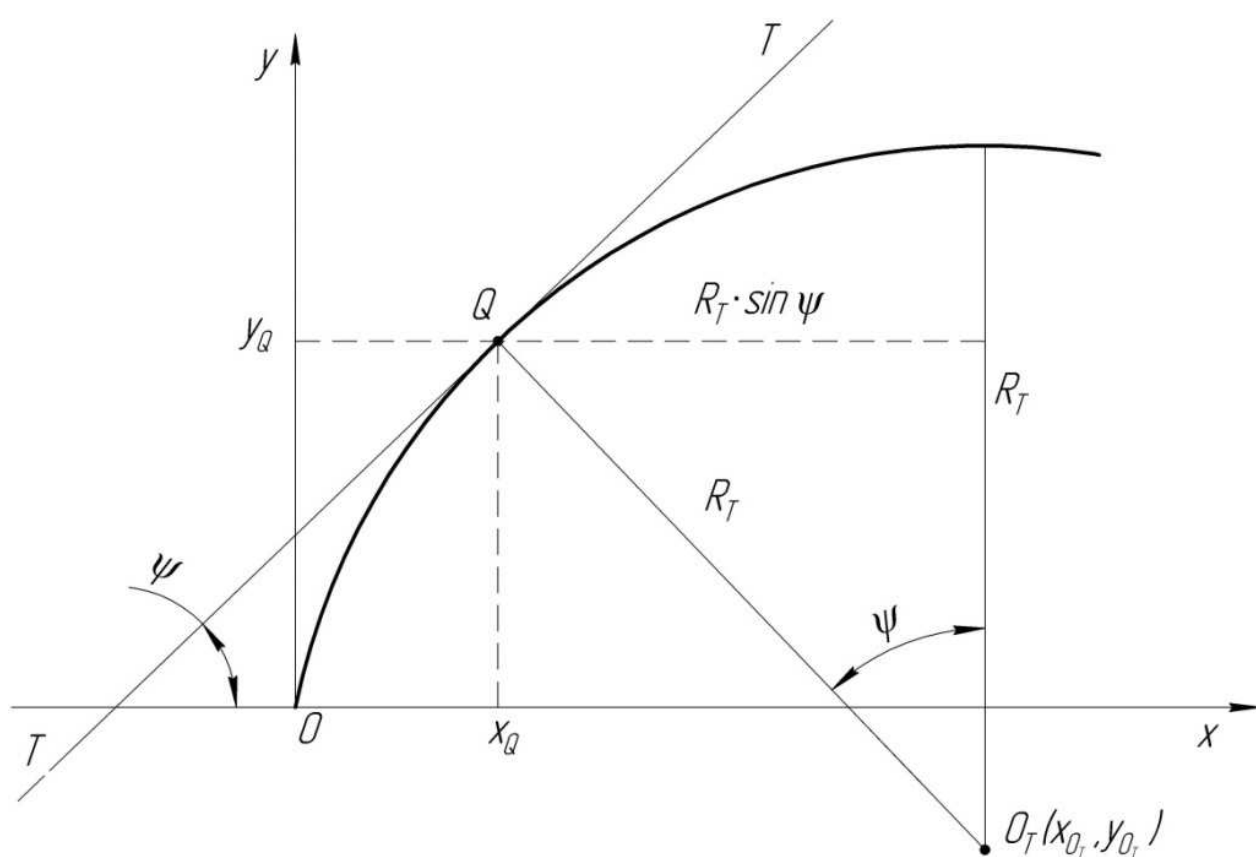


Рисунок 2.2 – «Склейка» участков траектории криволинейного движения  
«вход в поворот» и «установившийся поворот»

Рассмотрим описанный алгоритм для конкретных числовых значений конструктивных и эксплуатационных параметров колесного трактора Беларус-1221.2 [14] при  $v = 2,556$  м/с,  $\omega = 0,155$  с<sup>-1</sup>,  $L = 2,78$  м,  $\alpha_{max} = 0,62$  рад.

Теоретический радиус кривизны, определенный по формулам (2.1) и (2.14) равен в этом случае  $R = 3,894$  м.

Явная функция, аппроксимирующая теоретические координаты движения (2.11) и (2.12), в данном случае принимает вид (приложение Б) [59, 123]:

$$y_B(x) = 6,445x^{0,33} - 0,0848x^{1,932} . \quad (2.19)$$

Известно, что [79]

$$\rho(x) = \frac{\left(1 + \left[\frac{dy(x)}{dx}\right]^2\right)^{1,5}}{\left|\frac{d^2y(x)}{dx^2}\right|} . \quad (2.20)$$

С учетом формулы (2.20), радиус кривизны траектории, определенной функцией (2.19), может быть вычислен по формуле (приложение Б) [59, 123]

$$\rho(x) = - \frac{(1 + (\frac{2,128}{x^{0,67}} - 0,164x^{0,932})^2)^{1,5}}{-\frac{1,425}{x^{1,67}} - \frac{0,153}{x^{0,068}}} . \quad (2.21)$$

Значение радиуса кривизны в точке окончания входа в поворот, вычисленное по формуле (2.21), равно  $\rho(x_Q) = 3,899$  м, что практически совпадает с теоретическим радиусом кривизны  $R = 3,894$  м, полученным по формулам (2.1), (2.14).

На рисунке 2.3 представлены график функции (2.19) и координаты точек входа в поворот, определенные по формулам (2.11) и (2.12).

Как видно из рисунка 2.3, наблюдается полное соответствие аппроксимирующей функции координатам точек.

Склейка функции (2.16) и окружности радиуса  $R_T$  (2.15) дает функцию [59, 119]

$$y_{\Pi}(x) = \begin{cases} 6,445x^{0,33} - 0,085x^{1,932} , & x \leq 3,643; \\ 5,168 + \sqrt{15,163 - (x - 4,924)^2}, & x > 3,643. \end{cases} \quad (2.22)$$

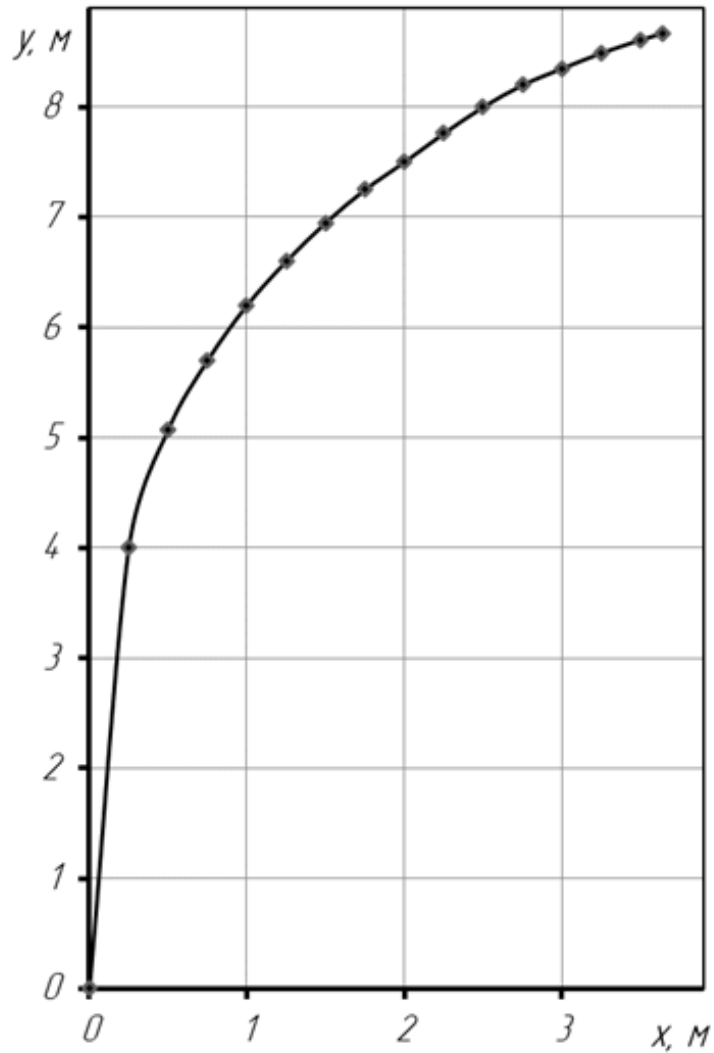


Рисунок 2.3 – График теоретической функции  $y(x)$  и координаты точек  $x(t)$  и  $y(t)$  кривой траектории входа в поворот при  $v = 2,556$  м/с,  $\omega = 0,155$  с<sup>-1</sup>

График функции (2.22) представлен на рисунке 2.4 (кривая 1).

Значение максимальной координаты участка входа в поворот (2.19) –  $x_{Bmax}=3,643$  м,  $y_{Bmax}=3,846$  м, центр сопряженной окружности (2.17), (2.18) определен из условий склейки (2.16):  $x_{OT}=4,924$  м,  $y_{OT}=5,168$  м (рисунок 2.2).

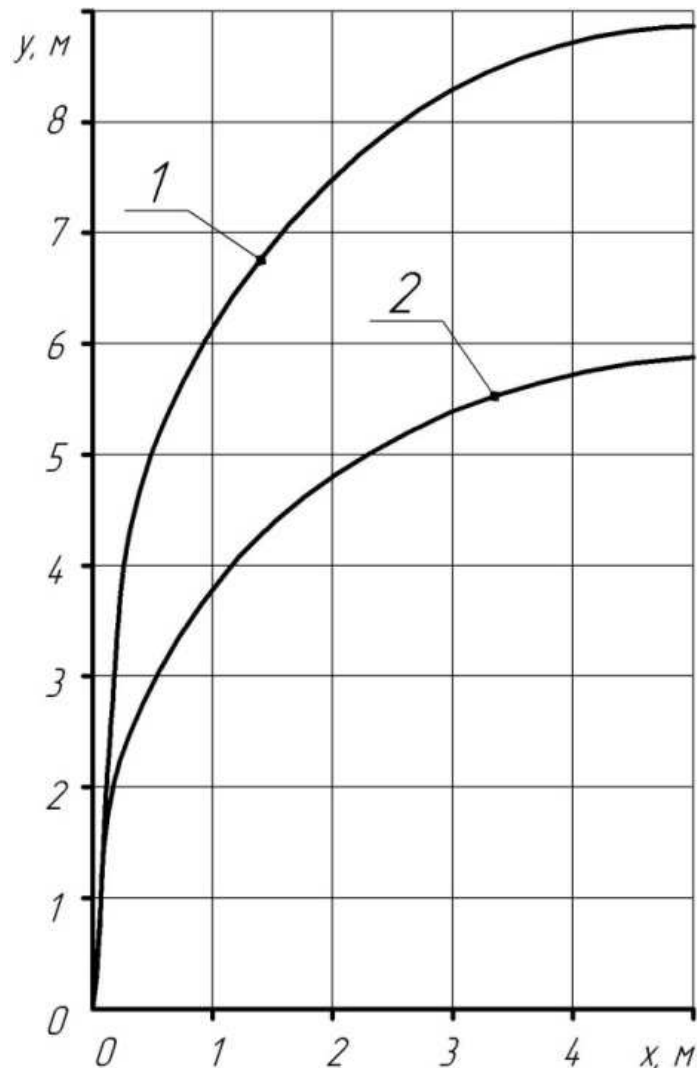
Используя ту же методику [94], при тех же конструктивных параметрах трактора, но при других эксплуатационных ( $v = 1,86$  м/с,  $\omega = 0,31$  с<sup>-1</sup> и  $t=2$  с) имеем аналогичные характеристики в следующем виде [59, 123]:

$$y_B(x) = 4,625x^{0,333} - 0,236x^{1,5}; \quad (2.23)$$

$$y_{\text{п}}(x) = \begin{cases} 4,625x^{0,333} - 0,236x^{1,5}, & x \leq 0,528; \\ 1,974 + \sqrt{15,163 - (x - 4,043)^2}, & x > 0,528; \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\rho(x) = -\frac{(1 + (\frac{1,539}{x^{0,667}} - 0,353x^{0,5})^2)^{1,5}}{-\frac{1,027}{x^{1,677}} - \frac{0,177}{x^{0,5}}}. \quad (2.25)$$

Верхние уравнения в системах (2.22) и (2.23) относятся к участку входа в поворот, нижние – к участку установившегося поворота.



$$1 - v = 2,556 \text{ м/с}, \omega = 0,155 \text{ с}^{-1}; 2 - v = 1,86 \text{ м/с}, \omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$$

Рисунок 2.4 – Графики теоретических функций кривых траекторий входа в поворот и установившегося поворота



Значение максимальной координаты участка входа в поворот для данного варианта (2.23) –  $x_{Bmax}=0,528$  м,  $y_{Bmax}=3,648$  м, а центр кривизны сопрягаемой с ним окружности (2.24) лежит в точке с координатами  $x_{OT}=4,043$  м,  $y_{OT}=1,974$  м. Формулы (2.21) и (2.25) дали при этом значения радиусов кривизны в конце участка входа в поворот, соответственно  $R=3,899$  м и  $R=3,9$  м, гораздо менее чем на 1 % отличающиеся от теоретического –  $R = 3,894$  м [52, 127, 128], что дает основания полагать о корректности выполненных действий при проведении аппроксимации исходных параметрических функций [94].

Результаты расчетов по уравнениям (2.24) приведены на рисунке 2.4 (кривая 2).

Как видно, исследованию подвергается только левая ветвь траектории выбранного вида поворота, для правой ветви траектории поворота (для части участка установившегося поворота и участка выхода из поворота) будем считать траекторию абсолютно «зеркальной» левой ветви, что вполне оправдано, так как при этом происходит переход от более динамически нагруженного состояния к менее нагруженному [25].

### 2.3. Методика аналитического определения действительной траектории поворота машинно-тракторного агрегата

При проведении полевых работ трактор Беларус-1221.2 [14] способен работать в комплектации с различными навесными устройствами: плугом, культиватором, сеялкой и т.д. Так как конструктивные, массово-габаритные параметры культиватора и сеялки во многом совпадают, то следовательно, условия движения МТА при повороте при этом достаточно близки, а соответственно, большую часть времени эксплуатации при проведении полевых работ трактор работает в составе указанных агрегатов, поэтому в качестве объекта для экспериментальных исследований и теоретического анализа дей-

ствительной траектории движения МТА выбран агрегат, составленный по схеме: Беларус-1221.2+СТВ-12 [71, 125].

Исходя из анализа, полученного в реальных условиях эксплуатации с помощью современной высокоточной навигационной системы [2, 100, 126], массива экспериментальных точек абсцисс ( $x$ ) и ординат ( $y$ ) кривой траектории [85], описываемой кинематическим центром колесного трактора Беларус-1221.2 с базовой навесной системой в составе выбранного агрегата с теми же характеристиками, которые приняты при исследовании теоретической траектории поворота [14]: вариант 1:  $v = 2,556$  м/с,  $\omega = 0,155$  с<sup>-1</sup>,  $L = 2,78$  м,  $\alpha_{max} = 0,62$  рад.,  $t = 4$  с; вариант 2:  $v = 1,86$  м/с,  $\omega = 0,31$  с<sup>-1</sup>,  $L = 2,78$  м,  $\alpha_{max} = 0,62$  рад.,  $t=2$  с, для аналитического получения действительной траектории принят корректирующий коэффициент сдвига теоретической траектории  $k=1,2$ . Используя формулы (2.19) и (2.23), получим уравнения действительной траектории входа в поворот для рассматриваемых вариантов [59, 120]:

$$y_{B1}(x) = k y_B = 7,734x^{0,33} - 0,1018x^{1,932}; \quad (2.26)$$

$$y_{B2}(x) = k y_B = 5,55x^{0,333} - 0,283x^{1,5}. \quad (2.27)$$

Радиусы окружностей постоянной кривизны участков установившегося поворота при этом определяются по формуле [60, 79]

$$\rho_1(x) = \frac{(1 + k^2 y_x'^2)^{1,5}}{|k y_x''|}.$$

Для первого и второго вариантов радиусы окружностей постоянной кривизны участков установившегося поворота будут вычисляться, с учетом (2.21) и (2.25), соответственно, по следующим выражениям (приложение Б) [59, 124]:

$$\rho_1(x) = - \frac{(1 + (\frac{3,0643}{x^{0,67}} - 0,23x^{0,932})^2)^{1,5}}{-\frac{1,71}{x^{1,67}} - \frac{0,184}{x^{0,068}}};$$

$$\rho(x) = -\frac{(1 + (\frac{2,216}{x^{0,667}} - 0,508x^{0,5})^2)^{1,5}}{-\frac{1,232}{x^{1,677}} - \frac{0,212}{x^{0,5}}}.$$

Аппроксимирующие функции, описывающие реальные траектории движения, принимают вид (приложение Б) [59, 124]:

$$y_{П1}(x) = \begin{cases} 7,734x^{0,33} - 0,1018x^{1,932}, & x \leq 3,643; \\ 8,043 + \sqrt{7,769 - (x - 4,717)^2}, & x > 3,643; \end{cases} \quad (2.28)$$

$$y_{П2}(x) = \begin{cases} 5,55x^{0,333} - 0,283x^{1,5}, & x \leq 0,528; \\ 5,772 + \sqrt{5,575 - (x - 3,385)^2}, & x > 0,528. \end{cases} \quad (2.29)$$

На рисунках 2.5 и 2.6 представлены графики действительных траекторий движения (2.17) и (2.18) и точек экспериментальных данных для исследуемых случаев.

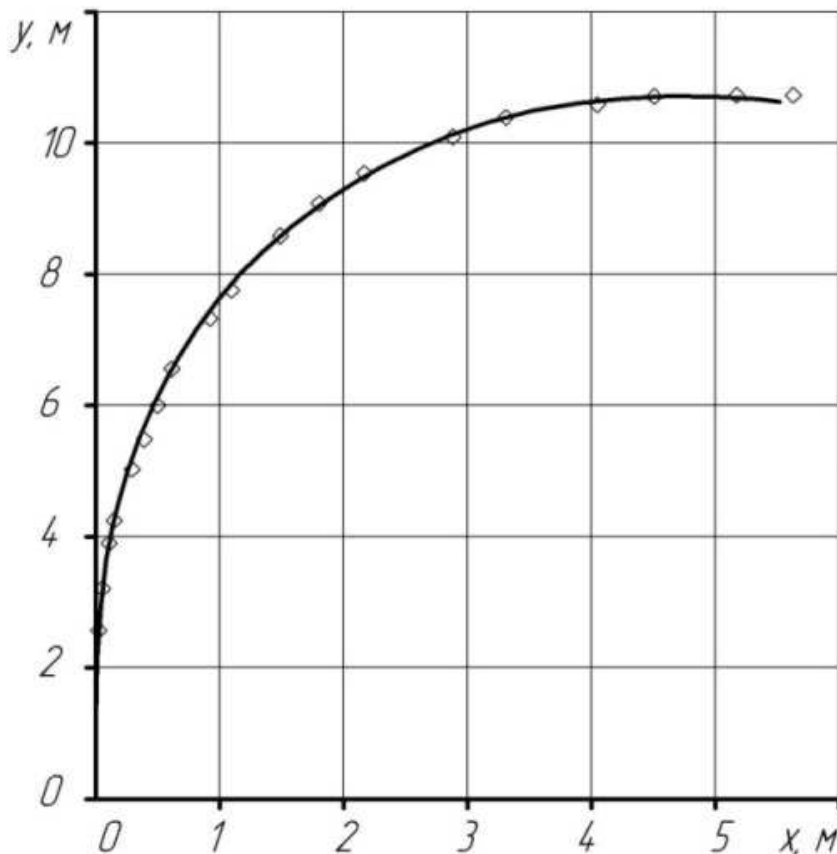


Рисунок 2.5 – Сравнение графика действительной траектории движения с экспериментальными данными при  $v = 2,556$  м/с,  $\omega = 0,155$  с<sup>-1</sup>

При разработке алгоритма принято, что максимальные значения абсцисс действительных траекторий движения участков входа в поворот  $x_{Bmax}$  (рисунки 2.5 и 2.6) остаются неизменными, равными для аналогичных участков теоретической траектории (рисунок 2.4). При этом соответствующие им ординаты (рисунки 2.5 и 2.6) согласно (2.26) и (2.27) соответственно равны  $y_{Bmax}=10,62$  м и  $y_{Bmax}=4,378$  м. Увеличение в сравнении с теоретическими ординатами составило соответственно 16,71 % и 15,85 %. При этом также выявлено увеличение максимальных ординат кривых траекторий беспетлевого кругового поворота для обоих случаев в пределах 2 м (2.28), (2.29), что в процентном отношении к теоретическим значениям дает 20...30 %.

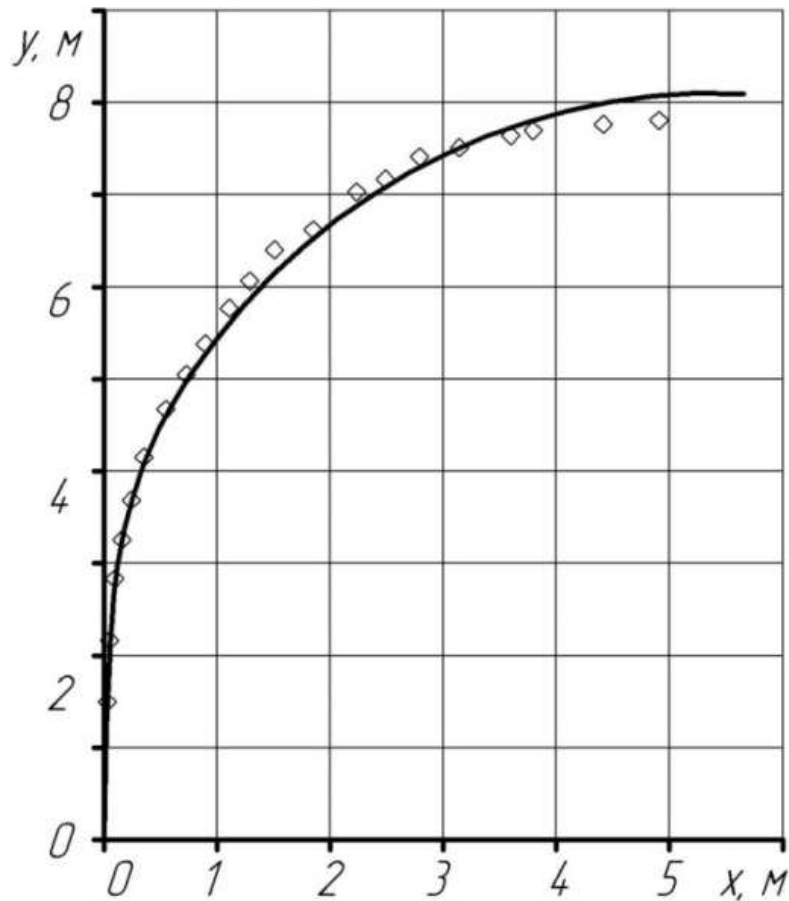


Рисунок 2.6 – Сравнение графика действительной траектории движения с экспериментальными данными при  $v = 1,86$  м/с,  $\omega = 0,31$  с<sup>-1</sup>

Сравнение кривых поворота с наложенными на них точками экспериментальных данных (рисунки 2.5 и 2.6) позволяет сделать вывод о корректности проведенных исследований, так как максимальное отличие их ординат не превышает 2,5 %, что дает основание использовать предложенную методику для оценки криволинейного движения колесной машины [92].

## 2.4. Влияние жесткости навесной системы на поворачиваемость машинно-тракторного агрегата

### 2.4.1. Обоснование выбора упругого элемента для навесной системы

Различные виды эластомеров на основе композитных и полимерных материалов широко применяются в технике для гашения колебаний и снижения уровня внешнего динамического воздействия на детали и узлы, а также – между ними. Применение упругих элементов ограничивается в большинстве случаев конструктивными особенностями объекта защиты, так как в большинстве случаев, как правило, вписать дополнительный узел или даже деталь в конструкцию агрегата не позволяет ограниченное пространство.

Исходя из поставленной задачи подбора формы, размеров, вида, типа, упругого элемента и схемы нагружения охватываемой навесной рамки (треугольника) автосцепки трактора *I* (рисунок 1.2) в плоскости, перпендикулярной его боковой поверхности, величина суммарной нагрузки, действующей на нее, определяется по следующей формуле (рисунок 2.7) [10, 133, 149]

$$F_H = F_{ин} + G_H, \quad (2.30)$$

где  $F_{ин}$  – составляющая силы инерции, приходящаяся на боковую поверхность треугольника автосцепки, Н;

$G_H$  – составляющая силы тяжести, действующая на боковую поверхность треугольника автосцепки, Н.

Расчет силы  $F_{ин}$  в (2.30) проводим по формуле

$$F_{ин} = F_и \cos \tau, \quad (2.31)$$

где  $\tau$  – половина угла вершины треугольника автосцепки, град.;

$F_{и}$  – центробежная сила инерции, действующая на навеску трактора [10, 133, 149], Н.

$$F_{и} = m_{об}a, \quad (2.32)$$

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

$a$  – боковое ускорение МТА,  $м/с^2$ .

Силу тяжести  $G_{н}$  в зависимости (2.30) находим из выражения

$$G_{н} = G_{об} \cos \lambda = m_{об}g \cos \lambda, \quad (2.33)$$

где  $G_{об}$  – сила тяжести оборудования, Н;

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

$\lambda$  – угол между боковой поверхностью и основанием треугольника автосцепки, град.

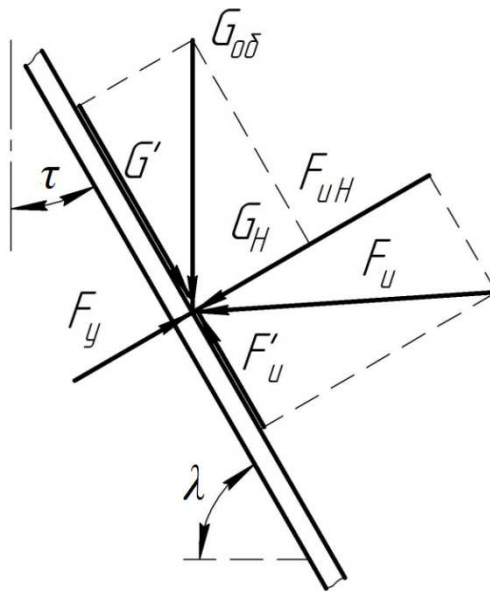


Рисунок 2.7 – Схема сил, действующих на боковую поверхность треугольника автосцепки

С учетом (2.30), (2.31), (2.32) и (2.33) получены выражения для определения силы, действующей на боковую поверхность треугольника автосцепки

$$F_{н} = m_{об}(a \cos \tau + g \cos \lambda). \quad (2.34)$$

Исходя из вида и геометрических параметров боковой поверхности треугольника, принимаем решение о возможности установки на ней упругого

элемента в форме параллелепипеда со следующими размерами: длина  $a$ , ширина  $b$ , высота  $h$ .

Так как теоретические и экспериментальные исследования по определению физико-механических свойств изделий из эластомеров проведены, в основном, для образцов цилиндрической формы  $h$  [148, 152], то разобьем параллелепипед на  $n=a/b$  фигур цилиндрической формы радиусом  $r$  и высотой  $h$ .

В соответствии с (2.34) удельная сила, действующая на один цилиндр радиусом  $r$  и высотой  $h$ , определяется по формуле

$$F_0 = \frac{F_n}{n}. \quad (2.35)$$

В соответствии с ранее озвученной гипотезой о положительном влиянии на уровень динамической нагрузки со стороны навесного оборудования на трактор и условия качения движителей упругой связи между ними, выполнен анализ физико-механических свойств эластомеров с целью выбора материала для установки в сочленение между трактором и навесным оборудованием.

Наиболее распространенным материалом, применяемым в конструкциях различной техники для гашения вибраций и уменьшения колебаний, снижения их уровня, является резина. Несмотря на то, что резиновые изделия обладают довольно высокими эластичными свойствами, у них есть ряд серьезных недостатков, среди которых стоит отметить подверженность старению, относительно низкая износостойкость, подверженность к разрушению под воздействием солнечных лучей и перепадов температур [148].

Альтернативой резине является полиуретан [148], который обладает рядом преимуществ (таблица 2.1) и является наиболее предпочтительным материалом для изготовления эластичной прокладки, что обусловлено его физическими и механическими свойствами, среди которых особенно стоит выделить следующие [151].

1. Высокая абразивная стойкость.

2. Способность противостоять достаточно высоким нагрузкам.
3. Широкий диапазон твердости.
4. Высокая устойчивость к распространению надрезов.
5. Высокая устойчивость к атмосферным воздействиям, таким как окислители (кислород, озон), влага, ультрафиолетовая радиация, нагрев.
6. Низкий коэффициент трения.
7. Длительное сохранение рабочих размеров.
8. Возможность практически всех видов механической обработки.

Таблица 2.1 – Физико-механические свойства полиуретана и резины

Характеристика	Полиуретан	Резина
Твердость по Шору (шкала А)	40...98	65...95
Предел прочности при разрыве, кг/см <sup>2</sup>	312	115
Характеристика	Полиуретан	Резина
Относительное удлинение при разрыве, %	500...600	300
Сопротивление раздиру, кг/см <sup>2</sup>	58	20
Усадка, %	33,5	35...40
Эластичность, %	40	30
Абразивная стойкость (Н22)	10	2
Температурный предел хрупкости, °С	-77	-70
Рабочий диапазон температур, °С	-70 ...+120	-30 ...+50
Коэффициент морозостойкости	58	20
Истираемость, м <sup>2</sup> /(т·Дж)	11,25...26,6	45...80

Все эти преимущества показывают, что полиуретан является весьма подходящим материалом для использования в качестве эластомера в модернизированной конструкции навесной системы трактора. Применение данного



материала обеспечивает необходимую надежность и долговечность изготавливаемых из него деталей даже под постоянным действием статических и динамических нагрузок [148, 151].

Согласно [152] осадку одного цилиндрического элемента из полиуретана радиусом  $r$  и высотой  $h$  можно получить из следующего выражения:

$$\delta = \frac{F_0 \cdot h}{E \cdot S(0,73 + 0,46 \cdot \gamma^2)}, \quad (2.36)$$

где  $E$  – модуль упругости полиуретана при сжатии, МПа;

$S$  – площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>.

$\gamma$  – безразмерный коэффициент, характеризующий отношение радиуса цилиндра  $r$  к его высоте  $h$

$$\gamma = \frac{r}{h}.$$

С учетом (2.35) и (2.36) жесткость предполагаемого упругого элемента равна

$$C = \frac{F_0}{\delta}.$$

Таким образом, величину силы инерции, которую может компенсировать сила упругости элемента из полиуретана, встроенного в конструкцию навески на боковой поверхности треугольника автосцепки, определим по формуле

$$F_{\text{ин}} = F_y = C\delta.$$

Исходя из проведенного анализа и из конструктивных соображений, выбраны геометрические параметры упругого элемента, изготовленного из полиуретана, встроенного в конструкцию навесной системы трактора: длина  $a = 600$  мм, ширина  $b = 80$  мм, высота  $h = 10$  мм.

Основной параметр, влияющий на поглощающую способность выбранного эластомера – это его высота  $h$ , однако, ее увеличение с целью большей компенсации силы инерции невозможно ввиду отсутствия необходимого пространства между треугольником и охватывающей рамкой. Для эластичного элемента из полиуретана, установленного на боковую поверхность тре-

угольника автосцепки с заданными геометрическими параметрами, доля поглощенной силы инерции составила 61,5 %, что является достаточно высоким показателем и позволяет использовать данный материал в конструкции навесной системы трактора для повышения устойчивости движения и улучшения управляемости.

#### 2.4.2. Анализ применения упругого элемента в навесной системе машинно-тракторного агрегата

Одним из путей уменьшения влияния навесного оборудования на процесс криволинейного движения МТА является снижение инерционных нагрузок со стороны оборудования на трактор [16, 33], следствием чего является повышение его устойчивости и улучшение управляемости за счет снижения динамических нагрузок, передающихся через детали и узлы навесного устройства на движители трактора, так как именно оно является источником передачи различных сил на них.

Исходя из этого, усовершенствована конструкция задней навесной системы трактора (приложение А) [111], в которой между охватываемой навесной рамкой трактора *1* и замком – охватывающей навесной рамкой оборудования (рисунок 1.2), на внешних поверхностях квадратных труб рамки *1* размещена прокладка из упругого материала – полиуретана [148]. Для сохранения качественных показателей материала прокладки, в первую очередь, для предотвращения задиров в момент сочленения трактора и оборудования, сверху к прокладке прикрепляются металлические пластины.

Указанные конструктивные изменения были внесены в навесную систему трактора Беларус-1221.2, способного выполнять обширный ряд сельскохозяйственных операций, являющегося в настоящее время основной тяговой единицей в сельскохозяйственном производстве Российской Федерации [1].

При проведении экспериментальных исследований МТА Беларус-1221.2+СТВ-12 с модернизированной навесной системой [111] в реальных

условиях эксплуатации с помощью современной высокоточной навигационной системы [2, 164] были получены массивы действительных значений абсцисс и ординат кривых траекторий кинематического центра трактора при условиях, соответствующих варианту 1 эксплуатации (рисунок 2.8, точки, лежащие на кривой 2 или близкие к ней). Исходя из анализа и сравнения массива экспериментальных данных с массивом теоретических значений абсцисс и ординат (2.11) и (2.12) для аналитического получения действительной траектории принят корректирующий коэффициент сдвига теоретических траекторий (2.22), представленных в виде кривых 1 на рисунках 2.4 и 2.8,  $k_y = 1,12$  (приложение Г) [59, 121]. При этом уравнение реальной кривой траектории участка входа в поворот для принятых условий принимает следующий вид

$$y_{ДВ1}(x) = k_y y(x) = 7,218x^{0,33} - 0,095x^{1,932}. \quad (2.36)$$

Подставим формулу (2.36) в уравнение (2.20), после некоторых преобразований, получим радиус кривизны участка установившегося поворота

$$\rho_1(x) = \frac{\left(1 + \left(2,382x^{-0,67} - 0,184x^{0,932}\right)^2\right)^{1,5}}{1,596x^{-1,67} + 0,171x^{-0,068}}. \quad (2.37)$$

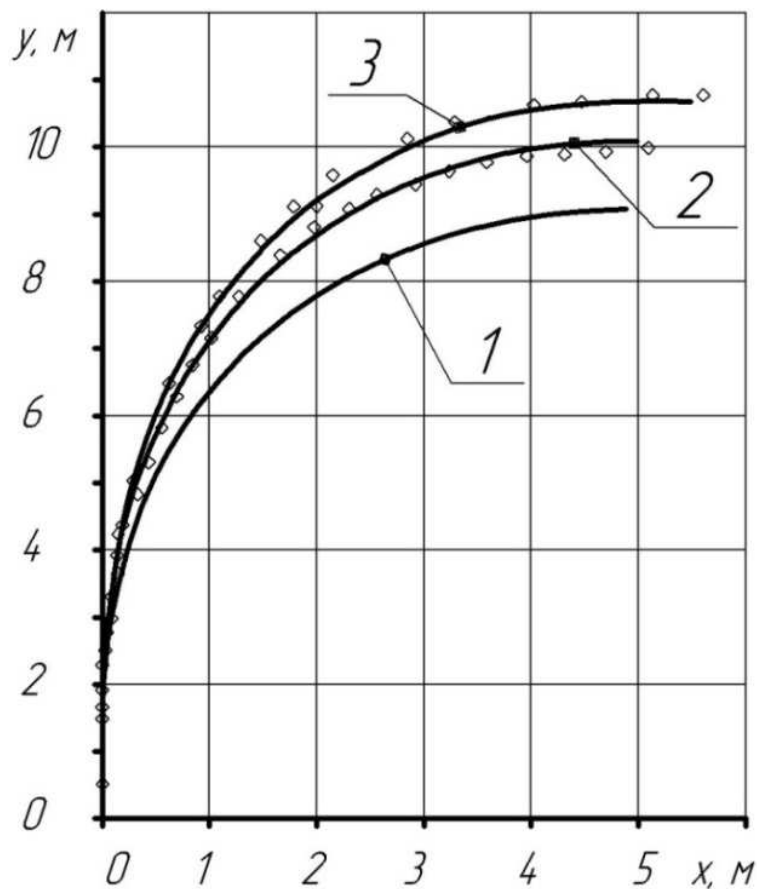
Склейка функций (2.36) и (2.37) позволила получить аппроксимирующие функции явного вида для двух основных ветвей действительных кривых траекторий кругового беспетлевого поворота (рисунок 2.8, кривая 2) (приложение Д) [59, 79, 122]

$$y_{ДП1}(x) = \begin{cases} 7,218x^{0,33} - 0,095x^{1,932}, & x \leq 3,643; \\ 6,473 + \sqrt{13,221 - (x - 4,959)^2}, & x > 3,643. \end{cases} \quad (2.38)$$

Соответствующие (2.38) максимальные координаты конца участка входа в поворот при завершении данного маневра и центра сопрягаемой с ним окружности  $R_D$  участка установившегося поворота равны соответственно  $x_{1\max} = 3,643$  м,  $y_{1\max} = 9,863$  м и  $x_{O2} = 4,959$  м,  $y_{O2} = 6,473$  м; действительный радиус поворота – радиус окружности участка установившегося поворота  $R_D = 3,636$  м (рисунок 2.8, кривая 2).

Для исходных данных по варианту 2 явный вид функции теоретической траектории получен в виде системы уравнений (2.24). При этом анализ массивов теоретических и опытных значений координат траекторий также дал значение  $k_y = 1,12$  и явная параметрическая функция приняла следующий вид (рисунок 2.9, кривая 2) [59, 79, 122]

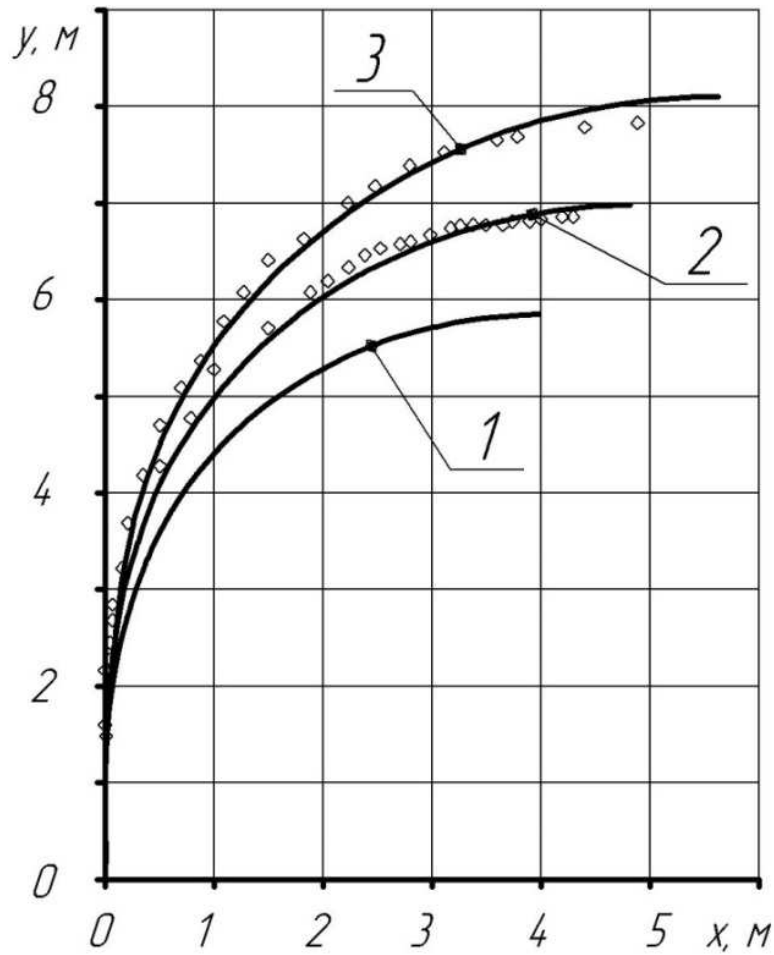
$$y_{\text{ДП2}}(x) = \begin{cases} 5,18x^{0,333} - 0,264x^{1,5}, & x \leq 0,528; \\ 2,303 + \sqrt{21,953 - (x - 4,845)^2}, & x > 0,528. \end{cases} \quad (2.39)$$



◇ – 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 2.8 – Траектории поворота МТА при  $v=2,556$  м/с,  $\omega=0,155$  с<sup>-1</sup>



◇ – экспериментальные точки траекторий поворота;

1 – график аппроксимирующей явного вида теоретической функции 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 2.9 – Траектории поворота МТА при  $v=1,86$  м/с,  $\omega=0,31$  с<sup>-1</sup>

Формула для определения радиуса окружности этапа установившегося поворота получена подстановкой первой функции системы (2.39) в уравнение (2.20)

$$\rho_2(x) = \frac{\left(1 + (1,725x^{-0,667} - 0,396x^{0,5})^2\right)^{1,5}}{1,15x^{-1,667} + 0,198x^{-0,5}}. \quad (2.40)$$

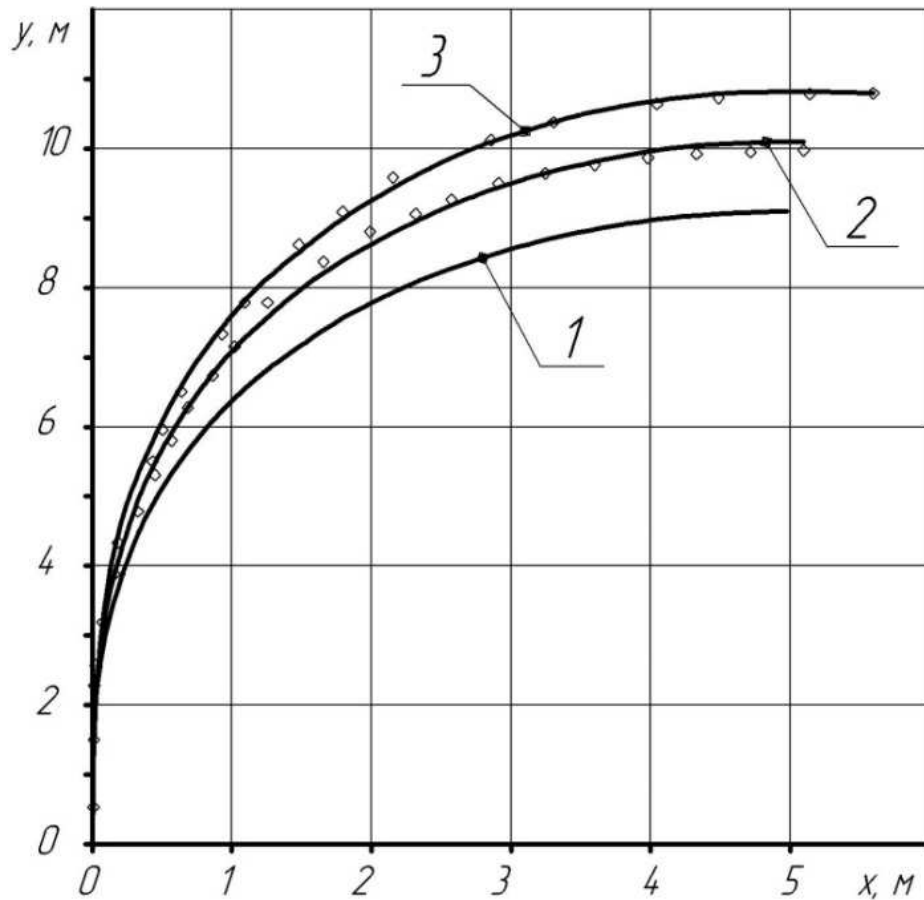
Геометрические параметры кривой траектории (2.39) следующие (рисунок 2.9, кривая 2):  $x_{1\max} = 0,528$  м,  $y_{1\max} = 4,124$  м;  $x_{02} = 4,845$  м,  $y_{02} = 2,3033$  м;  $R_{\text{д}} = 4,685$  м (2.40).

Таким образом, для обоих вариантов начально-исходных конструктивных параметров и кинематических характеристик имеем постоянный коэффициент сдвига теоретической траектории при использовании упругого элемента в навесной системе трактора  $k_y = 1,12$ , соответствующий выбранным основным условиям эксплуатации: комплектации агрегата и свойствам опорной поверхности.

На рисунках 2.8 и 2.9 приведены также экспериментальные точки координат кривых траекторий поворота и полученные с использованием вышеизложенной методики аппроксимирующие эти точки графики (кривые 3) для исследуемого МТА с базовой навесной системой при выбранном для обоих вариантов коэффициенте  $k_y = 1,2$ . Максимальное отклонение расчетных кривых траекторий по оси ординат от экспериментальных точек составило 0,153 м и 0,214 м (рисунок 2.8, кривые 2 и 3), что дает соответственно 1,5 % и 2 % погрешности, а по второму варианту (рисунок 2.9, кривые 2 и 3) имеем соответственно 0,296 м и 0,217 м, то есть 4 % и 2,6 %.

Адекватность полученных результатов исследований доказывает и тот факт, что умножение на коэффициент  $k_y = 1,12$  формул параметрических функций (2.11) и (2.12) и теоретического минимального радиуса поворота (2.8) дали графики (рисунок 2.10), практически совпадающие и с экспериментальными точками кривых траекторий, и с соответствующими графиками рисунка 2.8. При этом получены следующие значения длин соответствующих траекторий полного цикла кругового беспетлевого поворота: по рисунку 2.8:  $l_1 = 21,64$  м (кривая 1),  $l_2 = 23,708$  м (кривая 2),  $l_3 = 25,584$  м (кривая 3); по рисунку 2.10:  $l_1 = 23,194$  м (кривая 1),  $l_2 = 25,228$  м (кривая 2),  $l_3 = 27,773$  м (кривая 3), где максимальное расхождение составило не более 7,1 %. Абсциссы  $x_{\max}$

и ординаты  $y_{\max}$  поворотной полосы в данных случаях отличаются друг от друга, соответственно, в пределах 4 % и 1 % и имеют величины: 9,792 м и 9,08 м (рисунок 2.8, кривая 1); 9,95 м и 10,092 м (рисунок 2.8, кривая 2); 10,752 м и 10,678 м (рисунок 2.8, кривая 3); 9,984 м и 9,094 м (рисунок 2.10, кривая 1); 10,232 м и 10,095 м (рисунок 2.10, кривая 2); 11,232 м и 10,792 м (рисунок 2.10, кривая 3).



◇ – экспериментальные точки траекторий поворота;

- 1 – график параметрической функции теоретической траектории поворота;  
 2 – график параметрической функции действительной траектории поворота (опытная навеска);  
 3 – график параметрической функции действительной траектории поворота (базовая навеска)

Рисунок 2.10 – Траектории поворота МТА при  $v = 2,556$  м/с,  $\omega = 0,155$  с<sup>-1</sup>

Как видно, при использовании базовой навесной системы имеем более значительное, на  $\Delta x_{\max} = 0,98$  м,  $\Delta y_{\max} = 1,6$  м (рисунок 2.8) и на  $\Delta x_{\max} = 3,3$  м,  $\Delta y_{\max} = 2,25$  м (рисунок 2.9) максимальное отклонение для обоих режимов движения МТА от заданной траектории в сравнении с тем же агрегатом с опытной навеской:  $\Delta x_{\max} = 0,32$  м,  $\Delta y_{\max} = 0,6$  м (рисунок 2.8) и  $\Delta x_{\max} = 1,7$  м,  $\Delta y_{\max} = 1,13$  м (рисунок 2.9), что позволит уменьшить площадь поворотной полосы примерно на 12,5...25 %. При этом длина полного цикла изучаемого вида поворота сократилась соответственно на 1,9 м и 3,14 м, что позволит снизить расход топлива трактором [33].

Также предложенный подход к аналитическому представлению действительной траектории позволяет определить величину бокового отклонения трактора от заданной траектории без проведения очень сложных, материалоемких, трудозатратных и гораздо более дорогостоящих экспериментов по оценке условий качения каждого колеса трактора [5, 69].

## 2.5. Выводы

1. Полученные в параметрической форме уравнения для определения текущих координат криволинейной траектории движения кинематического центра колесного трактора при входе в поворот позволяют провести расчет значений координат, а методом нелинейной аппроксимации этих координат – выбрать для траектории функцию явного вида. Сравнение результатов расчетов с использованием функций параметрического и явного видов показали достаточную сходимость результатов.

2. Предложенная методика определения бокового отклонения от требуемой траектории позволяет аналитически описать действительную траекторию движения колесного трактора, а изменяя поступательную скорость движения и угловую скорость поворота управляемых колес – определить параметры, необходимые для выполнения оптимального беспетлевого поворота.



3. Полученная аналитическая зависимость для описания кривой траектории поворота дает возможность рассчитать отклонения колесной машины от заданной траектории при выполнении маневра поворота.

4. Процесс входа в поворот колесной машины является основополагающим при формировании траектории поворота и, следовательно – при оценке устойчивости движения.

5. Полученные значения корректирующих коэффициентов сдвига  $k=1,2$  и  $k=1,12$  постоянны для принятых конструктивных и эксплуатационных условий движения (продольная база, максимальный угол и угловая скорость поворота колес) и не зависят от скорости поступательного движения колесного трактора.

6. Так как силовое воздействие на колеса трактора со стороны навесного оборудования передается через продольные тяги, то его уменьшение возможно за счет установки упругих полиуретановых 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.

7. Анализ результатов расчетов по полученным аналитическим функциям явного вида для описания теоретической и действительной кривых траектории поворота трактора 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. Выявленное значение коэффициента сдвига  $k_y = 1,12$  теоретической траектории от действительной является постоянным для выбранной комплектации агрегата и условий движения.

8. Корректность полученных результатов исследований подтверждается совпадением кривых действительных траекторий, рассчитанных с помощью функций явного и параметрического вида, и выявленными при этом одинаковыми коэффициентами сдвига, и, тем, что наибольшая разница параметров этих кривых не превышает 1...7 %.

### 3. Программа и методика экспериментальных исследований

#### 3.1. Программа экспериментальных исследований

Для подтверждения эффективности применения на тракторе Беларус-1221.2 усовершенствованной навесной системы, разработки аналитических методов описания действительной криволинейной траектории движения МТА и подтверждения адекватности теоретических математических моделей реальному технологическому процессу были проведены лабораторные и полевые эксперименты.

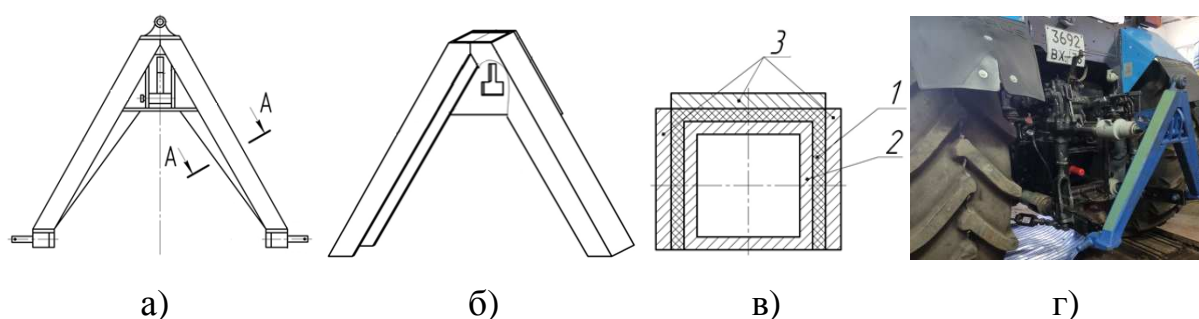
Исследования проводились на тракторе класса 2 со всеми ведущими и передними управляемыми колесами Беларус-1221.2 [14]. Трактор агрегатировался с навесным оборудованием: плугом ПЛН-4-35 и сеялкой СТВ-12 и, чтобы определить степень влияния навесного оборудования на поворачиваемость были поставлены также опыты с одиночным трактором.

В ходе испытаний трактор оборудовался модернизированной и серийной задней навесной системой [41, 111]. В модернизированной конструкции навесной системы между охватываемой навесной рамкой трактора (рисунок 3.1а) и охватывающей навесной рамкой орудия (рисунок 3.1б) размещена прокладка из упругого материала – полиуретана *1* (рисунок 3.1в) (приложение А) [111]. Прокладка *1* установлена на внешних охватываемых поверхностях швеллера *2*. Для сохранения качественных показателей упругого материала прокладки, в первую очередь, для предотвращения задиров в момент сочленения трактора и орудия, к ней сверху прикреплены металлические пластины *3* (рисунок 3.1в, г).

Программа экспериментальных исследований состояла из следующих этапов:

- оборудование трактора Беларус-1221.2 опытной навесной системой;
- подготовка и проверка измерительных приборов и оборудования;
- тарировка измерительных приборов;

- подготовка МТА к работе и установка на него необходимых для проведения экспериментов приборов, оборудования и приспособлений;
- проведение полевых испытаний.



а)

б)

в)

г)

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 3.1 – Усовершенствованная конструкция задней навесной системы трактора Беларус-1221.2

### 3.2. Условия и методика проведения лабораторных и полевых исследований

#### 3.2.1. Лабораторные исследования

Лабораторные исследования проводились для определения характеристик, необходимых при моделировании процесса криволинейного движения МТА, тарировки измерительных приборов и настройки оборудования.

Для успешного проведения полевых испытаний необходимо было выполнить ряд подготовительных операций в лабораторных условиях. Одна из них – определение массово-геометрических параметров трактора и агрегируемых с ним орудий. Массы трактора и МТА с установленным измерительным оборудованием и полностью заправленным топливным баком и утяжелителем массой 75 кг на месте оператора определялась путем взвешивания

на автомобильных весах. Точность взвешивания составила  $\pm 0,2$  %. По известной методике [32] были определены координаты центра масс трактора и МТА на платформенных весах. Геометрические размеры трактора и навесного оборудования определялись на ровной горизонтальной поверхности при помощи рулетки, инструментальной линейки и лазерного дальномера с функцией измерения углов. Точность измерительных приборов –  $\pm 1$  мм [43].

Для точного измерения требуемых параметров во время полевых испытаний необходимо провести тарировку датчиков, определить тарировочные коэффициенты с последующей конвертацией полученных значений в общепринятые физические величины. Для определения усилий во всех трех продольных тягах навесного устройства использовались тензозвенья, для тарировки которых необходимо было воссоздать нагрузки, которые будут воздействовать на звено в ходе полевых испытаний [86, 132]. В лабораторных условиях это было осуществлено при помощи универсальной разрывной машины. Величина прилагаемого усилия контролировалась динамометром [93].

В результате были получены зависимости показаний напряжений в тензозвеньях от воспринимаемой ими нагрузки. У всех тензозвеньев данная зависимость – линейная (рисунок 3.2), что позволило достоверно определить их тарировочные коэффициенты [43].

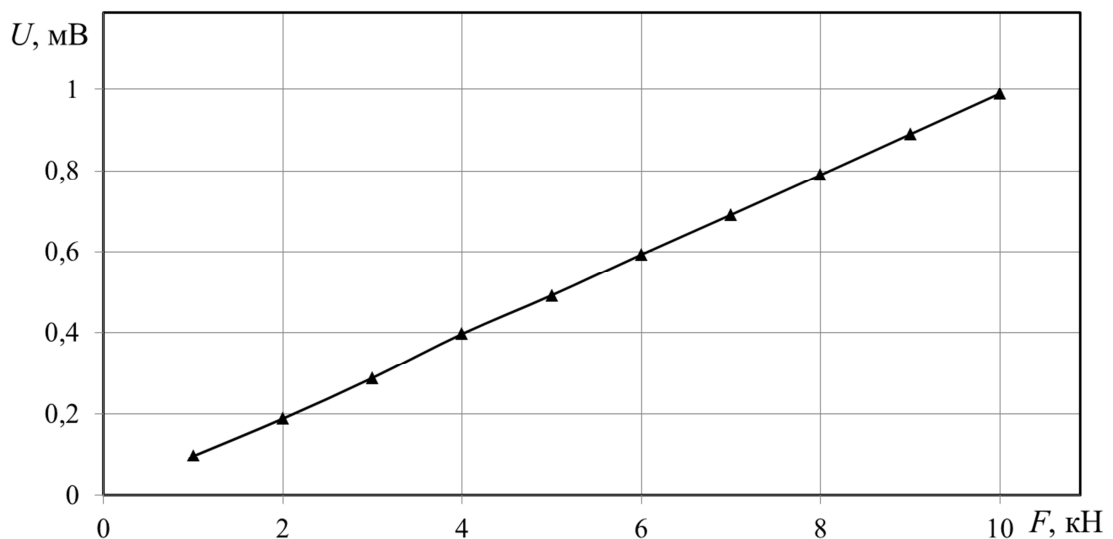


Рисунок 3.2 – Тарировочный график тензозвена

Таким образом, в дальнейшем в процессе экспериментальных исследований с помощью тарифовочных коэффициентов были получены действительные значения нагрузок, передаваемых через тензозвенья на продольные тяги навесного устройства.

В процессе подготовки оборудования к полевым опытам необходимо настроить и откалибровать навигационную систему и подруливающее устройство [2, 153, 164]. В память навигационного модуля необходимо внести сведения о тракторе, в том числе массово-геометрические параметры, а также информацию о поле, на котором проводилась серия заездов и поворотов.

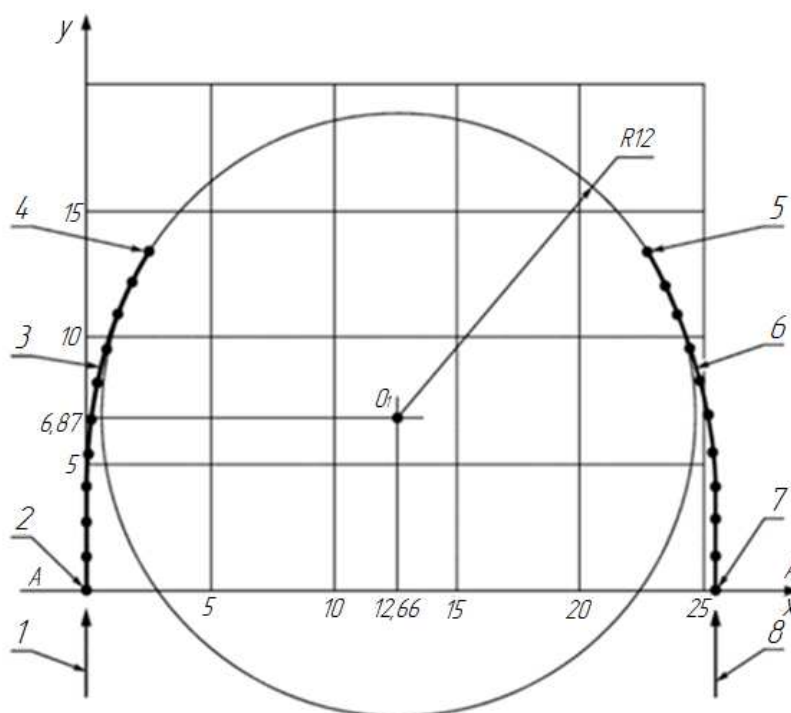
### 3.2.2. Полевые исследования

#### 3.2.2.1. Обоснование методики полевых экспериментальных исследований

Проведенный анализ регламентирующих документов – ГОСТов, устанавливающих нормы и правила при испытаниях колесных машин на устойчивость и управляемость (ГОСТ Р 51960-2002 «Тракторы сельскохозяйственные колесные. Методы оценки управляемости» и ГОСТ Р 31507-2012 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний») [42, 51], показал, что в качестве критериев для оценки управляемости и устойчивости применяются: усилие на рулевом колесе, время и максимальная скорость выполнения маневра при движении по заданной криволинейной траектории движения на твердой поверхности.

Согласно ГОСТ 30752-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определение наименьшего и габаритного диаметров окружности поворота» [49], который предназначен для сертификации, установлены методы определения наименьшего и габаритного диаметров окружности поворота колесных сельскохозяйственных тракторов на твердом покрытии на минимально возможной скорости движения, не превышающей 2 км/ч.

ГОСТ Р 51960-2002 «Тракторы сельскохозяйственные колесные. Методы оценки управляемости» [51] устанавливает в качестве метода для оценки управляемости сельскохозяйственных колесных тракторов усилие на органе рулевого управления при движении трактора с исправным рулевым управлением по траектории, приведенной на рисунке 3.3 (размеры в метрах), имеющей протяженность, равную пути, проходимому трактором за 5 с, и с рулевым управлением в аварийном состоянии при движении по подобного вида траектории, только с несколько отличными геометрическими характеристиками, имеющей протяженность, равную пути, проходимому трактором за 8 с, по площадке с твердым покрытием. Трактор должен двигаться со скоростью  $10 \pm 1$  км/ч по определенной траектории при повороте направо – левым передним колесом, при повороте налево – правым передним колесом.



- 1, 8 – направления движения трактора перед выездом на траекторию;  
 2, 7 – стартовые точки движения по траекториям; 3 – траектория поворота трактора направо; 4, 5 – финишные точки движения по траекториям;  
 6 – траектория поворота трактора налево; AA – стартовая линия

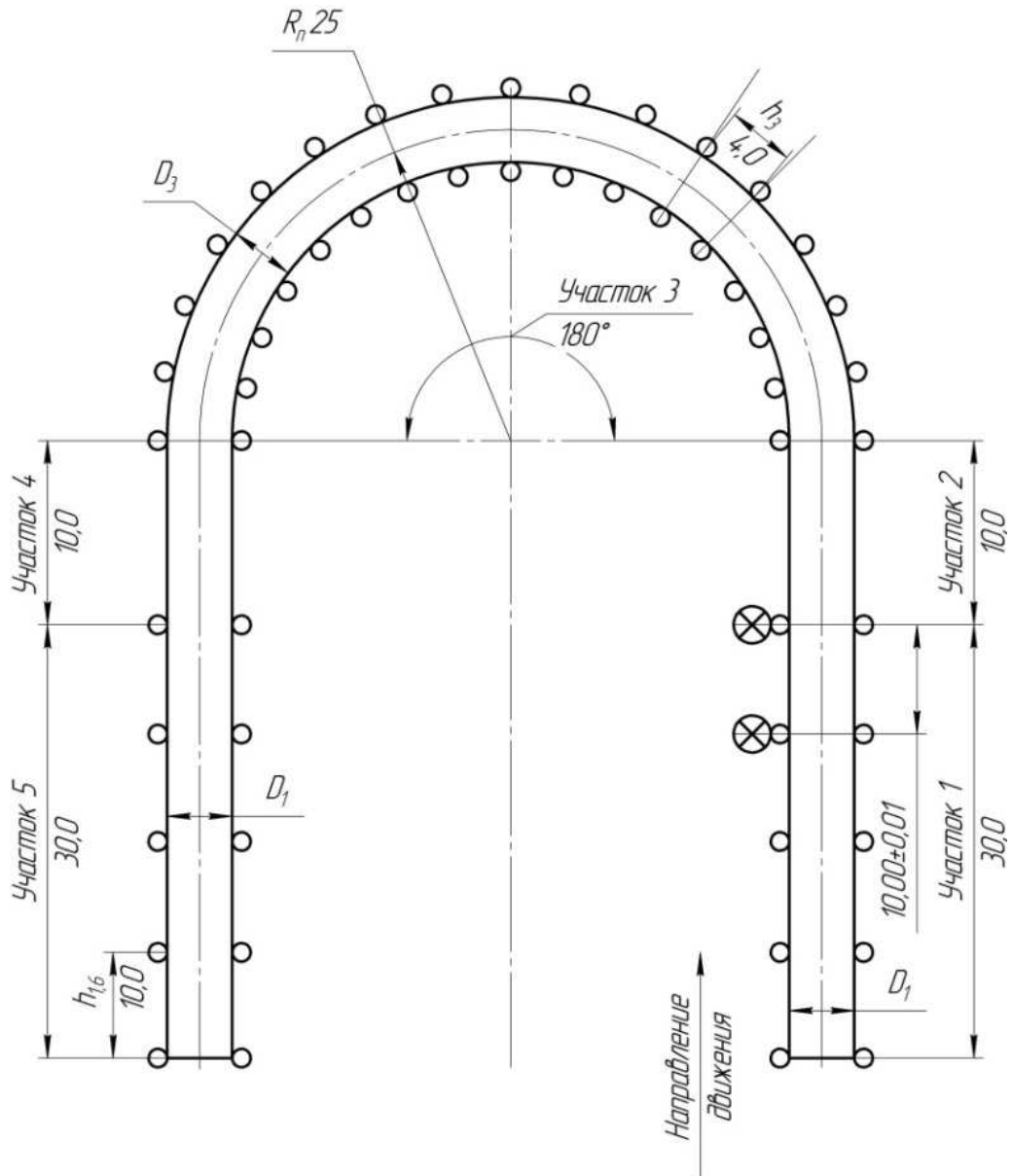
Рисунок 3.3 – Разметка участка траектории движения трактора для экспериментальной оценки управляемости по ГОСТ 51960-2002

Перед выездом на траекторию трактор должен иметь указанную скорость и положение, соответствующее прямолинейному движению. Измерения начинают с момента пересечения передними колесами трактора линии *АА* и заканчивают в момент достижения передними колесами точки сопряжения с окружностью радиусом 12 м (точки 4 и 5). Усилие управления на рулевом колесе трактора, имеющего привод передних колес, определяют как при включенном, так и при выключенном приводе, с помощью динамометра. Все измерения проводятся не менее трех раз при повороте трактора как направо, так и налево. Контроль за фактической траекторией движения трактора и за отклонением ее от траектории, обозначенной разметкой, осуществляют по следу маркировочного устройства.

В ГОСТ 31507-2012 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» [42], регламентирующем критерии и методы оценки управляемости и устойчивости некоторых типов автотранспортных средств, при испытаниях на повороте предложена траектория на поверхности дороги с твердым покрытием, приведенная на рисунке 3.4 (размеры в метрах). В качестве критерия оценки применяется максимальная скорость автотранспортного средства при выполнении маневра, определяемая как среднее арифметическое значение скоростей трех заездов с наибольшей скоростью, при которой не было выхода за пределы разметки или отрыва одного из колес от поверхности дороги.

Однако, осуществить движение по обозначенной разметкой траектории при проведении испытаний по указанным методикам довольно сложно даже на твердом опорном основании, а на рыхлом деформируемом грунте вообще не представляется возможным ввиду наличия у МТА сельскохозяйственного назначения бокового скольжения и заноса, которые являются критическими условиями движения [89]. Именно из условий их отсутствия необходимо определение максимальной скорости выполнения маневра при движении не по известной траектории, а по фактической [91].





*1* – вертикальные ограничители разметки коридоров движения; *2* – датчики измерения скорости;  $h_{1,5}$  – шаг установки вертикальных ограничителей на участках *1* и *5*;  $h_3$  – шаг установки вертикальных ограничителей на участке;  $D_1$  – ширина коридора на участках *1* и *5*;  $D_3$  – ширина коридора на участке *3*

Рисунок 3.4 – Разметка участка испытаний «поворот  $R_n = 25$  м»

по ГОСТ 31507-2012

Таким образом, разметки участков траекторий для испытаний на устойчивость и управляемость и по ГОСТ 51960-2002, и по ГОСТ 31507-2012 представляют собой элементы кругового беспетлевого поворота (рисунки 3.3 и 3.4) [42, 51].

Предлагаемая методика испытаний на поворачиваемость колесной машины предусматривает выполнение отдельных поворотов-заездов на подготовленном, согласно агротехнологическим требованиям, участке. После разгона по прямой осуществляется равномерное вращение рулевого колеса до упора управляемых колес вправо или влево. Дальнейшее движение продолжается по дуге окружности постоянной кривизны до того момента, пока продольная ось трактора не повернется на угол  $180^\circ$  от первоначального положения на участке разгона. Далее вращением рулевого колеса в обратную сторону осуществляется выход на прямолинейное движение.

Таким образом, схема траектории движения кинематического центра машины соответствует круговому беспетлевому повороту (рисунок 3.4).

Для учета продольного и поперечного уклонов выбранного участка, а также отличий кинематических характеристик левого и правого поворота агрегата необходимо их выполнять как влево, так и вправо для получения более достоверных результатов испытаний. С целью сохранения постоянства закона изменения во времени углов поворота управляемых колес при выполнении заездов, вращение рулевого колеса осуществляется автоматически навигационной системой. Соответствующая номинальному режиму работы частота вращения двигателя фиксируется и на зачетном участке остается постоянной. Для каждого варианта комбинации конструктивных и эксплуатационных параметров, а также кинематического режима выполняется не менее трех заездов с поворотом как влево, так и вправо с различными поступательными скоростями движения и угловыми скоростями поворота управляемых колес.

Рассматриваемое движение трактора и МТА при наличии управляющих воздействий в полной мере соответствует реальным условиям эксплуатации в отличие от методик исследования управляемости и устойчивости с «закрепленным рулевым управлением» или «при движении по заданной разметкой траектории» [101].

### 3.2.2.2. Проведение экспериментальных полевых исследований

Одиночный трактор или МТА, оснащенный базовой или усовершенствованной задней навесной системой располагают в начале предполагаемого маршрута движения на подготовленном участке поля. Убедившись, что сигналы датчиков дают нулевые положения и, проверив калибровку навигационной системы, выполняются повороты-заезды в следующей последовательности: оператор осуществляет разгон по прямой до определенной скорости, соответствующей выбранному номинальному режиму работы, после чего, по сигналу, система автоматизированного рулевого управления AutoTrac Universal-300 равномерно вращает рулевое колесо до упора передних колес (вправо или влево). Движение по кривой продолжается до тех пор, пока продольная ось трактора не повернется на угол  $180^\circ$  от первоначального положения на участке разгона вращением рулевого колеса в обратную сторону с целью выхода на прямолинейное движение [44, 48, 50].

Для реализации вышеуказанной методики и получения достоверных результатов трактор или МТА с модернизированной или серийной задней навесной системой должен выполнить не менее трех заездов для каждой комбинации параметров поступательной скорости движения и угловой скорости поворота управляемых колес от нулевого положения до упора [58]. При этом повороты должны осуществляться как влево, так и вправо. Скорость поступательного движения по поворотной полосе варьируется в пределах  $1,36...2,556$  м/с, а угловая скорость поворота управляемых колес –  $0,124...0,31$  с<sup>-1</sup>.

### 3.3. Приборы и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях

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 орудий;
- усилия в продольных тягах навесного устройства трактора;
- путь, пройденный трактором;
- координаты траектории движения трактора.

Для определения ускорений использовались тензовибрационные акселерометры на основе ленточных тензорезисторов (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Тензовибрационный акселерометр

Измерения усилий во всех трех продольных тягах задней навески проводились тензозвеньями (рисунок 3.6), работа которых основана на применении тензорезисторов, наклеенных по мостовой схеме на заранее подготовленную плоскость.



Рисунок 3.6 – Тензозвено

Тензозвенья устанавливались во внутрь разборных тяг с возможностью регулировки длины.

Все датчики подключались к двум аналогово-цифровым преобразователям (АЦП) L-Card LTR-EU-2 (рисунок 3.7).

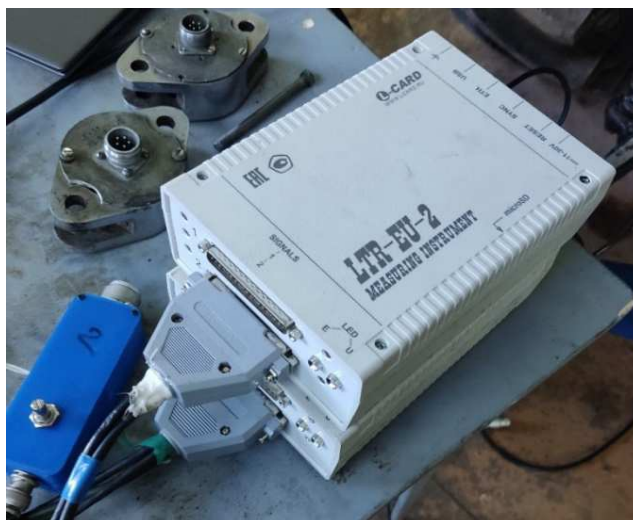


Рисунок 3.7 – АЦП LTR-EU-2

Вывод информации с АЦП на персональный компьютер осуществлялся через программное обеспечение Lgraph2 (рисунок 3.8), которое позволяет отслеживать одновременно несколько сигналов с различных датчиков в режиме реального времени.

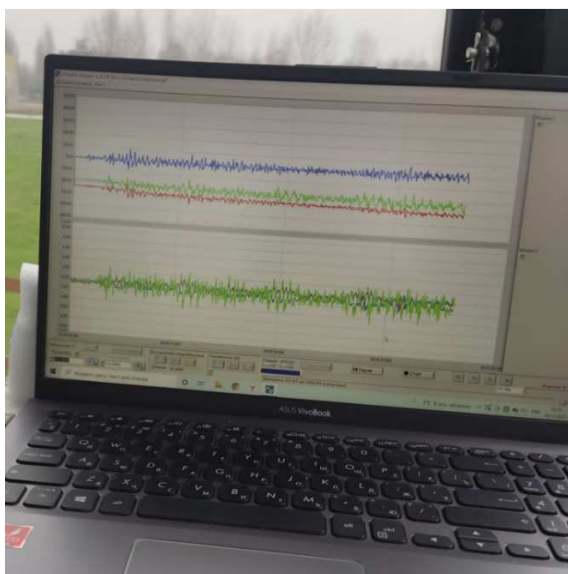


Рисунок 3.8 – Вывод информации с АЦП

Для определения траектории движения трактора использовалась навигационная система Starfire-3000 (рисунок 3.9), адаптированная для использования на тракторе Беларус-1221.2 [2].



Рисунок 3.9 – Навигационная система Starfire-3000  
на тракторе Беларус-1221.2

Средняя погрешность определения координат данной системой составляет не более 30 мм, что позволяет с достаточно высокой точностью получить действительную траекторию движения. Модуль навигационной системы устанавливается на крыше трактора при помощи штатного кронштейна (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Модуль навигационной системы Starfire-3000, установленный  
на крыше трактора Беларус-1221.2

Для вывода информации с приемника использовался дисплей GreenStar-4240. Он имеет возможность выводить всю необходимую информацию, отображает скорость движения, вид выполняемой работы, угол поворота рулевого колеса. Через меню настроек, возможно, откалибровать приемник навигации, задать геометрические параметры трактора, выбрать параметры обрабатываемого поля, сохранять и выгружать из памяти устройства сохраненные координаты траектории движения (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Монитор GreenStar-4240 в кабине трактора Беларус-1221.2

Для установки рулевого колеса от AutoTrac Universal-300 [153] на рулевой вал трактора Беларус-1221.2 была изготовлена переходная втулка (рисунок 3.12), внешняя часть которой крепится к рулевому колесу, а внутренняя – соединяется с его валом при помощи шлицевого соединения.



Рисунок 3.12 – Переходная втулка

Блок универсального подруливающего устройства АТУ-200 закрепляется на рулевой колонке в месте крепления подрулевого переключателя при помощи специального кронштейна (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Кронштейн крепления подруливающего устройства

Кронштейн был изготовлен из металлической полосы стали марки СТЗ шириной 25 мм и толщиной 5 мм. На готовом изделии просверлено четыре отверстия диаметром 10 мм в соответствии с точками крепления на рулевой колонке и блоке подруливающего устройства.

После серии испытаний информация записывалась на съемный носитель посредством интерфейса USB. Дальнейшая обработка полученных данных проводилась на персональном компьютере.

#### 3.4. Обработка опытных данных и оценка точности результатов

Для исключения случайных ошибок в результатах экспериментальных исследований первоначальная обработка полученных данных производилась сразу после завершения цикла опытов. При необходимости выпавшие заезды повторялись заново.



После выполнения полного объема экспериментальных исследований для получения статистических закономерностей изменения параметров, которыми можно оценить устойчивость и управляемость МТА, была проведена основная обработка результатов полевых опытов. Полученные данные обрабатывались на персональном компьютере с помощью программы для работы с электронными таблицами Microsoft Excel [35] и программного пакета компьютерной математики Maple [59].

Осциллограммы тензометрирования процессов криволинейного движения МТА приведены на рисунках 3.14 и 3.15.

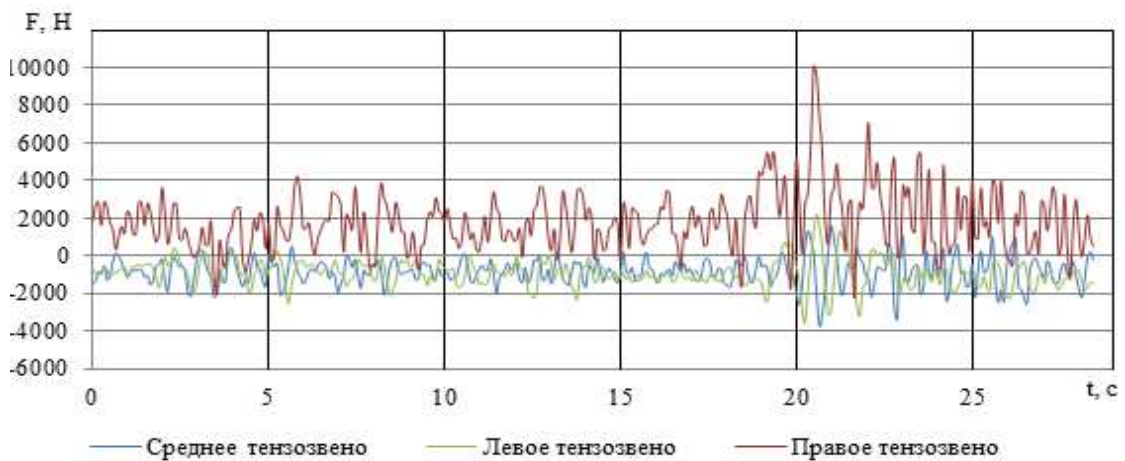


Рисунок 3.14 – Осциллограмма усилий в тензозвеньях продольной тяги навески трактора

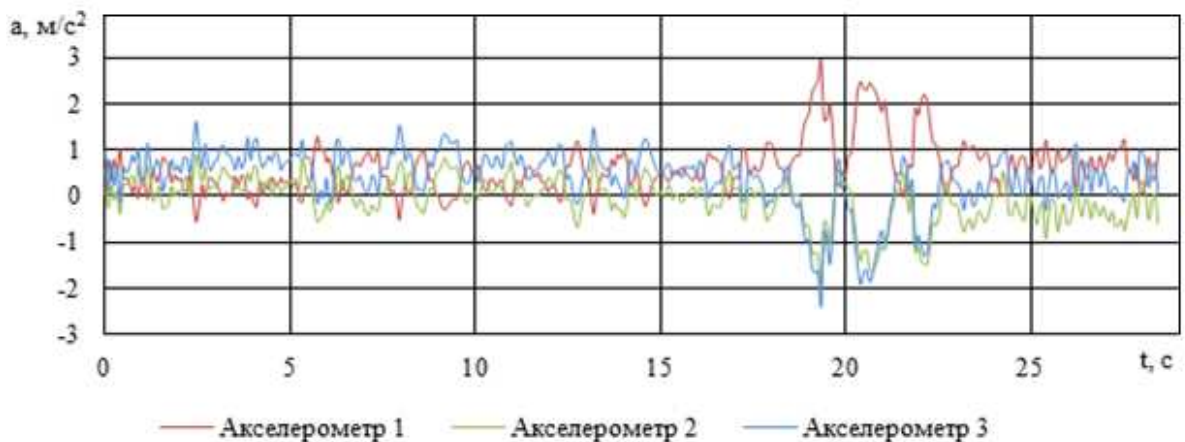


Рисунок 3.15 – Осциллограмма ускорений в базовой точке орудия

Благодаря функционалу программного обеспечения LGraph2, который позволяет задать тарифовочные коэффициенты до начала проведения испытаний, результаты замеров усилий в тросах и ускорений в базовых точках после выгрузки их из программы имели законченный вид в общепринятых физических величинах.

Основными критериями при обработке и анализе результатов исследований были их достоверность и адекватность, однако, ввиду наличия достаточно большого количества датчиков и аппаратуры полностью избежать ошибок в измерения практически невозможно.

Ошибки измерений бывают систематические, случайные и промахи [64]. Для минимизации систематических ошибок необходимо перед началом испытаний убедиться в точности, правильности настройки и калибровки применяемых датчиков и оборудования [32, 84]. Случайные ошибки невозможно учесть заранее, однако, можно свести к минимуму их влияние на результаты измерений при помощи большего количества повторности опытов. Если в массиве полученных данных какой-либо величины образовался одиночный результат с резким отклонением значения (промах), то необходимо произвести повторный контрольный замер этой величины.

С целью минимизации погрешностей измерений, вызванных тарифовкой и обработкой данных в период проведения полевых опытов, выполнялись следующие условия:

- все измерительные приборы проверялись в начале и в конце испытаний по их рабочим характеристикам;
- до и после постановки опытов проводились тарифовки тензометрических датчиков;
- перед каждым опытом устанавливались нулевые положения всех датчиков;
- управление трактором и настройка измерительной аппаратуры осуществлялись одними и теми же лицами;
- в течение всей работы использовалась одна и та же аппаратура;

- стабильность работы аппаратуры достигалась ее виброзащитой;
- напряжение в сети питания измерительной аппаратуры контролировалось и поддерживалось стабильным;
- сигналы от датчиков передавались по экранированным проводам.

При массовых замерах одной величины оценку ее проводят по среднему арифметическому, а ошибку опыта определяют средним квадратическим отклонением.

Средняя арифметическая величина

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i ,$$

где  $a_i$  – результат отдельного  $i$ -го измерения ( $i = 1, 2, \dots, n$ );

$n$  – число измерений.

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1}} ,$$

где  $\delta_i = a_i - a$  – отклонение наблюдаемого значения  $a_i$  (для каждого наблюдения) величины от среднего арифметического значения  $a$ .

Дисперсия нормального закона распределения ошибок

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1} .$$

Коэффициент вариации, характеризующий относительную колебательность ряда измерений

$$v = \frac{\sigma}{a} .$$

Средняя квадратическая ошибка арифметической средней

$$\sigma_M = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} .$$

Максимальная погрешность среднего арифметического значения измерений

$$\Delta = \pm 3\sigma_m.$$

Точность измерений опытов оценивается по предельным ошибкам измерений, складывающимся из погрешности измерений, тарировки и обработки экспериментальных данных (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Оценка погрешностей экспериментальных исследований

Измеряемые параметры	Обозначения	Относительная ошибка, %	Вероятностная относительная ошибка, %
Усилия в тягах навесного устройства	$P$	4,1	1,37
Измеряемые параметры	Обозначения	Относительная ошибка, %	Вероятностная относительная ошибка, %
Курсовой угол	$\beta$	2,0	0,67
Путь	$S$	2,65	0,88
Угол поворота колеса	$\alpha$	3,9	1,3
Абсцисса поворотной полосы	$x$	1,5	0,5
Ордината поворотной полосы	$y$	1,5	0,5
Время	$t$	1,45	0,48
Измеряемые параметры	Обозначения	Относительная ошибка, %	Вероятностная относительная ошибка, %
Ускорение	$\sigma_a$	3,9	1,3

### 3.5. Выводы

1. Предложенное сравнительно простое по конструктивному исполнению в виде упругой прокладки из полиуретана дополнение к навесной системе трактора Беларус-1221.2 позволило без изменений серийной конструкции выполнить апробацию модернизированного МТА и провести полевые опыты с измерениями параметров, характеризующих основные показатели работы агрегата.

2. Полученные зависимости показаний напряжений в тензозвеньях от воспринимаемой ими нагрузки – линейные, что позволило достоверно определить их тарировочные коэффициенты.

3. Предложенная методика проведения полевых исследований трактора или МТА для получения достоверных результатов предусматривает выполнение не менее трех заездов для каждой комбинации параметров поступательной скорости движения и угловой скорости поворота управляемых колес от нулевого положения до упора. При этом повороты должны осуществляться как влево, так и вправо. Скорость поступательного движения по поворотной полосе варьируется в пределах 1,36...2,556 м/с, а угловая скорость поворота управляемых колес – 0,124... 0,31 с<sup>-1</sup>.

4. Разработанный комплекс аппаратуры, в том числе тензометрической, оборудованный приборами и датчиками, позволяет одновременно и в широких пределах регистрировать при проведении экспериментов достаточное количество параметров, характеризующих основные показатели работы агрегата без значимых погрешностей.

5. Реализованный способ определения траектории криволинейного движения МТА с помощью навигационной системы Starfire-3000, адаптированной для трактора Беларус-1221.2, позволяет получить ее координаты с высокой точностью.

6. Выполненная оценка точности измерений по предельным ошибкам подтвердила корректность разработанной методики и выполненных экспериментальных исследований. Установлено, что суммарная относительная ошибка не превышает 5 %.

## 4. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

### 4.1. Результаты лабораторных экспериментальных исследований

В программу лабораторных исследований входило определение характеристик, необходимых для моделирования процесса криволинейного движения МТА, тарировка и настройка измерительных приборов, разработка конструкции, монтаж и проверка работоспособности усовершенствованной навесной системы трактора Беларус-1221.2.

Предложенная модернизированная конструкция навесной системы (рисунок 3.2) (приложение А) [111] отличается от серийной тем, что между треугольником, установленном на тракторе (рисунок 3.2а) и замком орудия (рисунок 3.2б) размещена прокладка *1* из упругого материала – полиуретана марки НИЦ-ПУ 5 с обоснованными физико-механическими характеристиками (рисунки 3.2в, 3.2г). Прокладка наклеивается на наружные плоскости боковых поверхностей трубчатых элементов треугольника. С целью сохранения исходных геометрических характеристик, соответствующих базовой навесной системе, и вписывания прокладки в исходную конструкцию, стандартный треугольник разделили на исходные узлы, а затем были незначительно уменьшены длины трубчатых элементов, таким образом, чтобы при сборке по шаблону размерные параметры модернизированной системы с упругой прокладкой соответствовали базовой.

После необходимых тарировок установили тензометрическую и другую измерительную аппаратуру на трактор и навесное оборудование. Тензозвенья были встроены в разборные продольные верхнюю и нижние тяги, акселерометры для определения ускорений установлены в трех базовых точках на орудиях. Аналогово-цифровые преобразователи и персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением располагались внутри кабины трактора для возможности регулировки, выставления нулевого по-

ложения датчиков перед выполнением проездов и контроля за их показаниями.

После установки треугольника на трактор производилась настройка навесной системы и проверка ее работоспособности. В частности, регулировались длины тяг со встроенными в них тензозвеньями и угол наклона треугольника в соответствии с техническими требованиями. В лабораторных условиях проведена оценка качества сочленения навесного оборудования, используемого в ходе испытаний. Отмечено более плотное прилегание друг к другу треугольника и замка навески, что способствует уменьшению крена и перекоса навесного оборудования в транспортном положении.

#### 4.2. Результаты полевых экспериментальных исследований

При выполнении различных полевых сельскохозяйственных операций МТА, помимо рабочих ходов, совершает повороты и холостые проезды, которые могут составлять до 30...40 % от общей длины ежедневных маршрутов [68].

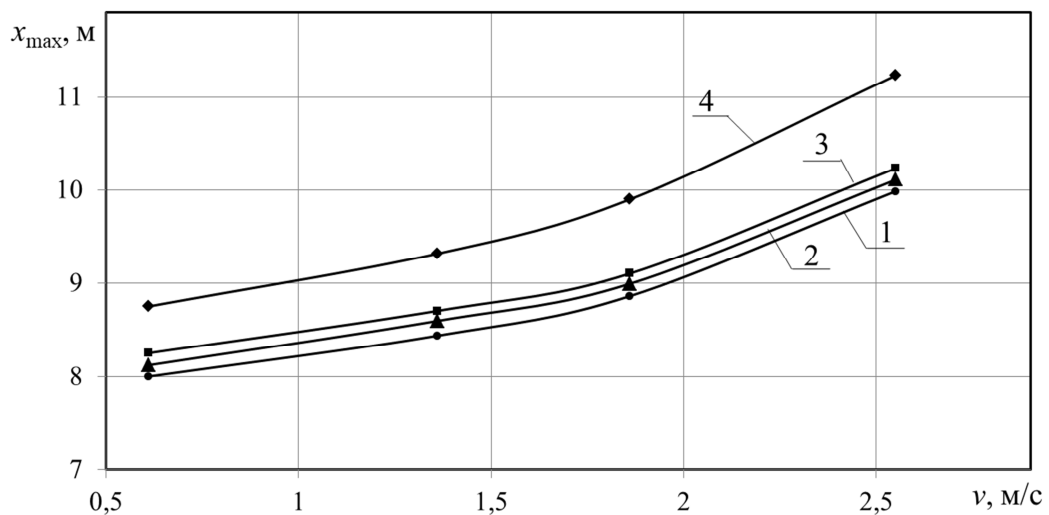
При выполнении основной технологической операции, двигаясь по прямой, трактор не может мгновенно перейти к криволинейному движению и совершить поворот по минимально возможному радиусу ввиду бокового увода и скольжения движителей на деформируемом и рыхлом опорном основании. При этом существует высокая вероятность возникновения экскавационно-бульдозерного эффекта, при котором происходит интенсивное скольжение и даже занос МТА.

Наиболее кинематически сложными и динамически нагруженными в процессе криволинейного движения на поворотной полосе являются участки «вход в поворот» и «установившийся поворот» [15, 25], поэтому именно эти этапы выбраны для экспериментальных исследований с целью определения необходимых параметров для оценки влияния навесного оборудования, находящегося в транспортном положении, на поворачиваемость МТА при

совершении кругового беспетлевого поворота [25]. Основными характеристиками для сравнения опытных результатов выбраны предельные (максимальные) значения абсциссы  $x_{\max}$  и ординаты  $y_{\max}$  кривой траектории, описываемой кинематическим центром трактора на поворотной полосе.

При проведении экспериментальных исследований так же, как и при аналитических расчетах принято, что переход от траектории большой кривизны к прямолинейному движению («выход из поворота») совершается по тому же закону, что при переходе от прямолинейного движения к участку установившегося поворота («вход в поворот»). Поэтому за основу принята одна, в нашем случае также левая ветвь кругового беспетлевого поворота.

На рисунках 4.1 – 4.4 приведены графики зависимостей  $x_{\max}$  и  $y_{\max}$  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 различных угловых скоростях поворота  $\omega$  управляемых колес при круговом беспетлевом повороте.



1 – теоретическая траектория движения трактора;

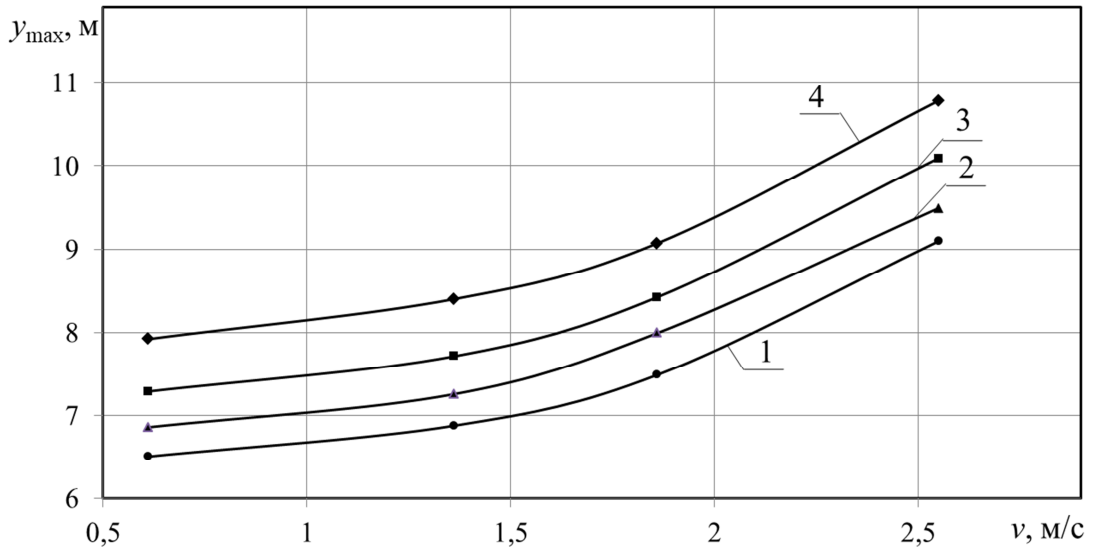
2 – действительная траектория движения трактора;

3 – действительная траектории движения МТА (опытная навеска);

4 – действительная траектория движения МТА (базовая навеска)

Рисунок 4.1 – Графики зависимости абсциссы  $x_{\max}$  от поступательной скорости движения  $v$  при  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$





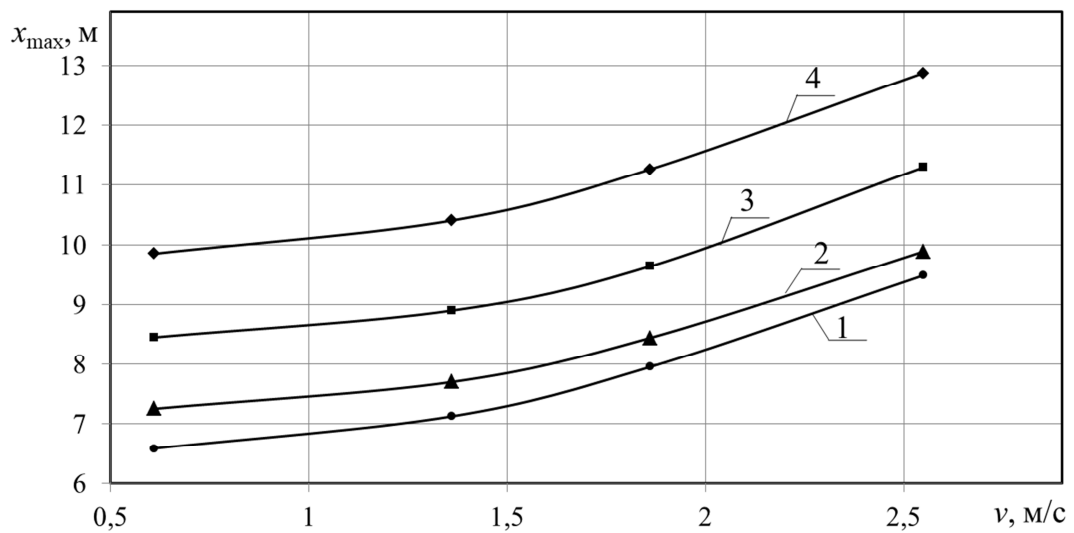
1 – теоретическая траектория движения трактора;

2 – действительная траектория движения трактора;

3 – действительная траектория движения МТА (опытная навеска);

4 – действительная траектория движения МТА (базовая навеска)

Рисунок 4.2 – Графики зависимости абсциссы  $y_{\max}$  от поступательной скорости движения  $v$  при  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$



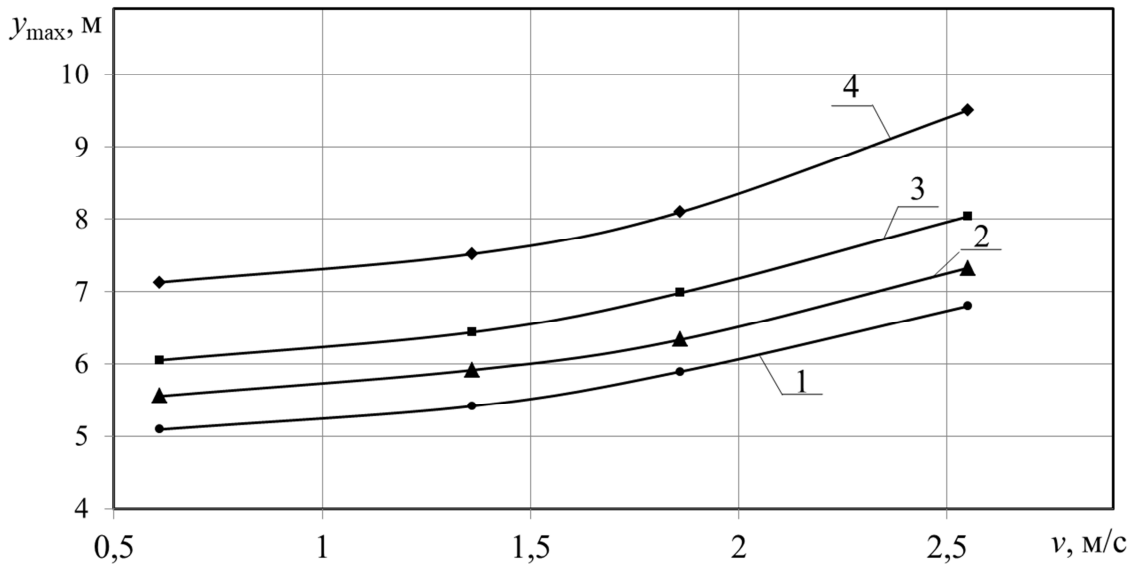
1 – теоретическая траектория движения трактора;

2 – действительная траектория движения трактора;

3 – действительная траектории движения МТА (опытная навеска);

4 – действительная траектория движения МТА (базовая навеска)

Рисунок 4.3 – 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 4.4 – Графики зависимости абсциссы  $y_{max}$  от поступательной скорости движения  $v$  при  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$

Результаты опытов показали, что при постоянной угловой скорости поворота управляемых колес и увеличении поступательной скорости движения МТА возрастают предельные значения абсциссы  $x_{max}$  и ординаты  $y_{max}$  траектории кинематического центра агрегата (рисунки 4.1 – 4.4).

Так при скорости поступательного движения одиночного трактора  $v = 0,61 \text{ м/с}$  и скорости поворота управляемых колес  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$  предельные опытные координаты действительной траектории движения кинематического центра равны:  $x_{max} = 8,12 \text{ м}$  и  $y_{max} = 6,85 \text{ м}$ . Для теоретической траектории при тех же  $\omega$  и  $v$  получено расчетом  $x_{max} = 8,01 \text{ м}$  и  $y_{max} = 6,54 \text{ м}$ . Экспериментальные и теоретические значения искомых параметров при увеличении  $v$  до  $2,556 \text{ м/с}$  при этом соответственно равны:  $x_{max} = 10,1 \text{ м}$  и  $y_{max} = 9,49 \text{ м}$ ;  $x_{max} = 9,98 \text{ м}$  и  $y_{max} = 9,09 \text{ м}$ . Таким образом, с увеличением поступательной скорости движения  $v$  с  $0,61 \text{ м/с}$  до  $2,556 \text{ м/с}$  предельная абсцисса  $x_{max}$  и предельная ордината  $y_{max}$  действительной траектории движения одиночного трактора

увеличились соответственно на 1,98 м и 2,64 м, а для теоретической траектории увеличение составило 1,84 м и 2,55 м. Среднее приращение предельных значений абсциссы и ординаты при этом составило около 23 %.

Сравнение предельных значений  $x_{\max}$  (рисунок 4.1, кривая 1) и  $y_{\max}$  (рисунок 4.2, кривая 1) теоретической траектории движения с теми же параметрами действительной траектории движения одиночного трактора (рисунок 4.1, кривая 2, рисунок 4.2, кривая 2) при угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$  показало, что расхождение между ними составляет соответственно 0,1...0,16 м или 1,22...1,82 % и 0,31...0,5 м или 4,17...6,3 %.

При  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$  максимальные отклонения действительной траектории движения от теоретической увеличиваются до 0,4...0,67 м (4...9,2 %) – по оси  $x$  и 0,44...0,52 м (6,97...8,49 %) – по оси  $y$ , что подтверждает предположение о влиянии навесного оборудования на поворачиваемость МТА и необходимость проведения соответствующих исследований.

При увеличении скорости поступательного движения  $v$  МТА с базовой навесной системой в составе трактора Беларус-1221.2 и сеялки СТВ-12 (рисунки 4.1 – 4.4, кривые 4) с 0,61 м/с до 2,556 м/с при всех реализуемых угловых скоростях поворота управляемых колес  $\omega$  предельные значения действительных траекторий  $x_{\max}$  и  $y_{\max}$  возрастают также, как и в случае с действительной и теоретической траекторией движения отдельного трактора в среднем на 23 %.

Из сравнения зависимостей  $x_{\max}$  и  $y_{\max}$  действительных траекторий кинематического центра от поступательной скорости движения  $v$  МТА с базовой навесной системой в составе трактора Беларус-1221.2 и сеялки СТВ-12 (рисунок 4.1, кривая 4, рисунок 4.2, кривая 4) с теми же параметрами, что и для одиночного трактора (рисунок 4.1, кривая 2, рисунок 4.2, кривая 2), при угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$  видно, что происходит рост во всем диапазоне увеличения  $v$  как продольных  $\Delta x_{\max}$  на 0,63...1,12 м (7,18...10 %) отклонений, так и поперечных  $\Delta y_{\max}$  на 1,07...1,28 м (11,89...13,62 %) навесного агрегата в сравнении с одиночным трактором.

При увеличении угловой скорости поворота управляемых колес до  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$  значения отклонений возрастают соответственно до  $\Delta x_{\max} = 2,6 \dots 2,9 \text{ м}$  (23,17...26,4 %) (рисунок 4.3, кривая 2, кривая 4) и  $\Delta y_{\max} = 1,57 \dots 2,18 \text{ м}$  (21,31...22,96 %) (рисунок 4.4, кривая 2, кривая 4).

Таким образом, уменьшение времени маневра входа в поворот приводит к увеличению примерно в 3,0 раза абсциссы поворота, а ординаты – в 1,4 раза.

Для того, чтобы трактор перешел от прямолинейной траектории к траектории большой кривизны при входе в поворот на управляемых колесах должны возникнуть боковые реакции со стороны почвы, необходимое влияние которых обусловлено, в том числе и угловой скоростью поворота управляемых колес, при увеличении которой происходит более интенсивное их скольжение в направлении продольной оси трактора. При меньшей угловой скорости происходит постепенное увеличение боковых реакций по мере роста угла поворота управляемых колес и менее интенсивное их проскальзывание, чем можно объяснить уменьшение при этом отклонения от требуемой траектории движения. При резком ухудшении почвенных условий увеличивается коэффициент сопротивления качению  $f$  и уменьшается коэффициент сцепления  $\varphi$  колес с почвой, следовательно, уменьшается допустимый угол поворота управляемых колес, при котором возможно их вращение без скольжения.

Сравнение величин действительных максимальных абсцисс и ординат траектории движения МТА с базовой навесной системой с их теоретическими значениями показало, что при угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$  увеличение  $\Delta x_{\max}$  составило  $0,7 \dots 1,25 \text{ м}$  (8,41...11,11 %) (рисунок 4.1, кривая 1, кривая 4), а  $\Delta y_{\max} = 1,38 \dots 1,69 \text{ м}$  (15,62...18,16 %) (рисунок 4.2, кривая 1, кривая 4); при  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$  –  $\Delta x_{\max} = 3,27 \dots 3,38 \text{ м}$  (26,3...33,17 %) (рисунок 4.3, кривая 1, кривая 4), –  $\Delta y_{\max} = 2,04 \dots 2,7 \text{ м}$  (27,26...28,58 %) (рисунок 4.4, кривая 1, кривая 4).

Анализируя вышесказанное, можно утверждать, что заднее навесное оборудование оказывает значительное влияние на процесс криволинейного движения МТА, поэтому для того, чтобы получить достоверные результаты и дать адекватную оценку поворачиваемости агрегата при криволинейном движении, необходимо провести исследования не только для отдельного трактора, но и для МТА в целом.

Как с увеличением скорости поступательного движения  $v$ , так и угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega$  возрастают отклонения от теоретической траектории движения (рисунки 4.1 – 4.4). Это связано с тем, что возрастают вертикальные колебания остова трактора, ударные нагрузки и инерционные усилия со стороны навесного оборудования, происходит более интенсивное боковое скольжение колес. Эти факторы отрицательно влияют на поворачиваемость МТА, способствуют буксованию колес, ухудшению или даже потере управляемости и устойчивости.

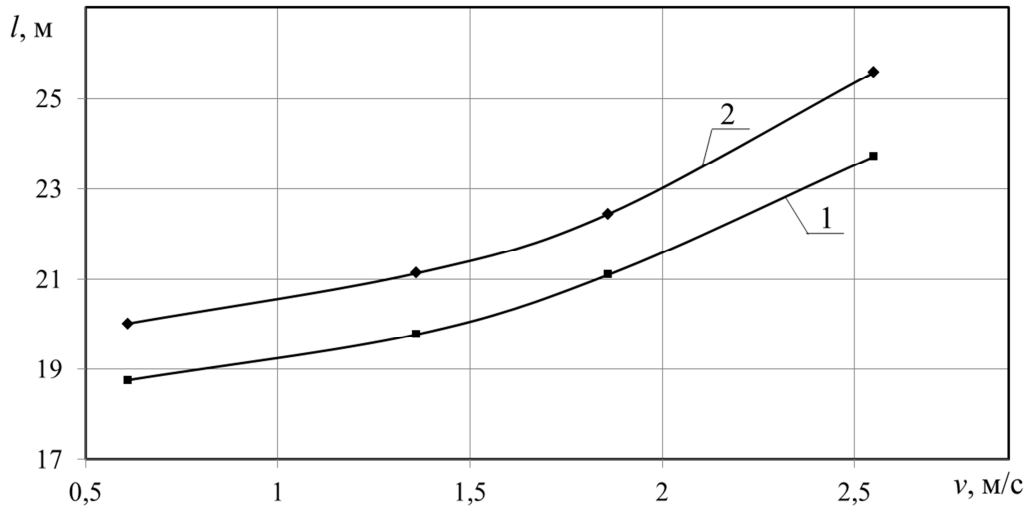
Благодаря эластичным свойствам упругого элемента, вписанного в модернизированную навесную систему трактора, удалось снизить влияние инерционных сил со стороны навесного оборудования на процесс криволинейного движения агрегата. Экспериментально выявлено, что для МТА с опытной навесной системой в составе трактора Беларус-1221.2 и сеялки СТВ-12 так же, как и во всех ранее рассмотренных случаях с увеличением поступательной скорости движения  $v$  происходит рост максимальных значений абсцисс и ординат действительных траекторий поворота в пределах 21...24 % (рисунки 4.1 – 4.4, кривые 3). При изменении поступательной скорости движения  $v$  с 0,61 м/с до 2,556 м/с и постоянной угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$  происходит уменьшение предельных значений абсциссы и ординаты траектории кинематического центра МТА с модернизированной навесной системой соответственно на  $\Delta x_{\max} = 0,5...0,99 \text{ м}$  (5,7...8,79 %) (рисунок 4.1, кривая 3, кривая 4) и  $\Delta y_{\max} = 0,63...0,69 \text{ м}$  (6,36...8,16 %) (рисунок 4.2, кривая 3, кривая 4) в сравнении с МТА с базовой навесной системой. В том же диапазоне изменения скоростей  $v$  и значения  $\omega$

$= 0,31 \text{ с}^{-1}$  уменьшение составило:  $\Delta x_{\max} = 1,4...1,61 \text{ м}$  (12,3...14,45 %) (рисунок 4.3, кривая 3, кривая 4),  $\Delta y_{\max} = 1,08...1,47 \text{ м}$  (13,77...15,45 %) (рисунок 4.4, кривая 3, кривая 4).

Сравнение значений действительных максимальных абсцисс и ординат траектории движения МТА с модернизированной навесной системой и теоретических значений этих параметров показало, что при угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$  увеличение  $\Delta x_{\max}$  составило  $0,24...0,26 \text{ м}$  (2,4...3 %) (рисунок 4.1, кривая 1, кривая 3), а  $\Delta y_{\max} = 0,75...1 \text{ м}$  (9,98...11,09 %) (рисунок 4.2, кривая 1, кривая 3). При увеличении угловой скорости управляемых колес до  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$  получено соответственно:  $\Delta x_{\max} = 1,69...1,87 \text{ м}$  (15,96...22,08 %) (рисунок 4.3, кривая 1, кривая 3),  $\Delta y_{\max} = 0,97...1,23 \text{ м}$  (15,37...15,94 %) (рисунок 4.4, кривая 1, кривая 3).

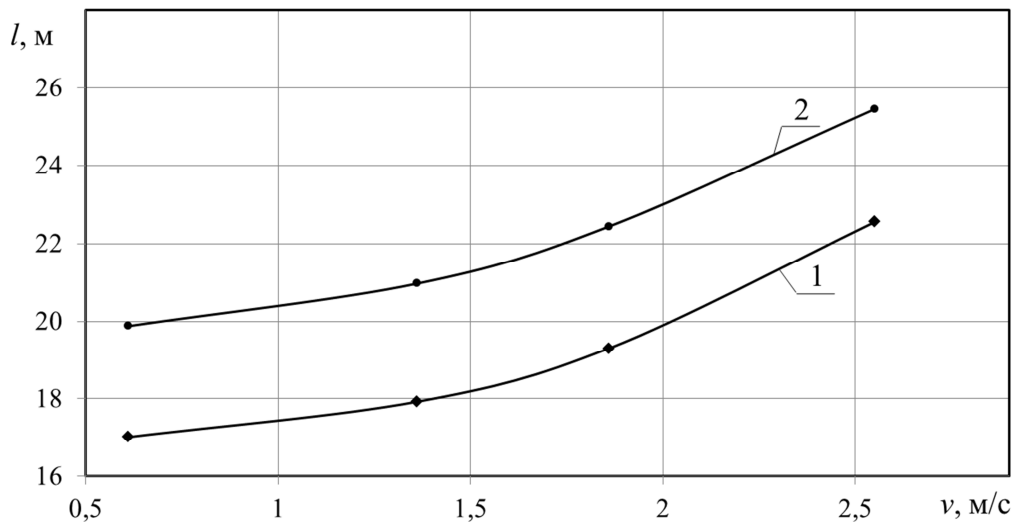
На рисунках 4.5 и 4.6 приведены экспериментальные графики зависимости длины траектории  $l$  от скорости поступательного движения  $v$  для МТА с базовой и модернизированной навесными системами. Например, длина траектории, описываемой кинематическим центром МТА с базовой навесной системой при  $v = 2,556 \text{ м/с}$  и  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$  составила  $l = 25,58 \text{ м}$ ; при  $v = 1,86 \text{ м/с}$  и  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$  –  $l = 22,44 \text{ м}$ . Результаты экспериментов показали, что при любом значении  $\omega$  при увеличении  $v$  происходит рост длины траектории кругового беспетлевого поворота, описываемого кинематическим центром в среднем на 23 %. Применение упругого элемента позволило уменьшить длину траектории  $l$  при  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$  на  $1,26...1,87 \text{ м}$  (5,98...7,31 %), при  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$  – на  $2,86...3,14 \text{ м}$  (11,38...14,52 %).

На рисунках 4.7 и 4.8 приведены экспериментальные графики зависимостей максимальных абсцисс  $x_{\max}$  и максимальных ординат  $y_{\max}$  действительной траектории кинематического центра МТА от его скорости поступательного движения  $v$  с базовой и модернизированной навесными системами в составе трактора Беларус-1221.2 и плуга ПЛН-4-35 при различных угловых скоростях поворота  $\omega$  управляемых колес для кругового беспетлевого поворота.



1 – действительная траектория движения МТА с модернизированной навесной системой; 2 – действительная траектория движения МТА с базовой навесной системой

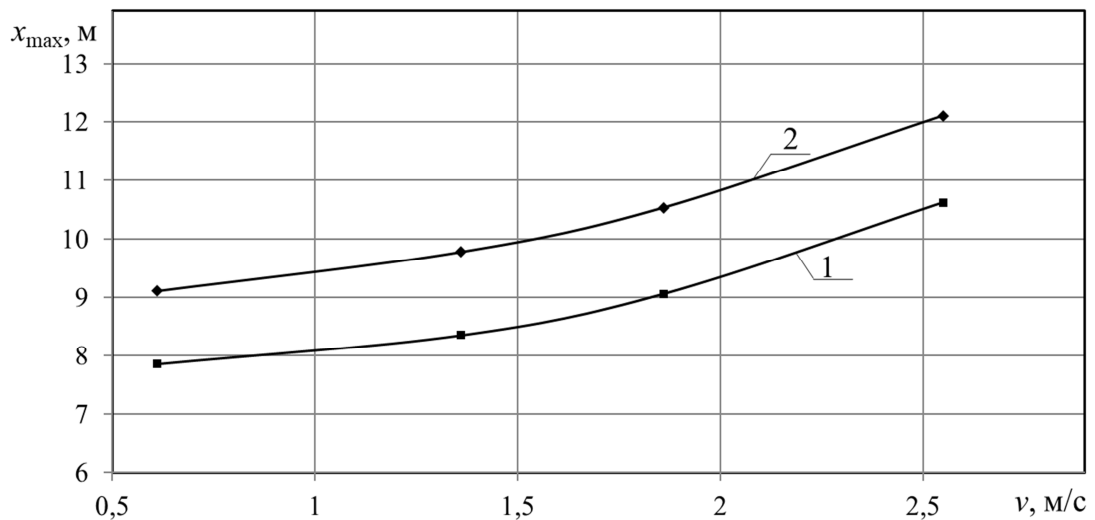
Рисунок 4.5 – Графики зависимости длины траектории движения кинематического центра МТА  $l$  от поступательной скорости движения  $v$  при  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$



1 – действительная траектория движения МТА с модернизированной навесной системой; 2 – действительная траектория движения МТА с базовой навесной системой

Рисунок 4.6 – Графики зависимости длины траектории движения кинематического центра МТА  $l$  от поступательной скорости движения  $v$  при  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$

Анализ опытных данных показал, что при одинаковых значениях  $v$  и  $\omega$  предельные абсцисса  $x_{\max}$  и ордината  $y_{\max}$  действительной траектории движения МТА в составе Беларус-1221.2+СТВ-12 (рисунки 4.1 – 4.4, кривые 3) в среднем соответственно на 7 % и 6 % больше, чем для МТА Беларус-1221.2+ПЛН-4-35 (рисунки 4.7, 4.8), что позволяет сделать вывод о более динамически напряженном режиме движения трактора, агрегируемого с селкой, в виду ее значительных массово-геометрических характеристик.



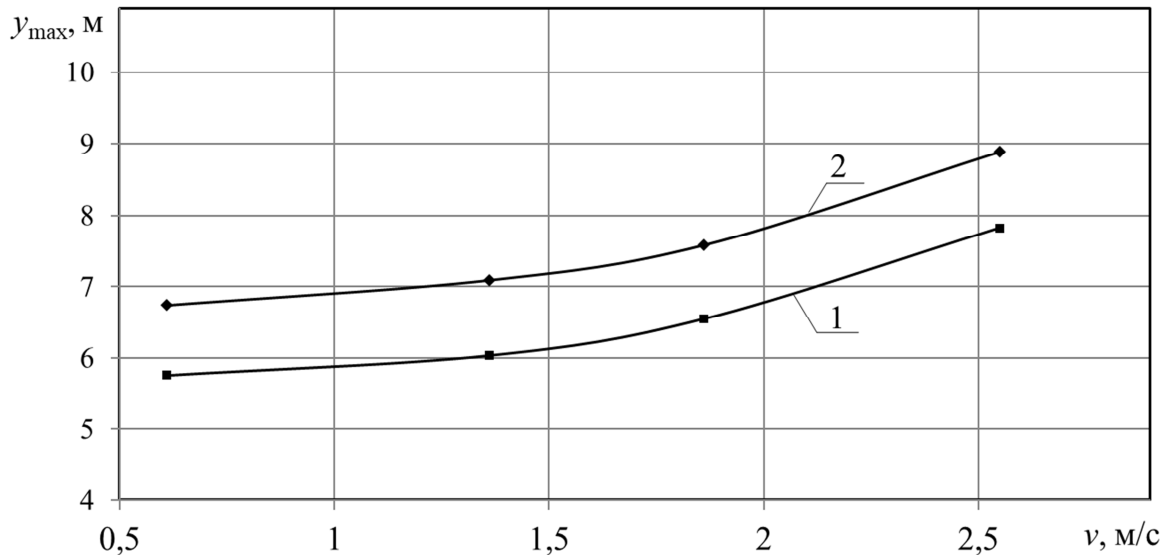
1 – действительная траектория движения МТА с модернизированной навесной системой; 2 – действительная траектория движения МТА с базовой навесной системой

Рисунок 4.7 – Графики зависимости абсциссы  $x_{\max}$  от поступательной скорости движения  $v$  при  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$

Выявлено также, что для агрегата в составе трактора и плуга, при постоянной угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$  и изменении поступательной скорости  $v$  с 0,61 м/с до 2,556 м/с наблюдается уменьшение значений максимальной абсциссы и максимальной ординаты действительной траектории движения МТА с модернизированной навесной системой соответственно на  $\Delta x_{\max} = 1,25 \dots 1,48 \text{ м}$  (12,28...13,73 %) (рисунок 4.7),  $\Delta y_{\max} =$



0,98...1,64 м (11,97...14,58 %) (рисунок 4.8) в сравнении с базовой навесной системой.

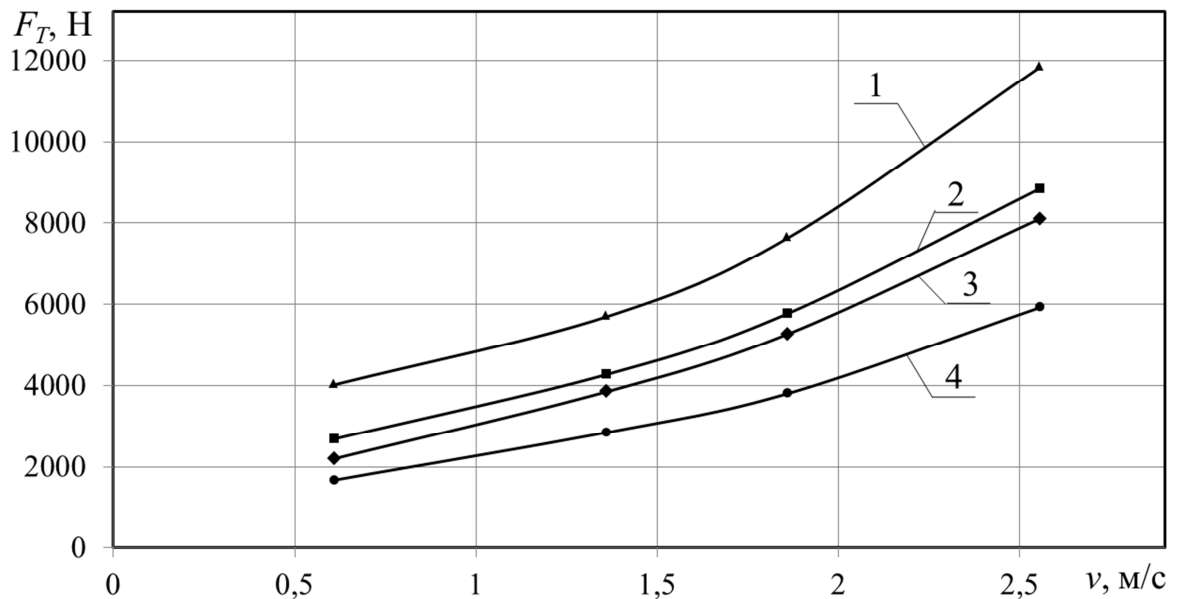


1 – действительная траектория движения МТА с модернизированной навесной системой; 2 – действительная траектория движения МТА с базовой навесной системой

Рисунок 4.8 – Графики зависимости абсциссы  $y_{max}$  от поступательной скорости движения  $v$  при  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$

При криволинейном движении на МТА действует боковая сила, представляющая собой равнодействующую составляющих силы инерции и силы тяжести, действующих на боковую поверхность треугольника навески. Боковая сила создает момент сопротивления повороту, который стремится сменить трактор с заданной траектории, вследствие этого происходит увеличение неравномерности распределения вертикальных нагрузок и боковых реакций по колесам трактора, что приводит к увеличению их буксования и бокового скольжения МТА [12], а иногда к полной потере сцепления с опорным основанием. Экспериментально доказано, что увеличение угловой скорости поворота управляемых колес приводит к возрастанию отклонений  $\Delta x_{max}$  и  $\Delta y_{max}$  от требуемой траектории движения, что обусловлено увеличением мо-

мента сопротивления повороту, основной составляющей которого является сила инерции, возникающая в местах соединения навесного оборудования и трактора [28]. Уменьшение усилия в продольных тягах модернизированной навесной системы по сравнению с базовой (рисунок 4.9) связано с тем, что прокладка из эластомера, вписанная в конструкцию навески обладает поглощающей способностью и уравнивает часть силы инерции, передаваемой от навесного оборудования трактору.



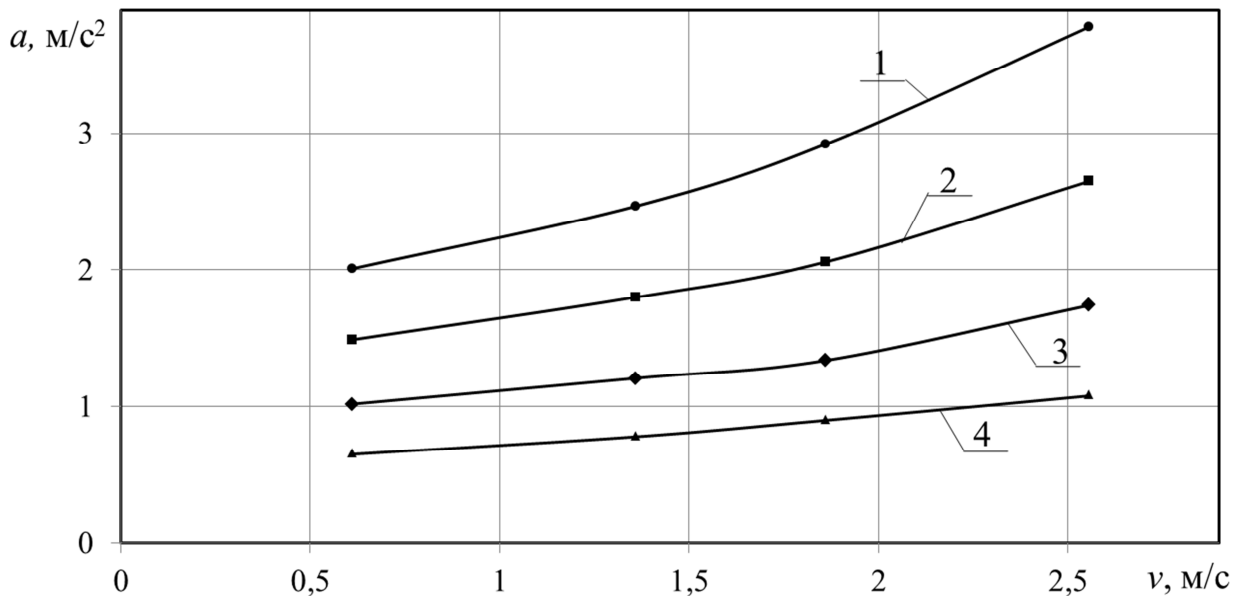
1 – базовая навесная система при  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$ ; 2 – базовая навесная система при  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$ ; 3 – модернизированная навесная система при  $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$ ;  
4 – модернизированная навесная система при  $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$

Рисунок 4.9 – Графики зависимости усилия в тягах навесного устройства  $F_T$  от поступательной скорости движения  $v$

Выявлено, что усилие в тягах – растягивающее, наибольшее значение оно имеет в правой тяге при совершении поворота направо; при совершении налево – в левой тяге.

Применение прокладки из упругого элемента 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 4.10) что позволяет сделать вывод о повышении плавности хода МТА, снижении ударных нагрузок со стороны навесного оборудования на трактор из-за более равномерного и плотного прилегания элементов навесной системы друг к другу, и благодаря эластичным свойствам материала упругого элемента.



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 4.10 – Графики зависимости бокового ускорения  $a$  в характерных точках навесного оборудования от поступательной скорости МТА  $v$

Вследствие улучшения поворачиваемости МТА, снижения толчков и вибраций, передаваемых от навесного оборудования на трактор в условиях реальной эксплуатации, движение по криволинейной траектории становится более предсказуемым для оператора, которому требуется меньшее количество воздействий на рулевое колесо, что положительно сказывается на его психофизическом состоянии.

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.

#### 4.3. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

Математическую модель можно считать адекватной, если она отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью, которую можно определить сравнением теоретических и экспериментальных параметров. Для подтверждения точности и достоверности результатов проведенных исследований и адекватности полученных аналитических зависимостей для расчета параметров траектории криволинейного движения МТА проведена оценка сходимости теоретических и экспериментальных данных для одного из вариантов комбинации параметров скорости поступательного движения  $v$  и угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega$  (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

Параметр	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Расхождение, %
Абсцисса $x$ действительной траектории (базовая навесная система), м	10,752	11,232	4,46
Абсцисса $x$ действительной траектории (модернизированная навесная система), м	9,95	10,232	2,83

Окончание таблицы 4.1

Параметр	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Расхождение, %
Ордината у действительной траектории (базовая навесная система), м	10,678	10,792	1,06
Ордината у действительной траектории (модернизированная навесная система), м	10,092	10,095	0,02

Как видно из таблицы 4.1, расхождения параметров не превышают 5 %, что говорит о высокой точности и достоверности апробированных методик теоретических и экспериментальных исследований.

Реальные машины имеют эластичные в боковом направлении шины, подвергающиеся при криволинейном движении боковому уводу и проскальзыванию. Учет даже бокового увода при исследовании поворота колесной машины представляет значительные трудности, так как углы увода совершенно не согласуются с углами поворота управляемых колес, весовыми и геометрическими характеристиками машин, а зависят от многих факторов, которые сами изменяются в соответствии с условиями и режимами движения машин [8, 155].

Качение колеса по деформируемому рыхлому основанию – сложное и еще недостаточно изученное явление, поэтому его исследуют при некоторой схематизации. И, тем не менее, методы его расчета оказываются довольно сложными для практического пользования и не в полной мере отражают реальную картину движения колесной машины по криволинейной траектории. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что представленная методика, основанная на сравнении теоретической и действительной кривых траекторий кинематического центра МТА,

достаточно проста и позволяет с очень высокой степенью точности получить аналитически действительную траекторию движения.

#### 4.4. Выводы

1. С повышением скорости поступательного движения  $v$  как одиночного трактора Беларус-1221.2, так и МТА различной комплектации на его базе увеличиваются значения предельных величин абсцисс  $x_{\max}$  и ординат  $y_{\max}$  опытной действительной траектории движения кинематического центра в среднем на 23 %. Так, при  $v = 0,61$  м/с одиночного трактора и угловой скорости поворота управляемых колес  $\omega = 0,155$  с<sup>-1</sup> получено  $x_{\max} = 8,12$  м и  $y_{\max} = 6,85$  м, а при  $v = 2,556$  м/с и той же  $\omega = 0,155$  с<sup>-1</sup> –  $x_{\max} = 10,1$  м, а  $y_{\max} = 9,49$  м. Для МТА в составе Беларус-1221.2+СТВ-12 на тех же эксплуатационных режимах соответственно получено:  $x_{\max} = 8,75$  м,  $y_{\max} = 7,92$  м;  $x_{\max} = 11,23$  м,  $y_{\max} = 10,78$  м.

2. Установлено, что заднее навесное оборудование оказывает значительное влияние на процесс криволинейного движения МТА. 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.

3. 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.

4. В ходе экспериментальных исследований доказано, что применение прокладки из упругого элемента в конструкции задней навесной системы трактора позволило снизить величины усилия в тягах навесного устройства

на 24...27 % и ускорения в базовых точках навесного оборудования – на 51...59 %.

5. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что предложенные аналитические зависимости для расчета параметров траектории криволинейного движения МГА достоверно описывают процесс криволинейного движения МГА. Расхождения между теоретическими и опытными значениями искомых параметров составляют не более 5 %.

## 5. Экономическая эффективность применения опытной конструкции навесной системы на тракторе Беларус-1221.2

### 5.1. Исходные данные для оценки эффективности применения модернизированной навесной системы

Для оценки эффективности применения опытной навесной системы на тракторе Беларус-1221.2 ставилась задача определения снижения расхода топлива за счет уменьшения длины траектории движения МТА на поворотной полосе и повышения производительности ввиду сокращения времени, необходимого для выполнения технологической операции.

Расчет экономической эффективности выполнен на основе результатов экспериментальных исследований в соответствии с известными методиками и рекомендациями [40, 45, 46, 47, 68, 78] сопоставлением затрат от использования МТА вида Беларус-1221.2+СТВ-12 с модернизированной и базовой навесными системами.

В результате анализа экспериментальных данных было установлено, что при эксплуатации опытной навесной системы длина траектории движения МТА уменьшается, а производительность увеличивается в среднем на 2 %.

Исходная информация для расчета экономической эффективности применения модернизированной навесной системы приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные и нормативные показатели

Показатели	Трактор с базовой навесной системой	Трактор с модернизированной навесной системой
Площадь поля, га	50	50
Уменьшение длины поворотной полосы, %	–	9,5



Окончание таблицы 5.1

Показатели	Трактор с базовой навесной системой	Трактор с модернизированной навесной системой
Нома выработки, га/ч	2,5	2,55
Марка машины	Беларус-1221.2	Беларус-1221.2
Норма амортизации, %	9,1	9,1
Показатели	Трактор с базовой навесной системой	Трактор с модернизированной навесной системой
Норма отчислений на ремонт, ТО, замену шин и хранение, %	9,9	9,9
Комплексная цена топлива, руб./л	60	60
Среднегодовая загрузка трактора, ч	1520	1520

Результаты расчета размера затрат, необходимых на изготовление опытного образца навесной системы, приобретение расходных материалов и комплектующих, оплату труда при изготовлении и монтаже приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчета дополнительных инвестиций

Показатели	Количество, ед.	Цена, руб. за ед.	Стоимость, руб.
Расходные материалы и комплектующие			
Лист полиуретана, шт.	1	1000	1000
Клей полимерный Loctite, г	100	6	600
Электроды сварочные, кг	1	180	180

Окончание таблицы 5.2

Показатели	Количество, ед.	Цена, руб. за ед.	Стоимость, руб.
Диск отрезной, шт.	2	75	150
Итого затраты на расходные материалы и комплектующие, руб.	–	–	1930
Затраты труда (чел. ч) и оплата труда на изготовление и монтаж			
Слесарные работы, чел-ч	2	350	700
Монтажные работы, чел-ч	2	350	700
Сварочные работы, чел-ч	2	400	800
Итого фонд оплаты труда, руб.	–	–	2200
Общие расходы на изготовление и монтаж оборудования			
Итого затрат на изготовление и монтаж, руб.	–	–	4130
Накладные расходы (20 %), руб.	–	–	826
Всего затрат, руб.	–	–	4956

### 5.2. Расчет технико-экономических показателей

Экономия эксплуатационных издержек определена по формуле

$$I = Z + \Gamma + P_m + A_m, \quad (5.1)$$

где  $Z$  – оплата труда обслуживающего персонала, руб.;

$\Gamma$  – стоимость топливо-смазочных материалов (ТСМ), руб.;

$P_m$  – отчисления на техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт, замену шин и хранение, руб.;

$A_m$  – амортизационные отчисления, руб.

Используя данные таблиц 5.1 и 5.2, определили параметры, входящие в формулу 5.1, и сумму эксплуатационных издержек.

Затраты на оплату труда определены по формуле

$$З = Y_o \cdot Z_T,$$

где  $Y_o$  – часовая ставка, руб./ч;

$Z_m$  – затраты рабочего времени на выполнение транспортных работ, ч.

В таблице 5.3 показана экономия затрат труда и фонда оплаты труда при проведении посевных работ.

Таблица 5.3 – Результаты экономии затрат труда и фонда оплаты труда

Показатели	Трактор с базовой навесной системой	Трактор с модернизированной навесной системой
Нома выработки, га/ч	2,5	2,55
Площадь поля, га	50	50
Экономия фонда оплаты труда, руб.:		
Уровень оплаты труда механизаторов, руб/чел-ч	250	250
Затраты на оплату труда в расчете на 1 га, руб.	100	98
Экономия фонда оплаты труда, руб.	–	100

Данные таблицы 5.3 показывают, что при модернизации навесной системы на тракторе экономия оплаты труда составит 100 рублей при посеве поля площадью 50 га.

Стоимость нефтепродуктов определена по формуле

$$Г = R_9 \cdot S \cdot Ц_T,$$

где  $R_3$  – расход нефтепродуктов на единицу работы, кг/ч;

$S$  – время, необходимое для выполнения заданного объема работ, ч;

$C_T$  – комплексная цена нефтепродуктов, руб/кг.

В таблице 5.4 приведены данные по экономии нефтепродуктов.

Таблица 5.4 – Результаты расчета по экономии нефтепродуктов

Показатели	Трактор с базовой навесной системой	Трактор с модернизированной навесной системой
Нома выработки, га/ч	2,5	2,55
Расход нефтепродуктов, л/ч	10	9,91
Экономия нефтепродуктов по стоимости		
Комплексная цена топлива, руб/л	60	60
Стоимость нефтепродуктов при посеве, руб.	12000	11892
Экономия нефтепродуктов, руб.	–	108

Таким образом, эксплуатация МТА в составе Беларус-1221.2+СТВ-12 с опытной навесной системой позволит снизить расходы на топливо на 108 рублей при посеве поля площадью 50 га.

Затраты на все виды технического обслуживания, текущий и капитальный ремонт, замену шин и хранение определены по формуле

$$P_m = \frac{B_c \cdot NP}{100},$$

где  $B_c$  – балансовая стоимость машины, руб.;

$NP$  – норма отчислений на ТО, ремонт, замену шин, хранение машины (в процентах к балансовой стоимости машины).

Амортизационные отчисления равны

$$A_m = \frac{B_c \cdot NA}{100},$$

где  $NA$  – годовая норма амортизации в процентах от балансовой стоимости машины.

Экономия эксплуатационных издержек за год оценивается по формуле

$$\Delta_{иГ} = \left( \frac{ИГ_1}{Q_{Г1}} - \frac{ИГ_2}{Q_{Г2}} \right) \times Q_{Г2},$$

где  $Q_{Г1}$ ,  $Q_{Г2}$  – объем работ соответственно по серийному и опытному вариантам.

За срок эксплуатации проекта с учетом дисконтирования получен экономический эффект

$$P_r = \Delta_u \times \frac{(1 + NS)^T - 1}{NS},$$

где  $NS$  – коэффициент, отражающий учетную годовую ставку процента по кредитам банка или вкладу в банк;

$T$  – срок службы трактора, лет.

Коэффициент эффективности капитальных вложений определен по формуле

$$E_t = \sqrt[t]{\frac{P_t}{C_{y.э.}}} - 1,$$

где  $E_t$  – годовой коэффициент эффективности капиталовложений;

$P_t$  – экономический эффект за срок службы объекта, руб.;

$C_{y.э.}$  – стоимость навесной системы, руб.

Срок окупаемости капиталовложений определен с учетом дисконтирования по формуле

$$T_{ок} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{C_{y.э.} \times NS}{\Delta_u}\right)}{\ln(1 + NS)}.$$

В таблице 5.5 приведены показатели, характеризующие общие технико-экономические параметры эффективности применения модернизированной навесной системы на тракторе Беларус-1221.2.

Из таблицы 5.5 видно, что применение опытной навесной системы позволяет получить годовой экономический эффект в размере 15770 рублей, срок окупаемости дополнительных инвестиций составляет около 4 месяцев.

Таблица 5.5 – Показатели экономической эффективности

Показатели	Трактор с базовой навесной системой	Трактор с модернизированной навесной системой
Балансовая стоимость трактора Беларус-1221.2, руб.	3860000	3864956
Инвестиционные вложения в проект, руб.	–	4956
Выработка, га/ч	2,5	2,55
Годовой экономический эффект, руб.	–	15770
Коэффициент эффективности дополнительных инвестиций	–	0,68
Срок окупаемости инвестиций, год	–	0,31

Следует отметить, что в расчетах не учтено возможное повышение урожайности сельскохозяйственных культур за счет сохранения физико-механических свойств почвы и уменьшение амортизационных затрат на те-

кущий и капитальный ремонт трактора в виду снижения действующих на него динамических нагрузок со стороны навесного оборудования.

### 5.3. Выводы

1. Модернизация навесной системы трактора Беларус-1221.2 на основе предложенных технических решений требует дополнительных инвестиций в размере 4956 рублей.

2. Эксплуатация МТА в составе Беларус-1221.2+СТВ-12 с опытной навесной системой позволяет получить экономию оплаты труда 100 рублей, снизить расходы на топливо на 108 рублей при посеве поля площадью 50 га.

3. 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.

## 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 угловую 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 (приложения Е, Ж) и используются в учебном процессе (приложение З). 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная справочная система «Сельхозтехника» [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.agrobase.ru/>. – Загл. с экрана.
2. Адаптация навигационной системы на тракторе Беларус-1221.2 / А.Е. Новиков [и др.] // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2022 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 230-236.
3. Алексеев С.А. Повышение эффективности использования тракторно-транспортного агрегата путем совершенствования тягово-сцепного устройства: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / С.А. Алексеев. – Саратов, 2002. – 210с.
4. Амосов А.Г. Алгоритм построения геометрии движения специальных транспортных средств / А.Г. Амосов // Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – № 4. – С. 20-29.
5. Анализ действительной криволинейной траектории движения колесной машины / А.Н. Беляев [и др.] // Вестник Воронежского ГАУ. – 2022. – Т. 15. – № 1 (72). – С. 63-70.
6. Анализ исследований по вопросам устойчивости и управляемости автомобиля / А.Н. Беляев [и др.] // 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.
7. Анализ исследований по вопросам устойчивости и управляемости колесного трактора / А.Н. Беляев [и др.] // 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.

8. Анализ теорий бокового увода пневматических движителей колесных машин / А.Н. Беляев [и др.] // 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.
9. Антонов Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / Д.А. Антонов. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
10. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
11. А.С. 1331717 СССР, МПК (5) В62D7/14. Способ поворота транспортного средства со всеми ведущими и поворотными колесами и устройством для его осуществления / Н.Е. Бечвай, С.А. Владыкин, А.И. Егоров, В.И. Комиссаров, М.И. Маленков (СССР). – № 4030063/40-11; заявл. 29.12.1985; опубл. 23.08.1987. Бюл. № 31.
12. Атаманов Ю.Е. Аналитическое исследование криволинейного движения тракторного агрегата / Ю.Е. Атаманов, В.А. Ким, Г.А. Таяновский // Автотракторостроение. Теория и конструирование мобильных машин. – Минск: Высшая школа, 1979. – Вып. 13. – С. 63-69.
13. Барский И.Б. Динамика тракторов / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
14. Беларусь-1221.2/1221В.2/1221. Руководство по эксплуатации / РУП «Минский тракторный завод», 2009. – 292 с.
15. Беляев А.Н. Анализ боковых реакций почвы на колесах трактора при повороте [Электронный ресурс] / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина, Д.Н. Афоничев // Resources and Technology. – 2022. – № 3, Т.19. – С. 44–56. – Режим доступа <https://rt.petrstu.ru/journal/article.php?id=6363>, свободный. – Загл. с экрана.
16. Беляев А. Н. Влияние передних и задних навесных орудий на поворачиваемость комбинированного агрегата / А.Н. Беляев, Е.М. Попов, Д.А. Глаголев // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей тракторов и автомобилей: сб. научн. тр. постоянно действ. научно-

технического семинара стран СНГ 21-23 апреля 2000 г. – С. Петербург: СПбГАУ, 2000. – С. 92.

17. Беляев А.Н. Влияние передних и задних навесных орудий на физико-механические свойства почвы / А.Н. Беляев, В.И. Крюков // Высокие технологии в экологии: труды 11-ой междунар. научно-практич. конференции.– Воронеж: Воронежское отделение Российской экологической академии, 2008. – С. 119-122.

18. Беляев А.Н. Инерционные силы при повороте МТА / А.Н. Беляев, Е.М. Попов, Д.А. Глаголев // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей тракторов и автомобилей: сб. научн. тр. постоянно действ. научно-технического семинара стран СНГ 21-23 апреля 2000 г. – С. Петербург: СПбГАУ, 2000. – С. 93.

19. Беляев А.Н. Исследование кинематики поворота колесного трактора / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1(48). – С. 115-120.

20. Беляев А.Н. Исследование поворотливости трактора ЛТЗ-155 / А.Н. Беляев // Производственный потенциал агропромышленного комплекса и пути улучшения его использования: тез. докл. межрегион. конф. молодых ученых. – Воронеж: ВГАУ, 1991. – С. 146-147.

21. Беляев А.Н. Исследование различных способов движения МТА на поворотной полосе / А.Н. Беляев, В.И. Крюков, Д. Г. Козлов // Повышение эффективности использования, надежности и ремонта сельскохозяйственных машин: сб. научн. тр. – Воронеж: ВГАУ, 2005. – С. 64-68.

22. Беляев А.Н. Машинно-тракторный агрегат на поворотной полосе / А.Н. Беляев, В.И. Крюков // Сельский механизатор. – 2008. – № 9. – С. 12-13.

23. Беляев А.Н. Повышение устойчивости и управляемости машинно-тракторного агрегата при криволинейном движении: монография / А.Н. Беляев, В.И. Орбинский, Т.В. Тришина. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – 157 с.

24. Беляев А.Н. Повышение устойчивости криволинейного движения комбинированного МТА на базе интегрального универсально-пропашного колесного трактора / А. Н. Беляев, А.И. Завражнов, Н.В. Михеев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12. – № 1(60). – С. 57-66.

25. Беляев А.Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колёсных тракторов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01/ А.Н. Беляев. – Мичуринск-наукоград, 2019. – 440 с.

26. Беляев А.Н. Рациональный способ движения МТА на поворотной полосе / А.Н. Беляев, В.В. Шередекин, В.И. Крюков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – №7. – С.18-19.

27. Беляев А.Н. Снижение негативного воздействия на почву движителей колесного трактора при повороте / А.Н. Беляев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж: ВГЛТА, 2014. – Т. 2. – № 3-4(8-4). – С. 398-401.

28. Беляев А.Н. Улучшение характеристик криволинейного движения комбинированного МТА на базе колесного трактора класса 2 ЛТЗ применением упруго-демпфирующего привода колес: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Беляев. – Воронеж, 1995. – 217 с.

29. Болтинский В.Н. Работа тракторного двигателя при неустановившейся нагрузке / В.Н. Болтинский. – М.: Сельхозгиз, 1949.– 215 с.

30. Валюженич Р.Н. Влияние автоблокировки дифференциала на устойчивость прямолинейного движения и поворачиваемость трактора МТЗ-80 в зимних условиях: автореф. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Р.Н. Валюженич. – Горки, 1983. – 21 с.

31. Ванцевич В.В. Исследование дифференциалов повышенного трения и их влияние на поворачиваемость колесных тракторов 4х4 класса 14...20 кН: автореф. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / В.В. Ванцевич. – Минск, 1981. – 24 с.

32. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г.В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973. – 194 с.
33. Влияние жесткости навесной системы на устойчивость криволинейного движения машинно-тракторного агрегата / А.Н. Беляев [и др.] // Наука в Центральной России. – 2023. – № 2(62). – С. 115-126.
34. Вольская Н.С. Модель поворота многоосной колесной машины на грунте / Н.С. Вольская, А.П. Игнатушин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2005. – № 4. – С. 81-91
35. Вулхов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL: учебное пособие / Э. А. Вулхов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА, 2004. – 464 с.
36. Гамаюнов П.П. Повышение устойчивости автотракторного поезда на базе МТЗ «Беларусь» («Беларус») / П. П. Гамаюнов, С. А. Алексеев // Научное обозрение. – 2014. – № 12-1. – С. 422-424.
37. Гаспарянц Г.А. Устойчивость и управляемость автомобиля / Г.А. Гаспарянц. – М.: Автотрансиздат, 1960. – 130 с.
38. Гольдман В.Т. Исследование энергетики трактора при движения по криволинейной траектории: автореф. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / В.Т. Гольдман. – Казань, 1971. – 25 с.
39. Гореликов В.Е. Исследование проходимости и динамики колесного трактора средней мощности с двумя ведущими осями: автореф. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / В.Е. Гореликов. – Л., 1963. – 20 с.
40. Горланов С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов в агроинженерии / С.А. Горланов, Е.А. Козлобаева, Н.П. Шилова. – Воронеж: ВГАУ, 2020. – 36 с.
41. ГОСТ ISO 730-2019 Тракторы колесные сельскохозяйственные. Трехточечное заднее навесное устройство. Категории 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N и 4». – Введ. 2020-08-01. – М.:Стандартинформ, 2019. – 20 с.

42. ГОСТ Р 31507-2012. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2013-09-01. – М.: Стандартиформ, 2013. – 54 с.

43. ГОСТ 8.002-86. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный надзор и ведомственный контроль за средствами измерений. Основные положения. – Введ. 1987-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 13 с.

44. ГОСТ 20915-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартиформ, 2013 г. – 23 с.

45. ГОСТР 53056- 2008 Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартиформ, 2009.– 20 с.

46. ГОСТ 24055-88. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 16 с.

47. ГОСТ 24059-88. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки транспортных средств на этапе испытаний. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 16 с.

48. ГОСТ 25836-83 Тракторы. Виды и программы испытаний. – Введ. 1985-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 29 с.

49. ГОСТ 30752-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Определение наименьшего и габаритного диаметров окружности. – Введ. 2003-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 10 с.

50. ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. – Введ. 2003-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 7 с.

51. ГОСТ ГОСТ Р 51960-2002. Тракторы сельскохозяйственные колесные. Методы оценки управляемости – Введ. 2002-11-27. – М.: Госстандарт России, 2002. – 11 с.

52. Гусяцкий М.Л. Основы теории управляемости колесных навесных агрегатов / М.Л. Гусяцкий // Мех. и эл. соц. с.-х. – 1968. - № 2. – С. 5-9.

53. Гячев Л.В. Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов. / Л.В. Гячев. – М.: Машиностроение, 1981. – 206 с.
54. Давиденко П.П. Влияние задней и передней навесных машин на тягово-сцепные свойства и управляемость свекловодческого гусеничного трактора. Обоснование параметров их соединения: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / П.П. Давиденко. – М., 1985. – 260 с.
55. Динамика системы «дорога-шина-автомобиль-водитель» / А.А. Хачатуров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 536 с.
56. Донцов И.Е. Устойчивость движения МТА с орудиями фронтальной или задней навески / И.Е. Донцов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 9. – С. 31-34.
57. Донцов И.Е. Устойчивость движения комбинированных МТА с фронтальными и задними навесными орудиями / И.Е. Донцов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2009. – № 12. – С. 20-22.
58. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. – М.: Сельхозиздат, 1985. – 352 с.
59. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК-Пресс, 2011. – 800 с.
60. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК-Пресс, 2009. – 1264 с.
61. Жилейкин М.М. Разработка принципов повышения устойчивости движения многозвенных тракторных поездов / М.М. Жилейкин, Г.И. Скотников // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2015. – № 10. – С. 19-23.
62. Жилейкин М.М. Качественный анализ методов повышения управляемости и устойчивости колесных машин / М.М. Жилейкин, В.А. Шинкаренко // Известия ВУЗов. Сер. «Машиностроение». – 2015. – № 1. – С. 42-48.
63. Жуковский Н.Е. К динамике автомобиля / Н.Е. Жуковский // Полное собрание сочинений. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – Т.7. – 608 с.



64. Зейдель А.И. Элементарные оценки ошибок измерения / А.И. Зейдель. – Л.: Наука, 1967. – 88 с.
65. Зенькович А.А. Исследование статического поворота тяговых средств 4x4 класса 20 кН: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Зенькович. – Минск, 1982. – 18 с.
66. Илларионов В.А. Эксплуатационные свойства автомобиля / В.А. Илларионов. – М.: Машгиз, 1966. – 227 с.
67. Иофинов С.А. Технология производства тракторных работ / С.А. Иофинов. – Л.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1959. – 231 с.
68. Иофинов С.А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов. – М.: Колос, 1974. – 430 с.
69. Исследование движения колесной машины по криволинейной траектории / А.Н. Беляев [и др.] // Вестник Воронежского ГАУ. – 2021. – Т. 14. – № 4 (71). – С. 21-29.
70. Кабаков Н.С. Устойчивость комбинированного агрегата с передней и задней навесными системами / Н.С. Кабаков, М.Я. Турушев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981. – № 7. – С. 33-36.
71. Кленин Н.И. Сельскохозяйственные машины: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Агроинженерия» / Н.И. Кленин, С.Н. Киселев., А.Г. Левшин. – М.: КолосС, 2008. – 816 с.
72. Козлов Д.Г. Снижение динамической нагруженности почвы при криволинейном движении комбинированного МТА на базе трактора тягового класса 2: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Д.Г. Козлов. – Мичуринск-Наукоград, 2013. – 146 с.
73. Коновалов В.Ф. Динамическая устойчивость тракторов / В.Ф. Коновалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 143 с.

74. Коновалов В.Ф. Устойчивость и управляемость машинно-тракторных агрегатов / В.Ф. Коновалов. – Пермь: Пермский СХИ, 1969. – 444 с.
75. Коновалов П.В. Повышение эффективности использования колесного МТА путем применения пневмогидравлической навески и двигателя постоянной мощности: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / П.В. Коновалов. – Волгоград, 2004. – 183 с.
76. Кравец В.Н. Развитие научных методов проектирования и их реализация с целью совершенствования эксплуатационных свойств колесных машин: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03 / В.Н. Кравец. – Нижний Новгород, 2004. – 396 с.
77. Критерии оценки управляемости и устойчивости колесного трактора / А.Н. Беляев [и др.] // 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.
78. Ксенович И.П. Ходовая система-почва-урожай / И.П. Ксенович, В.А. Скотников, М.И. Ляско. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
79. Кудрявцев В.А. Краткий курс высшей математики / В. А. Кудрявцев, Б.П. Демидович. – М.: Наука, 1978. – 624 с.
80. Кузьмичев В.Е. Исследование кинематики поворотов навесных агрегатов при междурядной обработке пропашных культур / В.Е. Кузьмичев // Ученые зап. – Петрозавод. гос. ун-т, 1958. – Вып. 3. – Т. 9. – С. 230-248.
81. Кутьков Г.М. Тяговая динамика тракторов / Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1980. – 280 с.
82. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
83. Лифантьев В.И. Исследование динамики поворота колесного трактора средней мощности с двумя ведущими мостами: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / В.И. Лифантьев. – Л.: Пушкин, 1961. – 18 с.
84. Лихачев В.С. Испытания тракторов / В.С. Лихачев. – М.: Маши-

ностроение, 1974. – 286 с.

85. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А.Б. Лурье. – Л.: Колос, 1970. – 376 с.

86. Любимов Б.А. Теория и методика динамометрирования тракторов с навесными машинами / Б.А. Любимов // Некоторые вопросы теории и методики исследования тракторов: Труды НАТИ. – М. – 1964. – Вып. 170. – С. 1-133.

87. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения / А.М. Ляпунов. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. – 472 с.

88. Мандрик И.И. Улучшение эксплуатационных показателей многозвенных тракторных поездов за счет совершенствования тягово-сцепного устройства: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / И.И. Мандрик. – Саратов, 2000. – 135 с.

89. Маркова Е.В. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей / Е.В. Маркова, А.Н. Лысенков. – М.: Наука, 1973. – 220 с.

90. Маховиков А.Я. Исследование управляемости колесного трактора класса 1.4 Т с гидросистемой рулевого управления: автореф. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.Я. Маховиков. – Горки, 1970. – 16 с.

91. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Н. Алешкин, П.Н. Рощин. – М.: Колос, 1980. – 168 с.

92. Методика аналитического определения действительной траектории поворота колесной машины / А.Н. Беляев [и др.] // Вестник Воронежского ГАУ. – 2023. – Т. 16. – № 3 (78). – С. 151-158.

93. Методика лабораторных исследований по определению усилий в тягах навесного устройства трактора / А.Е. Новиков [и др.] // Теория и практика инновационных технологий в АПК: мат. нац. науч.-практ. конф. (19-21 апреля 2022 г.). – Ч. I.– Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 264-271.

94. Методика определения теоретической траектории поворота ко-

лесной машины / А.Н. Беляев [и др.] // Вестник Воронежского ГАУ. – 2023. – Т. 16. – № 1 (76). – С. 90-97.

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

96. Новиков А.Е. Оценка влияния заднего навесного орудия на траекторию движения машинно-тракторного агрегата / А.Е. Новиков, В.В. Шередекин, 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. 63-68.

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

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

99. Обоснование выбора системы рулевого управления трактора / А.Н. Беляев [и др.] // Вестник Воронежского ГАУ. – 2022. – Т. 15. – № 2 (73). – С. 39-44.

100. Обоснование методики экспериментального определения траектории движения колесной машины / А.Е. Новиков [и др.] // Прикладные вопросы физики (к 120-летию со дня рождения академика 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.

101. Обоснование методики экспериментальных исследований криволинейного движения колесной машины / А.Н. Беляев [и др.] // Тенденции

развития технических средств и технологий в АПК: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2022 г.). – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 168-175.

102. Обоснование параметров и конструкции универсально-пропашного трактора повышенной эффективности / К. Н. Виноградов [и др.]. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1978. – 164 с.

103. О кинематике криволинейного движения трактора с четырьмя ведущими управляемыми колесами / А.Ф. Полетаев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 1971. – № 12. – С. 13-16.

104. ОСТ 37.001.051-86. Управляемость и устойчивость автомобилей. Термины и определения. – Введ. 1986-01-01. – М.: НАМИ, 1986. – 9 с.

105. Оценка бокового отклонения колесной машины от заданной траектории движения / А.Н. Беляев [и др.] // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки– 2022. – Т. 52. – № 4. – С. 120-128.

106. Оценка влияния конструктивных параметров на кинематику криволинейного движения колесной машины / А.Н. Беляев [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: мат. нац. науч.-практ. конф. (6-7 июня 2022 г.). – Ч. I.– Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 183-190.

107. 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. Шередикин, И.А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2023105280; заявл. 07.03.2023; опубл. 12.04.2023. Бюл. № 11.

108. 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.

109. 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.

110. Патент на изобретение № 2705413 С1 РФ, МПК В62D 7/14. Способ поворота транспортного средства со всеми управляемыми колесами / А.Н. Беляев, Д.Г. Козлов, Т.В. Тришина, И.А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2705413; заявл. 09.01.2019; опубл. 07.11.2019. Бюл. № 31.

111. 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.

112. Пашедко Л.Т. Исследование кинематических характеристик и технологии поворотов колесных тракторных агрегатов, работающих на повышенных скоростях: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Л. Т. Пашедко. – Л.-Пушкин, 1965. – 165 с.

113. Певзнер Я.М. Теория устойчивости автомобиля / Я.М. Певзнер – М.: Машгиз, 1947. – 156 с.

114. Перспективы развития машинно-тракторных агрегатов / А.Н. Беляев [и др.] // 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.

115. Повышение устойчивости криволинейного движения МТА / А.Н. Беляев [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2001. – №5. – С. 32-33.

116. Поливаев О.И. Оценка влияния упругодемпфирующего привода ведущих колес на поворачиваемость МТА / О.И. Поливаев, А.Н. Беляев // Техника в сельском хозяйстве. – 2000. – № 2. – С. 27-30.

117. Полухин А.А. Анализ рынка зерновых и зернобобовых культур в системе ФГИС «ЗЕРНО» для продовольственной безопасности страны / А.А. Полухин, Н.А. Латнева, Н.В. Парушина // Зернобобовые и крупяные культуры, 2022. – № 4(44). – С. 12-23.

118. Рокар И. Неустойчивость в механике / И. Рокар. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. – 287 с.

119. Рыжих Н.Е. Совершенствование и использование навески колесных тракторов класса тяги 14 кН с целью повышения эффективности пахотных тракторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/ Н.Е. Рыжих. – Краснодар, 1996. – 138 с.

120. Рынок навесной и прицепной сельскохозяйственной техники. Сентябрь 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://marketing-i.ru/issledov/23/selkhoz mashiny-i-oborudovanie/gynok-pricepnoj-selskoxozajstvennoj-texniki>. - Загл. с экрана.

121. 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.

122. 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.

123. 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. Гулевский, 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.

124. 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.

125. Сельскохозяйственная техника и технологии: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 110303 «Механизация переработки сельскохозяйственной продукции» / И.А. Спицын [и др.] – М.: КолосС, 2006. – 646 с.

126. Система параллельного вождения FJDynamics / А.Е. Новиков [и др.] // 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.

127. Скотников В.А. Основа теории и расчет трактора и автомобиля / В.А. Скотников, А.А. Маценский, А.С. Солонский: Под. ред. В.А. Скотникова. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с.

128. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин / Г.А. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

129. Снижать уплотнение почвы на поворотных полосах / Ф.П. Цыганов [и др.] // Земледелие. – 1986. – № 3. – С. 47-48.

130. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1985. – 272 с.

131. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. – Мн.: Дизайн ПРО, 1997. – 640 с.



132. Тензометрия в машиностроении / Р.А. Макаров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
133. Теоретическая механика: учебник / С.В. Болотин [и др.]. – М.: Академия, 2010. – 432 с.
134. Тракторы. Теория // В.В. Гуськов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
135. Трояновская И.П. Методология моделирования криволинейного движения тракторных агрегатов / И.П. Трояновская: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03; 05.05.04 / И. П. Трояновская. – Челябинск, 2011. – 296 с.
136. Трояновская И.П. Механика криволинейного движения тракторных агрегатов: монография / И.П. Трояновская. – Челябинск: ЧГАУ, 2009. – 152 с.
137. Фалькевич Б.С. Теория автомобиля / Б.С. Фалькевич. – М.: Машгиз, 1963. – 239 с.
138. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1970. – 174 с.
139. Фомин С.Д. Повышение управляемости и курсовой устойчивости транспортного агрегата на базе колесного трактора класс 1.4 путем применения пневмогидравлического эластичного привода ведущих колес: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.Д. Фомин. – Волгоград, 1993. – 250 с.
140. Фортуна В.И. Научные основы устойчивости качественных показателей технологических процессов, выполняемых машинно-тракторными агрегатами: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / В.И. Фортуна. – Волгоград, 1971. – 293 с.
141. Чудаков Д.А. Основы теории и расчета тракторов и автомобилей / Д.А. Чудаков. – М.: Сельхозиздат, 1962. – 312 с.
142. Чудаков Е.А. Влияние боковой эластичности колес на движение автомобиля / Е.А. Чудаков. – М.-Л.: АН СССР, 1947. – 127 с.
143. Чудаков Е.А. Теория автомобиля / Е.А. Чудаков // Избранные труды. – М.: АН СССР, 1961. – Т. 1. – 463 с.

144. Шишкин А.В. Стабилизация режимов работы МТА с тракторами класса 5 путем использования рессорного упругого элемента в сцепке: дис... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Шишкин. – Волгоград, 2010. – 153 с.

145. Шумилин А.В. Метод определения характеристик поворота транспортного средства на недеформируемом основании / А.В. Шумилин, А.Н. Володин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1993. – № 8. – С. 17-19.

146. Шухман С.Б. Математическая модель криволинейного движения колеса по грунту / С.Б. Шухман, В.И. Соловьев // Известия ВУЗов. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 8. – С. 24-31.

147. Экспериментальные исследования динамики поворота интегрального универсально-пропашного трактора / А.Н. Беляев [и др.] // Вестник Воронежского ГАУ. – 2019. – Т. 12. – № 2 (61). – С. 48-59.

148. Энциклопедия полимеров [в 3 т.] / Под ред. В. А. Каргин [и др.]. – М: Сов. Энциклопедия. – 1972. – 1312 с.

149. Яворский Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – М.: Оникс, 2006. – 1056 с.

150. Яковлев П.Ю. Повышение управляемости и устойчивости движения машинно-тракторного агрегата с фронтально навешенным орудием за счет модернизации навесного устройства: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/ П.Ю. Яковлев. – Барнаул, 2014. – 138 с.

151. Яковлев С.Н. О некоторых физических свойствах конструкционных полиуретанов / С.Н. Яковлев // Известия СПбТИ. – 2013. – № 20. – С. 78–80.

152. Яковлев С.Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке / С.Н. Яковлев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – № 1(190). – 2014. – С. 137–142.

153. AutoTrac Universal 300. Технологии точного земледелия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.deere.ru/ru/системы-точного-земледелия-ams/навигация-и-автоматизация/комплект-atu-300/>. - Загл. с экрана.

154. Becker G. Schwlngungen in Automobillenkugeln («Shimmy») / G. Becker, H. Fronm, H. Maruhn. – Berlin, 1931. – 150 p.

155. Bergmann W. Tire Cornering Properties / W. Bergmann, H. Clemett // Tire Science and Technology. – 1975. – Vo 1.3. – № 3. – P. 135-163.

156. Broulhiet G. La suspension de la direction de la voiture automobile [Text] / G. Broulhiet // Schimmi et dandinement. – Societe des ingeniers civils de France, 1925. – B. 1. – P. 78.

157. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn / A.N. Belyaev [et al.] // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-9 Issue-1, October 2019. – pp. 4527-4531.

158. Determining the theoretical trajectory of the centre of tractor's mass-when turning in a combined way / A.N. Belyaev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Envi-ronmental Science. International Con-ference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production. Bristol, – 2021. – C. 012073.

159. Determination of Theoretical Path of Vehicle Motion upon Cornering / A.N. Belyaev [et al.] // Journal of Applied Science and Engineering. Taiwan. – 2022. – Vol. 25. № 5. – P. 741–747.

160. Fromm H. Brief Report on the History of the Theory of Shimmi // NACA TM 1365, 1954. – 181 p.

161. Itoh H. Numerical simulation of a 4WD–4WS tractor turning in a rice field / H. Itoh, A. Oida, M. Yamazaki // Journal of Terramechanics. – 1999. – V. 36. – № 2. – P. 91-115.

162. Mammarr S. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering / S. Mammarr, V. B. Baghdassarian Proceedings of the American Control Conference. – 2000. – V. 1. – P. 105–109.

163. Rodrigues A.O. Evaluation of an active steering system / A. O. Rodrigues // Master's degree project. – Sweden, 2004. – 41 p.

164. Starfire 3000 – Руководство механика-водителя OMPFP13848 Выпуск 13 (Russian) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://stellarsupport.deere.com/site\\_media/pdf/ru/manuals/sf3000/omfpfp13848\\_i3\\_59\\_25sep13\\_90dсу.pdf](https://stellarsupport.deere.com/site_media/pdf/ru/manuals/sf3000/omfpfp13848_i3_59_25sep13_90dсу.pdf). - Загл. с экрана.

## Приложение А

Патент на полезную модель № 204692

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 204692****Устройство для навески машин на трактор**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1" (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Беляев Александр Николаевич (RU), Бурдыкин Владимир Дмитриевич (RU), Высоцкая Ирина Алевтиновна (RU), Тришина Татьяна Владимировна (RU), Новиков Алексей Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2020128722

Приоритет полезной модели 28 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 07 июня 2021 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 28 августа 2030 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0x02A6CFBC00B1ACF594A4A2F0B092E9A118  
Владелец: Ивлиев Григорий Петрович  
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

*Г.П. Ивлиев*



## Продолжение приложения А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19)

**RU** (11)**204 692**

(13)

**U1**

(51) МПК

[A01B 61/02 \(2006.01\)](#)

(52) СПК

[A01B 61/02 \(2020.08\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2020128722, 28.08.2020**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**28.08.2020**Дата регистрации:  
**07.06.2021**Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: **28.08.2020**(45) Опубликовано: [07.06.2021](#) Бюл. № **16**(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: **SU 281052 A1, 03.09.1970. SU**  
**1222212 A1, 07.04.1986. SU 880280 A1,**  
**15.11.1981.**Адрес для переписки:  
**394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, 1, ВГАУ,**  
**зав. сектором защиты интеллектуальной**  
**собственности Балбековой Л.В.**

(72) Автор(ы):

**Беляев Александр Николаевич (RU),**  
**Бурдыкин Владимир Дмитриевич (RU),**  
**Высоцкая Ирина Алевтиновна (RU),**  
**Тришина Татьяна Владимировна (RU),**  
**Новиков Алексей Евгеньевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное**  
**образовательное учреждение высшего об-**  
**разования "Воронежский государствен-**  
**ный аграрный университет имени импе-**  
**ратора Петра 1" (ФГБОУ ВО Воронеж-**  
**ский ГАУ) (RU)**

(54) Устройство для навески машин на трактор

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области машиностроения и применяется в конструкциях навесных систем тракторов и других самоходных энергетических, в том числе транспортных средств, работающих в агрегате с навесными машинами. Устройство включает охватывающую рамку и охватываемую рамку с механизмом фиксации, введенную в полость охватывающей рамки. Охватываемая рамка

## Продолжение приложения А

соединена с шаровым шарниром центральной тяги и шаровыми шарнирами продольных тяг навесного устройства трактора по трехточечной схеме, а охватывающая рамка прикреплена к навесной машине. На внешней поверхности охватываемой рамки прикреплена прокладка из эластомера и к прокладке прикреплены металлические пластины. В шаровом шарнире центральной тяги и шаровых шарнирах продольных тяг навесного устройства установлены втулки из эластомера и втулки из металла. Устройство обеспечивает уменьшение скорости нарастания нагрузки орудий на трактор, снижение колебаний нагрузки на сцепное устройство при начале движения трактора, торможении и остановке. 7 ил.

Полезная модель относится к области машиностроения и применяется в конструкциях навесных систем тракторов и других самоходных энергетических, в том числе транспортных, средств, работающих в агрегате с навесными машинами.

Известно устройство для навески сельскохозяйственных машин на трактор [А.С. СССР №281052 С1 А01В 63/10, 03.09.1970. Бюл. №28] или [А.С. СССР №1222212 А А01В 59/01, В01В 53/10], содержащее две треугольные фермы, одна из которых рамка - охватываемая -присоединяется к трех точечной навесной системе трактора, другая замок -охватывающая - прикреплена к навесной машине. Недостатком данной конструкции навески является то, что данная система недостаточно компенсирует ударные нагрузки при резком изменении ускорения трактора, продольных и вертикальных колебаний трактора и навешанной на него машины.

Задачей полезной модели является расширение диапазона гашения динамических нагрузок и стабилизация движения навесного агрегата при начале движения трактора, торможении, преодолении неравномерного сопротивления движению, остановке, а также совершении поворота с орудиями в транспортном положении.

Технический результат достигается тем, что устройство для навески машин на трактор включает охватывающую рамку и охватываемую рамку с механизмом фиксации, введенную в полость охватывающей рамки, охватываемая рамка соединена с шаровым шарниром центральной тяги и шаровыми шарнирами продольных тяг навесного устройства трактора по трехточечной схеме, а охватывающая рамка прикреплена к навесной машине. На внешней поверхности охватываемой рамки, прикреплена прокладка из эластомера и к прокладке прикреплены металлические пластины, при этом в шаровом шарнире центральной тяги и шаровых шарнирах продольных тяг навесного устройства установлены втулки из эластомера и втулки из металла.

Охватывающая рамка представляет собой треугольную ферму, изготовленную из швеллеров, сваренных под углом 65°. В верхней части находится связь (треугольник из стали), в которой выполнены пазы для входа в них защелки механизма фиксации, согласно полезной модели на внешней поверхности охватываемой рамки прикреплена прокладка из эластомера, а к прокладке прикреплены металлические пластины, при этом в шаровом шарнире центральной тяги и в шаровых шарнирах продольных тяг навесного устройства установлены втулки из эластомера и втулки из металла.

Техническим результатом, обеспечиваемым приведенной совокупностью признаков, является уменьшение скорости нарастания нагрузки орудий на трактор, снижение колебаний нагрузки на сцепное устройство при начале движения трактора, торможении и остановки; при этом происходит оптимизация режимов работы движителей, уменьшение их буксования.

## Продолжение приложения А

Техническая сущность заявленной полезной модели поясняется чертежами устройства для навески машин на трактор, где:

Фиг. 1 - охватываемая рамка для навески машины.

Фиг. 2 - сечение А-А охватываемой рамки.

Фиг. 3 - вид охватываемой рамки сбоку.

Фиг. 4 - сечение Б-Б шаровой опоры центральной тяги.

Фиг. 5 - сечение В-В шаровой опоры продольной тяги.

Фиг. 6 - охватывающая рамка.

Фиг. 7 - сечение Г-Г охватывающей рамки.

Заявленное устройство для навески машин на трактор содержит охватываемую рамку (фиг. 1), представляющую плоскую сварную ферму, состоящую из двух расположенных под углом  $65^\circ$  квадратных труб 1. В верхней части охватываемой рамки находится связь 2 - треугольник из стали, в котором расположен механизм фиксации 3.

На внешних охватываемых поверхностях квадратных труб (фиг. 2) прикреплена прокладка 4 из эластомера, как правило, на основе натурального каучука, который обладает наилучшими физическими свойствами для гашения вибраций. К прокладке 4 прикреплены металлические пластины 5.

Охватываемая рамка 1, через отверстия в пластинах механизма фиксации 3, соединяется с задним шаровым шарниром 6 центральной тяги 7 (фиг. 3) и с шаровыми шарнирами 8 продольных тяг 9 навесного устройства.

В шаровом шарнире 6 установлена втулка из эластомера 10, металлическая втулка 11 и палец 12 (фиг. 4) для крепления охватываемой рамки с центральной тягой 7.

В нижней части охватываемой рамки 1 приварены пальцы 13 (фиг. 5), которыми рамка устанавливается в отверстия шаровых шарниров 8 продольных тяг 9 (фиг. 3). В шаровых шарнирах 8 установлены втулки 14 из эластомера и металлические втулки 15 (фиг. 5).

Устройство для навески содержит охватывающую рамку 16 (фиг. 6), которая представляет треугольную ферму, изготовленную из швеллера (фиг. 7). В верхней части находится связь 17 (треугольник из стали) с прорезями для входа защелки механизма фиксации.

Заявленное устройство для навески машины на трактор работает следующим образом. Перед применением устройства, необходимо установить охватываемую рамку на трактор, а охватывающую рамку на навесное оборудование. Для навешивания оборудования навесное устройство вместе с охватываемой рамкой опускают вниз, перемещая трактор назад, совмещают охватываемую рамку в одной плоскости с охватывающей рамкой. Поднимают навесное устройство и охватываемую рамку вводят в полость охватывающей рамки. При достижении крайнего верхнего положения срабатывает механизм фиксации. Агрегат готов к эксплуатации.

При начале движения агрегата, трактор преодолевая силы инерции и силы сопротивления на перекачивание, начинает движение до момента достижения тягового усилия равного силе, необходимой для выхода навесной машины из состояния покоя. В это время начинает перемещаться охватываемая рамка относительно охватывающей рамки, при этом происходит деформация прокладки 4 из эластомера на охватываемой поверхности трубчатой рамки. При этом с одной стороны рамки происходит растяжение с другой - сжатие упругого элемента. Аналогичные деформации возникают во втулках из эластомера 10 и 14 шаровых опор 6 и 8. Деформации этих упругих элементов достаточно для того, чтобы разделить начало движения трактора и машины во времени. Поэтому начало движения с места и



## Продолжение приложения А

разгон агрегата осуществляется возросшим к этому времени тяговым усилием трактора и запасом инерции движущихся частей его масс. Детали из эластомера создают возможность поочередного начала движения трактора и машины без разрыва кинематической цепи.

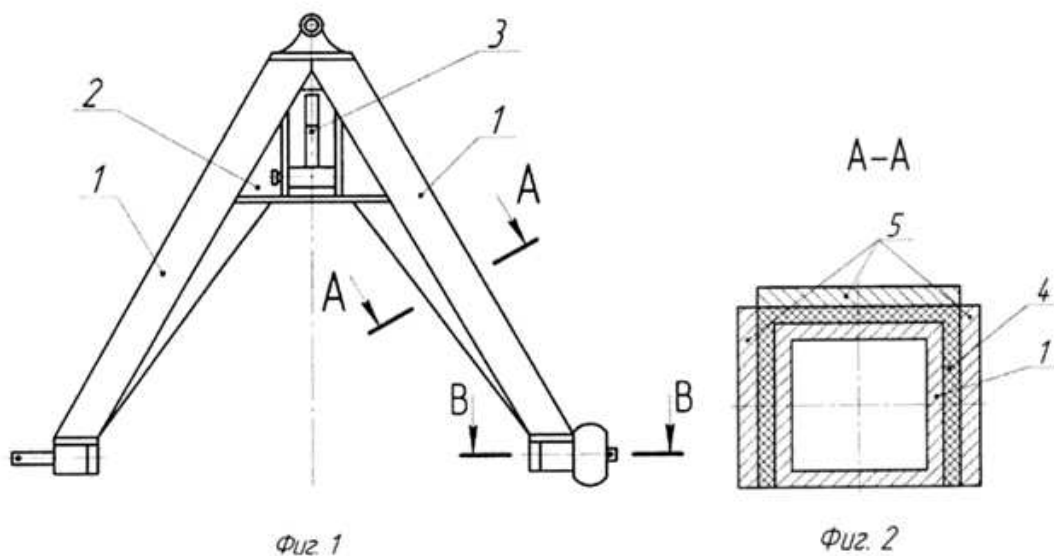
Такое конструктивное выполнение навесного устройства обеспечивает снижение ударных нагрузок на детали навески при начале движения с места и остановке. Выбор эластомера обоснован свойствами материала, позволяющими гасить резонансные колебания, незначительной величиной деформации материала и относительной компактностью.

При отсутствии деталей из эластомера начало движения, торможение, равно как и появление ускорения, сопровождаются повышенной динамической нагрузкой, рывками, что отрицательно сказывается на работе агрегата и водителя.

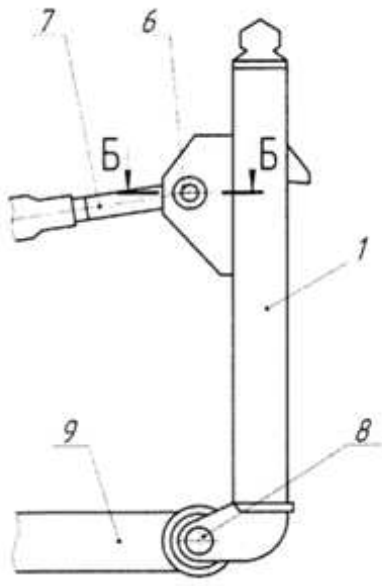
Таким образом, предлагаемое устройство для навески машин на трактор, позволяет обеспечить лучшие сцепные качества трактора, снижение динамических нагрузок на его ходовую часть, трансмиссию и навесную машину при неустановившихся режимах движения путем гашения продольных и вертикальных колебаний и разделить момент начала движения трактора и машины.

Формула полезной модели

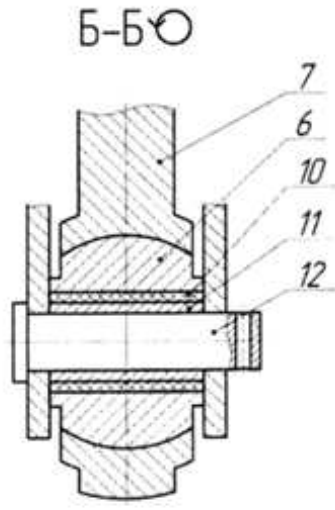
Устройство для навески машин на трактор, включающее охватывающую рамку и охватываемую рамку с механизмом фиксации, введенную в полость охватывающей рамки, охватываемая рамка соединена с шаровым шарниром центральной тяги и шаровыми шарнирами продольных тяг навесного устройства трактора по трехточечной схеме, а охватывающая рамка прикреплена к навесной машине, отличающееся тем, что на внешней поверхности охватываемой рамки прикреплены прокладка из эластомера, и к прокладке прикреплены металлические пластины, при этом в шаровом шарнире центральной тяги и шаровых шарнирах продольных тяг навесного устройства установлены втулки из эластомера и втулки из металла.



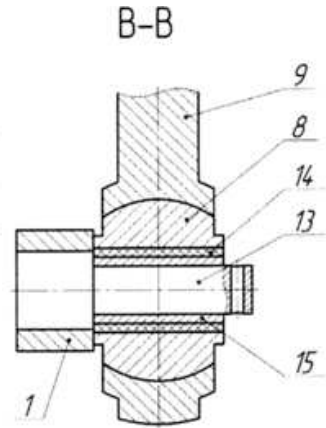
## Продолжение приложения А



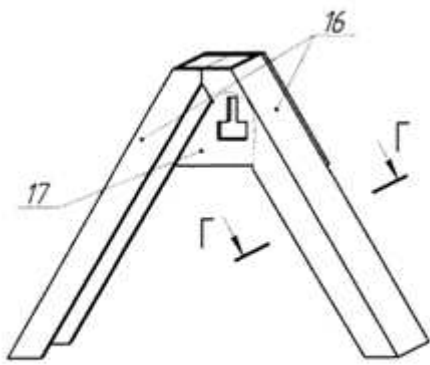
Фиг. 3



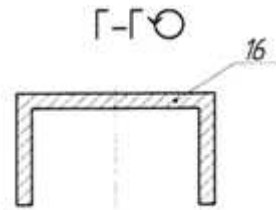
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

## Приложение Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022614611

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022614611

**Программа расчета геометрических характеристик и построения траектории криволинейного движения колесной машины**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Беляев Александр Николаевич (RU), Гулевский Вячеслав Анатольевич (RU), Тришина Татьяна Владимировна (RU), Высоцкая Ирина Алевтиновна (RU), Новиков Алексей Евгеньевич (RU)*

Заявка № **2022613591**Дата поступления **15 марта 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **23 марта 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 58b30077c14c101a194edbc24145d5c7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*

## Продолжение приложения Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2022614611

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2022614611 Дата регистрации: 23.03.2022 Номер и дата поступления заявки: 2022613591 15.03.2022 Дата публикации и номер бюллетеня: 23.03.2022 Бюл. № 4</p>	<p>Автор(ы): Беляев Александр Николаевич (RU), Гулевский Вячеслав Анатольевич (RU), Тришина Татьяна Владимировна (RU), Высоцкая Ирина Алевтиновна (RU), Новиков Алексей Евгеньевич (RU) Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU)</p>
---	--

Название программы для ЭВМ:

Программа расчета геометрических характеристик и построения траектории криволинейного движения колесной машины

Реферат:

Программа позволяет рассчитать координаты, радиус кривизны, длину теоретической криволинейной траектории, описываемой кинематическим центром колесной машины, выполнить графическое изображение кривой траектории и определить угол наклона продольной оси машины к оси ординат. Тип ЭВМ: IBM PC на базе процессора Pentium III и выше; ОС: Windows XP и выше.

Язык программирования: Mathcad 15

Объем программы для ЭВМ: 92 КБ

## Продолжение приложения Б

Программа расчета геометрических характеристик и построения траектории криволинейного движения колесной машины

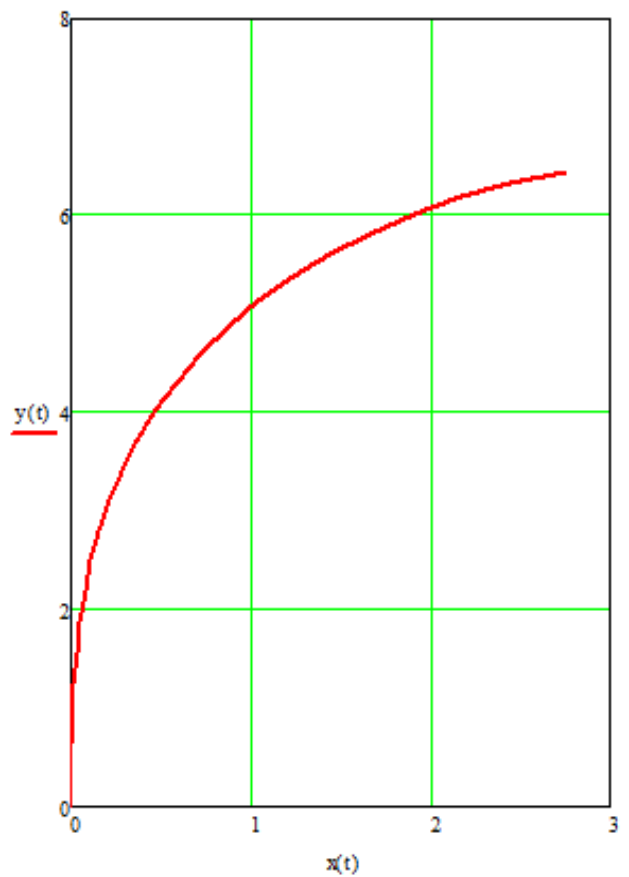
$$L := 2.0 \quad \omega_1 := 0.1047$$

$$V := 1.25 \quad t := 0, 0.25 \dots 6.0$$

$$x(t) := V \cdot \int_0^t \sin \left( V \cdot \int_0^t \frac{\tan(\omega_1 \cdot t)}{L} dt \right) dt$$

$$y(t) := V \cdot \int_0^t \cos \left( V \cdot \int_0^t \frac{\tan(\omega_1 \cdot t)}{L} dt \right) dt$$

x(t) =	y(t) =	t =
0	0	0
2.13·10 <sup>-4</sup>	0.312	0.25
1.705·10 <sup>-3</sup>	0.625	0.5
5.755·10 <sup>-3</sup>	0.937	0.75
0.014	1.25	1
0.027	1.562	1.25
0.046	1.874	1.5
0.073	2.185	1.75
0.109	2.496	2
0.156	2.805	2.25
0.214	3.112	2.5
0.285	3.416	2.75
0.369	3.717	3
0.469	4.013	3.25
0.586	4.303	3.5
0.719	4.586	3.75
0.87	4.859	4
1.04	5.121	4.25
1.229	5.37	4.5
1.437	5.603	4.75
1.664	5.817	5
1.91	6.01	5.25
2.173	6.179	5.5
2.451	6.32	5.75
2.744	6.431	6



$$t := 6$$

## Продолжение приложения Б

$$\rho := \frac{\left[ \left( \frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left( \frac{d}{dt} y(t) \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\left| \left( \frac{d}{dt} x(t) \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} y(t) - \left( \frac{d}{dt} y(t) \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} x(t) \right|} = 2.753$$

$$L := \int_0^t \sqrt{\left( \frac{d}{dt} x(t) \right)^2 + \left( \frac{d}{dt} y(t) \right)^2} dt = 7.5$$

$$B := V \cdot \int_0^t \frac{\tan(\omega l \cdot t)}{L} dt$$

$$B1 := \frac{B \cdot 180}{3.14} = 19.332$$



## Приложение В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023612456

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023612456

**Программа расчета, построения и сравнения  
теоретической и действительной траекторий кругового  
беспетлевого поворота колесной машины**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Воронежский государственный аграрный университет имени  
императора Петра I" (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Беляев Александр Николаевич (RU), Тришина Татьяна  
Владимировна (RU), Новиков Алексей Евгеньевич (RU),  
Шередекин Павел Валентинович (RU), Высоцкая Ирина  
Алевтиновна (RU)*

Заявка № 2023611594

Дата поступления 03 февраля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 февраля 2023 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 68680077c14e1036e94edbd24145d5c7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 01.01.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*

## Продолжение приложения В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2023612456**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2023612456 Дата регистрации: 03.02.2023 Номер и дата поступления заявки: 2023611594 03.02.2023 Дата публикации и номер бюллетеня: 03.02.2023 Бюл. № 2	Автор(ы): Беляев Александр Николаевич (RU), Тришина Татьяна Владимировна (RU), Новиков Алексей Евгеньевич (RU), Шередекин Павел Валентинович (RU), Высоцкая Ирина Алевтиновна (RU) Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I" (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ) (RU)
--	--

Название программы для ЭВМ:

Программа расчета, построения и сравнения теоретической и действительной траекторий кругового беспетлевого поворота колесной машины

Реферат:

Программа позволяет получить аналитические выражения действительной и теоретической траекторий движения кинематического центра при круговом беспетлевом повороте колесной машины в виде функций явного вида нелинейной аппроксимацией, соответственно, массива экспериментальных точек абсцисс и ординат и массива абсцисс и ординат, полученных путем расчета с использованием теоретических параметрических функций, их графические изображения и установить между ними взаимосвязь в виде коэффициента, полученного отношением аналитических функций действительной и теоретической траекторий участков входа в поворот и установившегося поворота

Язык программирования: Maple

Объем программы для ЭВМ: 76 Кб



## Продолжение приложения В

Программа расчета, построения и сравнения теоретической и действительной траекторий кругового беспетлевого поворота колесной машины

```
> restart:with(Statistics):with(plots):
V:=2.556:
om:=.155:
L:=2.78:
T:=.62/om;

r:=int(tan(om*z)/L,z=0..t1,'AllSolutions'):
r assuming(t1>0,t1<10):
vn_fun:=unapply(%,t1):
vn_fun(t1):
for i from 0 to 100 do
tt[i]:=i*T/100:
xx[i]:=V*int(sin(V*vn_fun(t1)),t1=0..tt[i],numeric):
yy[i]:=V*int(cos(V*vn_fun(t1)),t1=0..tt[i],numeric):
od:

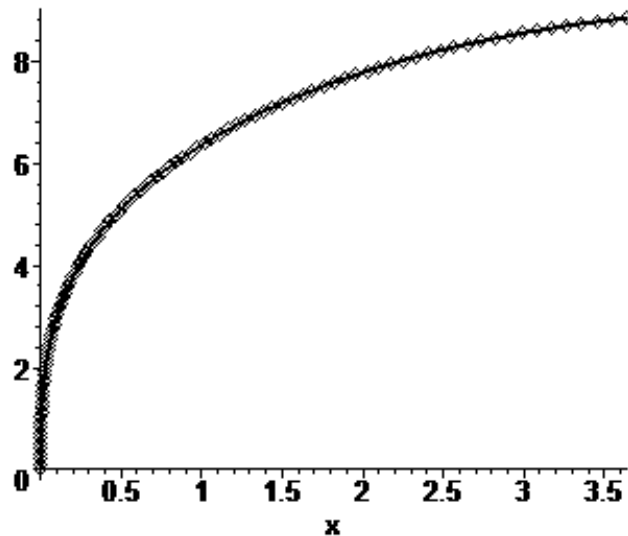
X:=[seq(xx[i],i=0..100)]:
Y:=[seq(yy[i],i=0..100)]:
pp:=(X,Y)->[X,Y]:
aa:=zip(pp,X,Y,2):
a:=NonlinearFit(c2*x^c1+c3*x^1.932, X, Y, x):
f:=unapply(a,x);
plot([aa,f(x)], x=0..xx[100],
style=[point,line],symbolsize=15,thickness=2, color=black);

diff(f(x),x):
pr1:=unapply(%,x):
diff(f(x),x,x):
pr2:=unapply(%,x):
RO:=x->-(1+pr1(x)^2)^1.5/pr2(x):
RO(x);
RO(xx[100]);
#=====
====:
x1:=xx[100];y1:=f(x1);
R:=3.894:
diff(f(x),x):
TG:=unapply(%,x):
re:=solve({y1=yc+sqrt(R^2-(x1-xc)^2),(xc-x1)/sqrt(R^2-(x1-xc)^2)=TG(x1)},{xc,yc}):
xc:=subs(re,xc);
yc:=subs(re,yc);
f1:=x->yc+sqrt(R^2-(x-xc)^2):
f1(x);
tr:=x->piecewise(x<x1,f(x),f1(x)):
tr(x);
plot(tr(x),x=0..xc,thickness=2);
gral:=plot(tr(x),x=0..xc,thickness=2,color=green):
```

$$T := 4.000000000$$

$$f := x \rightarrow 6.44490112281426 x^{0.330196896221175} - 0.0848445431601297 x^{1.932}$$

## Продолжение приложения В



$$\frac{\left(1 + \left(\frac{2.12808634720563}{x^{0.669803103778825}} - 0.163919657385371 x^{0.932}\right)^2\right)^{1.5}}{\frac{1.42539884046768}{x^{1.66980310377882}} - \frac{0.152773120683165}{x^{0.068}}}$$

$3.89932663828756$   
 $x1 := 3.643096409$   
 $y1 := 8.84540554742665$   
 $xc := 4.923815371$   
 $yc := 5.168043050$

$$\begin{cases} 6.44490112281426 x^{0.330196896221175} - 0.0848445431601297 x^{1.932} & x < 3.643096409 \\ 5.168043050 + \sqrt{15.163236 - (x - 4.923815371)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

```

>koef:=1.2:
f_real:=x->koef*f(x);
f_real(x);
x1_real:=xx[100];y1_real:=f_real(x1_real);

RO_r:=x->-(1+koef^2*pr1(x)^2)^1.5/koef/pr2(x):

R_real:=1*RO_r(x1);
diff(f_real(x),x):
TG_real:=unapply(%,x):
re_real:=solve({y1_real=yc_real+sqrt(R_real^2-(x1_real-
xc_real)^2),(xc_real-x1_real)/sqrt(R_real^2-(x1_real-
xc_real)^2)=TG_real(x1_real)},{xc_real,yc_real}):
xc_real:=subs(re_real,xc_real);
yc_real:=subs(re_real,yc_real);
f1_real:=x->yc_real+sqrt(R_real^2-(x-xc_real)^2):
f1_real(x);
tr_real:=x->piecewise(x<x1_real,f_real(x),f1_real(x)):
tr_real(x);
plot(tr_real(x),x=0..xc_real,thickness=2);
gra2:=plot(tr_real(x),x=0..5.5,thickness=2,color=red):

```

## Продолжение приложения В

```

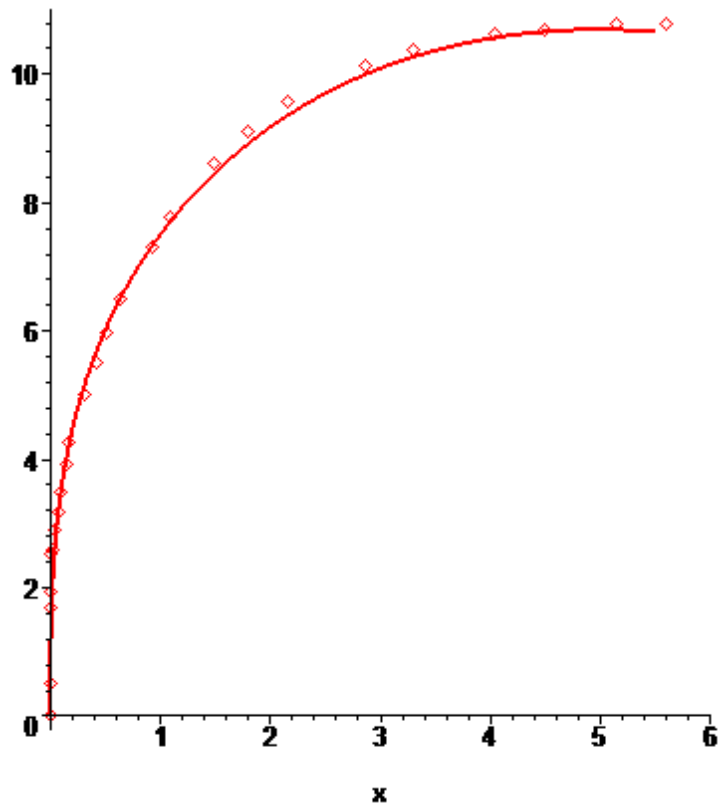
f_real := x → koef f(x)
7.60498332492082 x0.330196896221175 - 0.100116560928953 x1.932
x1_real := 3.643096409
y1_real := 10.4375785459634
R_real := 3.51713023207901
xc_real := 4.980004041
yc_real := 7.184444203
7.184444203 + √(12.3702050694041 - (x - 4.980004041)2)
{ 7.60498332492082 x0.330196896221175 - 0.100116560928953 x1.932      x < 3.643096409
  7.184444203 + √(12.3702050694041 - (x - 4.980004041)2)      otherwise

```

```

>
X_eks:=[5.604,5.14,4.485,4.033,3.3,2.857,2.159,1.797,1.48,1.09,0.926,0
.637,0.517,0.417,0.305,0.158,0.14,0.101,0.071,0.045,0.017,0.012,0.008,
0.005,0.003,0]:
Y_eks:=[10.8,10.78,10.71,10.63,10.38,10.13,9.58,9.108,8.62,7.766,7.321
,6.51,5.964,5.5,5,4.256,3.914,3.478,3.191,2.89,2.58,2.513,1.924,1.69,0
.516,0]:
pp:=(X_eks,Y_eks)->[X_eks,Y_eks]:
aa_eks:=zip(pp,X_eks,Y_eks,2):
gra3:=plot(aa_eks,x=0..6,style=point,symbolsize=15,thickness=2, col-
or=red):
display(gra2,gra3);

```



## Приложение Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022667725

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022667725

**Программа определения коэффициента бокового отклонения колесного трактора от заданной криволинейной траектории движения.**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (RU)**

Авторы: **Беляев Александр Николаевич (RU), Шацкий Владимир Павлович (RU), Тришина Татьяна Владимировна (RU), Новиков Алексей Евгеньевич (RU)**

Заявка № 2022666603

Дата поступления 07 сентября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 сентября 2022 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



## Продолжение приложения Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2022667725

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): <a href="#">2022667725</a> Дата регистрации: 23.09.2022 Номер и дата поступления заявки: 2022666603 07.09.2022 Дата публикации: <a href="#">23.09.2022</a>	Авторы: <b>Беляев Александр Николаевич (RU),</b> <b>Шацкий Владимир Павлович (RU),</b> <b>Тришина Татьяна Владимировна (RU),</b> <b>Новиков Алексей Евгеньевич (RU)</b> Правообладатель: <b>Федеральное государственное бюджетное</b> <b>образовательное учреждение высшего образования</b> <b>« Воронежский государственный аграрный</b> <b>университет имени императора Петра I» (RU)</b>
--	--

Название программы для ЭВМ:

**Программа определения коэффициента бокового отклонения колесного трактора от заданной криволинейной траектории движения.**

**Реферат:**

Программа позволяет получить графические изображения траекторий движения кинематического центра колесного трактора и определить коэффициент бокового отклонения машинно-тракторного агрегата на его базе от требуемой траектории при криволинейном движении с различными вариантами упругих связей между навесным орудием и трактором в зависимости от изменения поступательной скорости движения трактора и угловой скорости поворота управляемых колес сравнением теоретической и действительных траекторий его кинематического центра, заданных двумерными массивами декартовых координат и аппроксимируемых нелинейной функцией параметрического вида. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК на базе процессоров Intel или AMD. ОС: Windows 7.1-10.

**Язык программирования:** Maple

**Объем программы для ЭВМ:** 80 КБ

## Продолжение приложения Г

Программа определения коэффициента бокового отклонения колесного трактора от заданной криволинейной траектории движения

```

> restart:with(Statistics):with(plots):
vn_fun:=t1->-1/L/om*log(cos(om*t1)):
xx:=t->V*int(sin(V*vn_fun(t1)),t1=0..t):
yy:=t->V*int(cos(V*vn_fun(t1)),t1=0..t):
xx(t):
yy(t):
diff(xx(t),t):
prlx:=unapply(%,t):
diff(yy(t),t):
prly:=unapply(%,t):
diff(xx(t),t,t):
pr2x:=unapply(%,t):
diff(yy(t),t,t):
pr2y:=unapply(%,t):
PR:=t->prly(t)/prlx(t):
RO:=t->-(prlx(t)^2+prly(t)^2)^1.5/(pr2y(t)*prlx(t)-pr2x(t)*prly(t)):
r:=RO(t):
r assuming(V>0):
simplify(%):
RO:=unapply(%,t):
RO(t):
V:=2.556:
om:=.155:
L:=2.78:
T:=.62/om;
RO(T);
PR(T);
xc:=xx(T)+RO(T)*PR(T)/sqrt(1+PR(T)^2) ;yc:=yy(T)-
RO(T)*1/sqrt(1+PR(T)^2);
xok:=t->xc-RO(T)*cos(t):
yok:=t->yc+RO(T)*sin(t):
T1:=arccos((xc-xx(T))/RO(T));
evalf(cot(T1));
gr1:=plot([[xx(t),yy(t),t=0..T],[xok(t),yok(t),t=T1..Pi/2]],labels=[`К
оордината x, м`, `Координата y,
м`],labeldirections=[HORIZONTAL,VERTICAL],font=[TIMES,ROMAN,14],axes=b
oxed,style=[line,line],linestyle=1,thickness=2,color=[black,red]):
      T := 4.000000000
      3.894053688
      0.3641021327
      xc := 4.975367368
      yc := 5.196758794
      T1 := 1.221614012
      0.3641021328
>
X_eks:=[5.604,5.14,4.485,4.033,3.3,2.857,2.159,1.797,1.48,1.09,0.926,0
.637,0.517,0.417,0.305,0.158,0.14,0.101,0.071,0.045,0.017,0.012,0.008,
0.005,0.003,0]:

```

## Продолжение приложения Г

```

Y_eks:=[10.8,10.78,10.71,10.63,10.38,10.13,9.58,9.108,8.62,7.766,7.321
,6.51,5.964,5.5,5,4.256,3.914,3.478,3.191,2.89,2.58,2.513,1.924,1.69,0
.516,0]:
pp:=(X_eks,Y_eks)->[X_eks,Y_eks]:
aa_eks:=zip(pp,X_eks,Y_eks,2):
xk_real:=5.604:
gr2:=plot(aa_eks,x=0..xk_real,style=point,symbolsize=15,thickness=2,
color=red):

>k_real:=1.2:
yy:=t->V*int(cos(V*vn_fun(t1)),t1=0..t)*k_real:
xx(t):
yy(t):
diff(xx(t),t):
prlx:=unapply(%,t):
diff(yy(t),t):
prly:=unapply(%,t):
diff(xx(t),t,t):
pr2x:=unapply(%,t):
diff(yy(t),t,t):
pr2y:=unapply(%,t):
PR:=t->prly(t)/prlx(t):

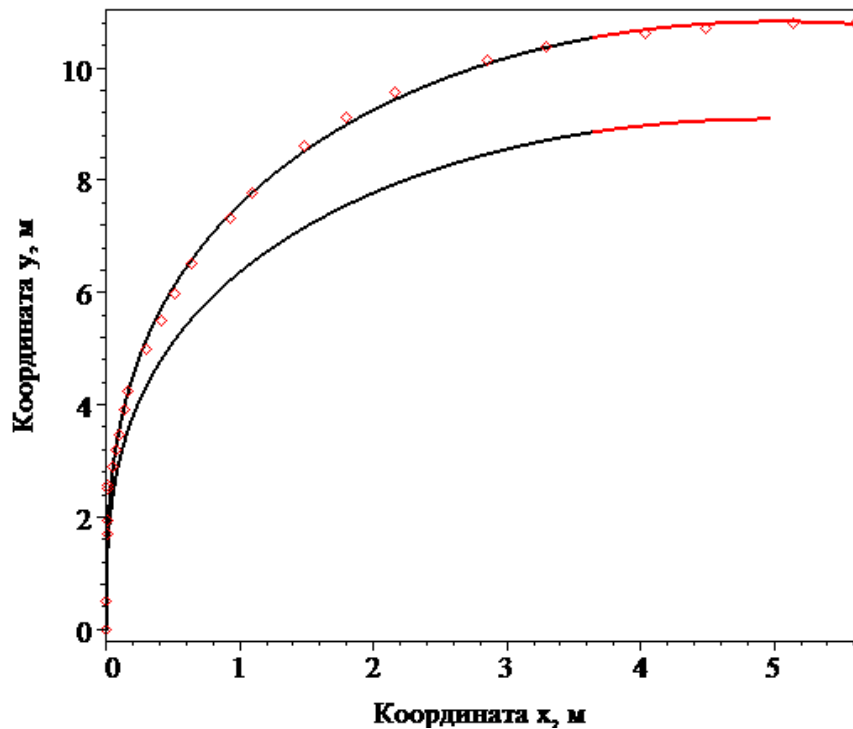
RO:=t->-(prlx(t)^2+prly(t)^2)^1.5/(pr2y(t)*prlx(t)-pr2x(t)*prly(t)):
r:=RO(t):
r assuming(V>0):
simplify(%):
RO:=unapply(%,t):
RO(t):
RO(T);
PR(T);
xc:=xx(T)+RO(T)*PR(T)/sqrt(1+PR(T)^2) ;yc:=yy(T)-
RO(T)*1/sqrt(1+PR(T)^2);

xok:=t->xc-RO(T)*cos(t):
yok:=t->yc+RO(T)*sin(t):
T1:=arccos((xc-xx(T))/RO(T));
evalf(cot(T1));
TK:=arccos((xc-xk_real)/RO(T));
gr3:=plot([[xx(t),yy(t),t=0..T],[xok(t),yok(t),t=T1..TK]],labels=[`Коо
рдината x, м`, `Координата y,
м`],labeldirections=[HORIZONTAL,VERTICAL],font=[TIMES,ROMAN,14],axes=b
oxed,style=[line,line],linestyle=1,thickness=2,color=[black,red]):
display(gr1,gr2,gr3);

>
3.514271889
0.4332815366
xc := 5.040256430
yc := 7.313821558
T1 := 1.161932107
0.4332815363
TK := 1.731907885

```

## Продолжение приложения Г



```

>
X_dempf_eks:=[5.105,4.707,4.32,3.976,3.59,3.24,2.91,2.57,2.31,1.99,1.6
6,1.26,1.019,0.86,0.69,0.56,0.44,0.33,0.18,0.16,0.14,0.127,0.11,0.08,0
.063,0.037,0.019,0.005,0]:
Y_dempf_eks:=[9.98,9.96,9.92,9.86,9.76,9.64,9.47,9.28,9.06,8.82,8.37,7
.75,7.14,6.73,6.28,5.82,5.3,4.79,4.36,3.88,3.64,3.49,3.309,2.99,2.8,2.
51,2.28,1.5,0]:
xk_dempf:=5.105:
pp_dempf_eks:=(X_dempf_eks,Y_dempf_eks)->[X_dempf_eks,Y_dempf_eks]:
aa_dempf_eks:=zip(pp_dempf_eks,X_dempf_eks,Y_dempf_eks,2):
gr4:=plot(aa_dempf_eks,x=0..xk_dempf,style=point,symbolsize=15, col-
or=black):

>k_dempf:=1.12:
yy:=t->V*int(cos(V*vn_fun(t1)),t1=0..t)*k_dempf:
xx(t):
yy(t):
diff(xx(t),t):
pr1x:=unapply(%,t):
diff(yy(t),t):
pr1y:=unapply(%,t):
diff(xx(t),t,t):
pr2x:=unapply(%,t):
diff(yy(t),t,t):
pr2y:=unapply(%,t):
PR:=t->pr1y(t)/pr1x(t):

RO:=t->-(pr1x(t)^2+pr1y(t)^2)^1.5/(pr2y(t)*pr1x(t)-pr2x(t)*pr1y(t)):
r:=RO(t):
r assuming(V>0):
simplify(%):

```



## Продолжение приложения Г

```

RO:=unapply(%,t):
RO(t):
RO(T);
PR(T);
xc:=xx(T)+RO(T)*PR(T)/sqrt(1+PR(T)^2) ;yc:=yy(T)-
RO(T)*1/sqrt(1+PR(T)^2);

xok:=t->xc-RO(T)*cos(t):
yok:=t->yc+RO(T)*sin(t):
T1:=arccos((xc-xx(T))/RO(T));
evalf(cot(T1));
TK_dempf:=arccos((xc-xk_dempf)/RO(T));
gr5:=plot([[xx(t),yy(t),t=0..T],[xok(t),yok(t),t=T1..TK_dempf]],labels
=[`Координата x, м`, `Координата y,
м`],labeldirections=[HORIZONTAL,VERTICAL],font=[TIMES,ROMAN,14],axes=b
oxed,style=[line,line],linestyle=1,thickness=2,color=[black,red]):
display(gr1,gr2,gr3,gr4,gr5);
print(`реальный`,k_real);
print(`демпферный`,k_dempf);

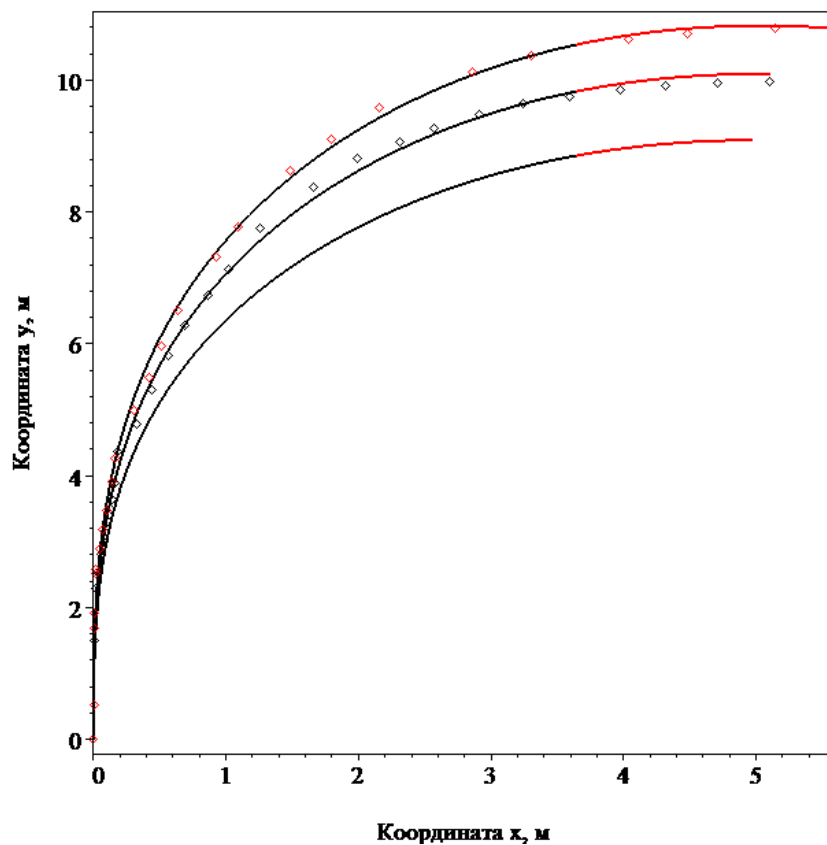
```

3.652087105

0.4041533661

 $xc := 5.011562396$  $yc := 6.443950406$  $T1 := 1.186714598$ 

0.4041533655

 $TK\_dempf := 1.596383833$ 

## Приложение Д

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022667064

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022667064

**Программа расчета и построения действительной траектории поворота колесного трактора.**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (RU)*

Авторы: *Беляев Александр Николаевич (RU), Шацкий Владимир Павлович (RU), Тришина Татьяна Владимировна (RU), Новиков Алексей Евгеньевич (RU)*



Заявка № 2022666519

Дата поступления 07 сентября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 сентября 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 68b80077c14c4903a94edbd24145d5c7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*

## Продолжение приложения Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2022667064

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): <a href="#">2022667064</a>	Авторы: <b>Беляев Александр Николаевич (RU),</b> <b>Шацкий Владимир Павлович (RU),</b> <b>Тришина Татьяна Владимировна (RU),</b> <b>Новиков Алексей Евгеньевич (RU)</b>
Дата регистрации: <b>14.09.2022</b>	Правообладатель: <b>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования « Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (RU)</b>
Номер и дата поступления заявки: <b>2022666519 07.09.2022</b>	
Дата публикации: <a href="#">14.09.2022</a>	

Название программы для ЭВМ:

**Программа расчета и построения действительной траектории поворота колесного трактора.**

**Реферат:**

Программа позволяет провести расчет и построить действительные траектории движения кинематического центра машинно-тракторного агрегата на базе колесного трактора при повороте с различными вариантами упругих связей между навесным орудием и трактором путем изменения положения теоретической траектории участка входа в поворот в виде функции явного вида, полученной из параметрических заданных функций декартовых координат точек траекторий кинематического центра трактора нелинейной аппроксимацией кусочно-гладкой функцией, путем умножением ее на коэффициент сдвига, зависящий от конструктивных и эксплуатационных характеристик, и склейкой с участком установившегося поворота в виде окружности постоянного радиуса. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК; ОС: Windows 7.1 - 10.

**Язык программирования:** Maple

**Объем программы для ЭВМ:** 80 КБ

## Продолжение приложения Д

Программа расчета и построения действительной траектории поворота  
колесного трактора

```

>restart:with(Statistics):with(plots):
V:=1.86:
om:=.31:
L:=2.78:
T:=.62/om;

r:=int(tan(om*z)/L,z=0..t1,'AllSolutions'):
r assuming(t1>0,t1<10):
vn_fun:=unapply(%,t1):
vn_fun(t1):
for i from 0 to 100 do
tt[i]:=i*T/100:
xx[i]:=V*int(sin(V*vn_fun(t1)),t1=0..tt[i],numeric):
yy[i]:=V*int(cos(V*vn_fun(t1)),t1=0..tt[i],numeric):
od:

X:=[seq(xx[i],i=0..100)]:
Y:=[seq(yy[i],i=0..100)]:
pp:=(X,Y)->[X,Y]:
aa:=zip(pp,X,Y,2):
a:=NonlinearFit(c2*x^c1+c3*x^1.5, X, Y, x):
f:=unapply(a,x);
plot([aa,f(x)], x=0..xx[100],
style=[point,line],symbolsize=15,thickness=2, color=black);

diff(f(x),x):
pr1:=unapply(%,x):
diff(f(x),x,x):
pr2:=unapply(%,x):
RO:=x->-(1+pr1(x)^2)^1.5/pr2(x):
RO(x);
RO(xx[100]);
#=====
====:
x1:=xx[100];y1:=f(x1);
R:=3.894:
diff(f(x),x):
TG:=unapply(%,x):
re:=solve({y1=yc+sqrt(R^2-(x1-xc)^2),(xc-x1)/sqrt(R^2-(x1-
xc)^2)=TG(x1)},{xc,yc}):
xc:=subs(re,xc);
yc:=subs(re,yc);
f1:=x->yc+sqrt(R^2-(x-xc)^2):
f1(x);
tr:=x->piecewise(x<x1,f(x),f1(x)):
tr(x);
plot(tr(x),x=0..xc,thickness=2);
gral:=plot(tr(x),x=0..xc,thickness=2,color=green):

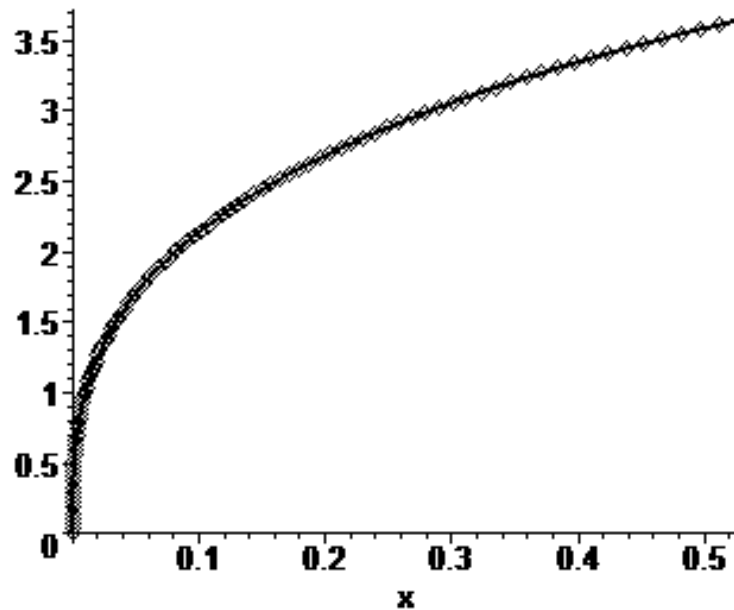
```

$$T := 2.000000000$$

$$f := x \rightarrow 4.62456630377705 x^{0.332663389467553} - 0.235601509588198 x^{1.5}$$



## Продолжение приложения Д



$$\frac{\left(1 + \left(\frac{1.53842390143191}{x^{0.667336610532447}} - 0.353402264382298 x^{0.5}\right)^2\right)^{1.5}}{\frac{1.02664659194367}{x^{1.66733661053245}} - \frac{0.176701132191149}{x^{0.5}}}$$

$3.90199196752024$   
 $x1 := 0.5283737333$   
 $y1 := 3.64978863154541$   
 $xc := 4.043489010$   
 $yc := 1.974318373$

$$\begin{cases} 4.62456630377705 x^{0.332663389467553} - 0.235601509588198 x^{1.5} & x < 0.5283737333 \\ 1.974318373 + \sqrt{15.163236 - (x - 4.043489010)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

```
> koef:=1.2:
```

```
f_real:=x->koef*f(x);
```

```
x1_real:=xx[100];y1_real:=f_real(x1_real);
```

```
RO_r:=x->-(1+koef^2*pr1(x)^2)^1.5/koef/pr2(x):
```

```
R_real:=1*RO_r(x1);
```

```
diff(f_real(x),x):
```

```
TG_real:=unapply(%,x):
```

```
re_real:=solve({y1_real=yc_real+sqrt(R_real^2-(x1_real-  
xc_real)^2),(xc_real-x1_real)/sqrt(R_real^2-(x1_real-  
xc_real)^2)=TG_real(x1_real)},{xc_real,yc_real}):
```

```
xc_real:=subs(re_real,xc_real);
```

```
yc_real:=subs(re_real,yc_real);
```

```
f1_real:=x->yc_real+sqrt(R_real^2-(x-xc_real)^2):
```

```
f1_real(x);
```

```
tr_real:=x->piecewise(x<x1_real,f_real(x),f1_real(x)):
```

## Продолжение приложения Д

```
tr_real(x);
plot(tr_real(x),x=0..xc_real,thickness=2);
gra2:=plot(tr_real(x),x=0..xc_real,thickness=2,color=red):
```

$$f\_real := x \rightarrow koef f(x)$$

$$x1\_real := 0.5283737333$$

$$y1\_real := 4.56223578943176$$

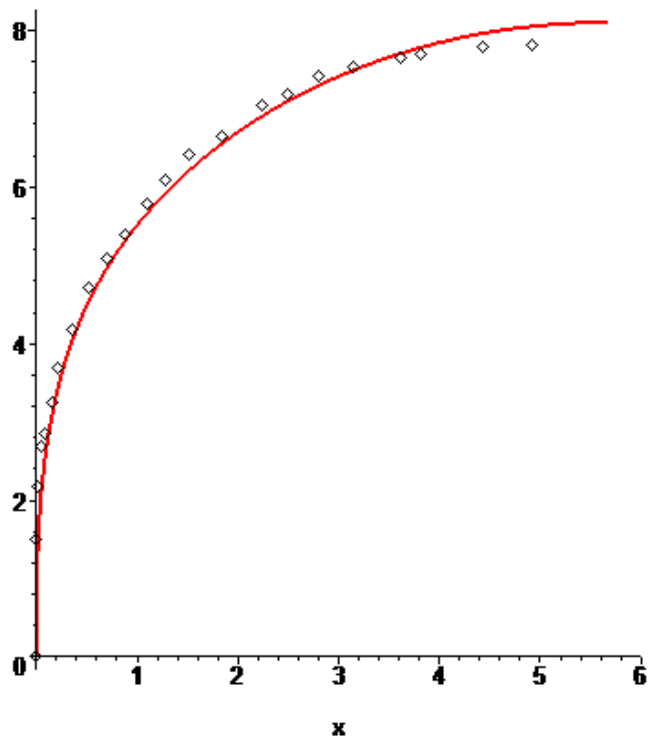
$$R\_real := 5.49762255254502$$

$$xc\_real := 5.665209769$$

$$yc\_real := 2.603468506$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 2.603468506 + \sqrt{30.2238537302516 - (x - 5.665209769)^2} & x < 0.5283737333 \\ 5.78070787972131 x^{0.332663389467553} - 0.294501886985248 x^{1.5} & \text{otherwise} \\ 2.603468506 + \sqrt{30.2238537302516 - (x - 5.665209769)^2} & \end{array} \right.$$

```
>
X_eks:=[4.923,4.423,3.822,3.62,3.137,2.806,2.501,2.236,1.842,1.512,1.2
76,1.091,0.884,0.707,0.512,0.354,0.221,0.163,0.078,0.05,0.004,.002,0]:
Y_eks:=[7.806,7.789,7.698,7.656,7.523,7.409,7.188,7.035,6.657,6.416,6.
091,5.789,5.389,5.096,4.711,4.178,3.698,3.236,2.855,2.683,2.165,1.5,0]
:
pp:=(X_eks,Y_eks)->[X_eks,Y_eks]:
aa_eks:=zip(pp,X_eks,Y_eks,2):
gra3:=plot(aa_eks,x=0..6,style=point,symbolsize=15, color=black):
display(gra2,gra3);
```



```
> koef_dempf:=1.12:
f_dempf:=x->koef_dempf*f(x);
x1_dempf:=xx[100];y1_dempf:=f_dempf(x1_dempf);
```

## Продолжение приложения Д

```

RO_dem:=x->-(1+koef_dempf^2*pr1(x)^2)^1.5/koef_dempf/pr2(x):

R_dempf:=1*RO_dem(x1);

diff(f_dempf(x),x):
TG_dempf:=unapply(%,x):
re_dempf:=solve({y1_dempf=yc_dempf+sqrt(R_dempf^2-(x1_dempf-
xc_dempf)^2),(xc_dempf-x1_dempf)/sqrt(R_dempf^2-(x1_dempf-
xc_dempf)^2)=TG_dempf(x1_dempf)},{xc_dempf,yc_dempf}):
xc_dempf:=subs(re_dempf,xc_dempf);
yc_dempf:=subs(re_dempf,yc_dempf);
f1_dempf:=x->yc_dempf+sqrt(R_dempf^2-(x-xc_dempf)^2):
f1_dempf(x);
tr_dempf:=x->piecewise(x<x1_dempf,f_dempf(x),f1_dempf(x)):
tr_dempf(x);
plot(tr_dempf(x),x=0..xc_dempf,thickness=2);

gra4:=plot(tr_dempf(x),x=0..xc_dempf,thickness=2, color=black):

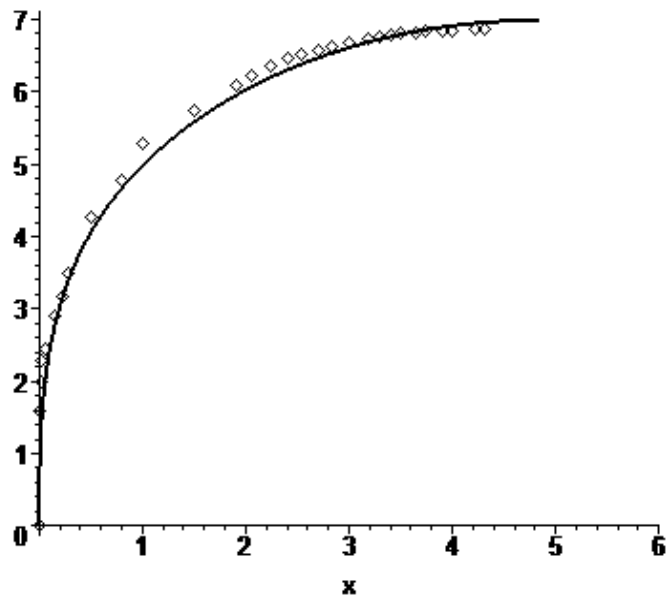
#display(gra1,gra3,gra4);

          f_dempf := x → koef_dempf f(x)
          x1_dempf := 0.5283737333
          y1_dempf := 4.12426115364631
          R_dempf := 4.68544335224162
          xc_dempf := 4.845471050
          yc_dempf := 2.303258636
          2.303258636 + √(21.9533794070652 - (x - 4.845471050)²)
          { 5.22575992326807 x0.332663389467553 - 0.266229705834664 x1.5      x < 0.5283737333
            2.303258636 + √(21.9533794070652 - (x - 4.845471050)²)      otherwise

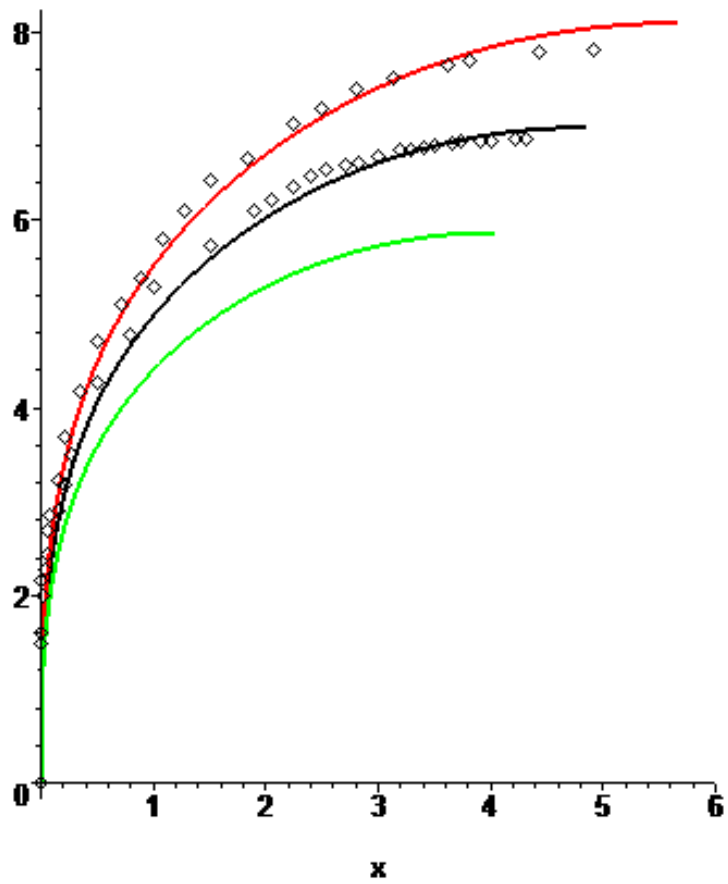
>
X_dempf_eks:=[4.31,4.22,4,3.91,3.74,3.65,3.5,3.4,3.29,3.19,3,2.83,2.71
,2.54,2.4,2.25,2.06,1.9,1.51,1,0.8,0.51,0.28,0.22,0.16,0.06,0.03,0.015
,0.001,0]:
Y_dempf_eks:=[6.86,6.86,6.85,6.85,6.84,6.82,6.8,6.78,6.76,6.74,6.68,6.
62,6.58,6.53,6.46,6.35,6.22,6.1,5.73,5.29,4.77,4.26,3.5,3.17,2.9,2.45,
2.28,2,1.6,0]:
pp_dempf_eks:=(X_dempf_eks,Y_dempf_eks)->[X_dempf_eks,Y_dempf_eks]:
aa_dempf_eks:=zip(pp_dempf_eks,X_dempf_eks,Y_dempf_eks,2):
gra5:=plot(aa_dempf_eks,x=0..6,style=point,symbolsize=15, col-
or=black):
#plot(aa_dempf_eks,x=0..6,style=point,symbolsize=15, color=red);
display(gra4,gra5);

```

## Продолжение приложения Д



```
> display(gra1,gra2,gra3,gra4,gra5);
```



```
>
```



## Приложение Е

<p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Врио проректора по научной работе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» д.э.н., профессор</p> <p> Л.А. Запорожцева</p> 	<p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Врио директора ФГБНУ «Всероссийский научно- исследовательский институт защиты растений» д.т.н., доцент</p> <p> В.А. Гулевский</p> 
--	--

АКТ

**передачи и внедрения результатов исследования**

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» получены материалы исследований по установке и настройке навигационной системы Starfire 3000 и системы автоматизированного рулевого управления AutoTrac Universal 300 на тракторе Беларус – 1221.2, проведенных на кафедре прикладной механики агроинженерного факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» аспирантами Новиковым А.Е. и Дьяченко Ю.В.

Материалы содержат:

1. Опытные образцы и техническую документацию конструкции крепления компонентов системы (переходная втулка, кронштейн крепления), включающая в том числе чертежи для их изготовления.
2. Схему подключения навигационной системы к электронной сети трактора.
3. Трактор Беларус – 1221.2 с установленной на нем навигационной системой Starfire 3000 и системой автоматизированного рулевого управления AutoTrac Universal 300.

В результате проведения полевых испытаний была доказана работоспособность и эффективность использования данных систем.

Все переданные материалы исследований представляют значительное практическое значение.

## Продолжение приложения Е

Особый интерес для ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» в современных условиях цифровизации и автоматизации, а также необходимости оптимизации расходов на производство представляет возможность применения технологий точного земледелия на наиболее распространённой и доступной сельскохозяйственной технике, что позволит оптимально использовать ресурсы для выполнения агротехнологических операций.

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории механизации  
защиты растений  
ФГБНУ «ВНИИЗР» д.т.н.



В.А. Вялых

Зав. кафедрой прикладной механики  
д.т.н., доцент



А.Н. Беляев

Декан агроинженерного факультета  
д.с.-х.н., профессор



В.И. Орбинский

Аспирант кафедры прикладной  
механики



А.Е. Новиков

Аспирант кафедры прикладной  
механики



Ю.В. Дьяченко

## Приложение Ж

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный аграрный  
университет имени императора  
Петра I», д.т.н., профессор  
Л.А. Запорожцева



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ООО НПКФ «Агротех-  
Гарант Березовский»



В.И. Кичигин

## АКТ

## передачи и внедрения результатов исследования

ООО НПКФ «Агротех-Гарант Березовский» получены материалы исследований по улучшению поворачиваемости трактора за счет модернизации навесной системы, проведенные на кафедре прикладной механики агроинженерного факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» аспирантом Новиковым Алексеем Евгеньевичем (руководитель заведующий кафедрой прикладной механики, д.т.н. Беляев Александр Николаевич) и представленные им в подготовленной к защите диссертационной работе.

Материалы содержат:

- результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию применения упругих элементов в навесной системе трактора;
- опытные образцы модернизированной охватываемой рамки навесной системы трактора.

Все переданные материалы исследований представляют несомненный практический интерес. Машинно-тракторные агрегаты с опытной навесной системой показали свою эффективность при вспашке, посеве, сплошной и междурядной обработке почвы, заключающуюся в повышении плавности

## Продолжение приложения Ж

хода и улучшении управляемости, а также в снижении погектарного расхода топлива.

Директор ФГБНУ  
ООО НПКФ «Агротех-Гарант  
Березовский»



---

В.И. Кичигин

Зав. кафедрой прикладной механики  
д.т.н., доцент



---

А.Н. Беляев

Декан агроинженерного факультета  
д.с.-х.н., профессор



---

В.И. Орбинский

Аспирант кафедры прикладной  
механики




---

А.Е. Новиков



## Приложение 3

РЕКОМЕНДОВАНО  
Учебно-методической комиссией  
агроинженерного факультета  
ФГОУ ВО Воронежский ГАУ  
Протокол № 3 от 23.11.2023 г.  
Председатель  Костиков О.М.

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ  
 Держакова Н.М.



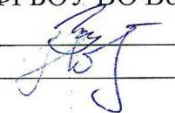
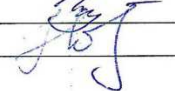
## АКТ



## о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс

Комиссия в составе представителей кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей (профессора Баскакова И.В., доцента Чернышова А.В.), кафедры прикладной механики (заведующего кафедрой Беляева А.Н., ассистента Новикова А.Е.) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ), и председателя учебно-методической комиссии ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ Костикова О.М. составила настоящий акт о том, что результаты научных исследований по теме «Улучшение поворачиваемости машинно-тракторного агрегата за счет совершенствования задней навесной системы», выполненных на кафедре прикладной механики ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ ассистентом Новиковым А.Е. под руководством д.т.н, доцента Беляева А.Н., внедрены в учебный процесс кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ.

Результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке студентов, обучающихся по направлениям 35.03.06 Агроинженерия, направленность (профиль) «Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт машин», 35.04.06 Агроинженерия, направленность (профиль) «Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве». Результаты научных исследований используются при выполнении лабораторных работ, выпускных квалификационных работ.

Использование представленных результатов научных исследований в учебном процессе способствует повышению качества образования и совершенствованию профессиональной подготовки обучающихся.

Представители  
кафедры прикладной механики  
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ  
 Беляев А.Н.  
 Новиков А.Е.

Представители  
кафедры сельскохозяйственных  
машин, тракторов и автомобилей  
ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ  
 Баскаков И.В.  
 Чернышов А.В.