

ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Тарасова

Сария Валеевна

**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА КУРСОВОЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ КОЛЁСНОГО ТРАКТОРА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ НА НАКЛОННОЙ
ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор
технических наук, профессор
Ю.А.УШАКОВ

Оренбург – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ КУРСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕСНЫХ МАШИН ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В УСЛОВИЯХ СКЛОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ.....	8
1.1 Современные тенденции развития технологичности мобильных энергетических средств в аграрном промышленном комплексе.....	8
1.2 Ландшафтная специфика земельных угодий в аграрном секторе Оренбургской области.....	20
1.3 Пути реализации курсовой устойчивости колёсных машин на негоризонтальных опорных поверхностях.....	24
1.3.1 Способы стабилизации траекториальной устойчивости.....	24
1.3.2 Анализ средств и технических решений вопросов устойчивости движения колесных тракторов.....	31
1.4 Исследование направлений теоретического анализа динамики транспортных средств на негоризонтальной опорной поверхности.....	46
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ КОЛЁСНОЙ МАШИНЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОРИДОРЕ.....	55
2.1 Методика определения величины поперечного смещения колёсного трактора на наклонной опорной поверхности.....	55
2.2 Методика теоретического исследования влияния углов бокового увода на поперечное смещение движущейся колёсной машины на негоризонтальном участке пути.....	62
2.3 Анализ оценки энергетической составляющей процесса стабилизации курсового движения машины на склоне.....	73
3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К РЕЖИМУ ВАРЬИРОВАНИЯ УГЛОВ УВОДА ШИН.....	81

3.1	Принцип функционального алгоритмирования оценки износа элементов протектора шин при планировании машинного эксперимента.....	81
3.2	Разработка программно-аналитического обеспечения исследования процесса интенсивности изнашивания протектора шин.....	94
4	МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	98
4.1	Специфика алгоритмирования теоретических исследований метода курсовой стабилизации.....	98
4.2	Методика проведения полного факторного эксперимента.....	102
4.2.1	Инженерно-техническое обеспечение эксперимента.....	102
4.2.2	Разработка экспериментальной модели исследуемого процесса.....	105
4.3	Методика производственного эксперимента.....	109
4.3.1	Определение режимных параметров и условий проведения эксперимента.....	109
4.3.2	Проведение производственных испытаний.....	115
5	ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СПОСОБА КУРСОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО НАКЛОННОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	123
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	128
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение современных мобильных энергетических средств требует решения крупных проблемных и перспективных вопросов теории тракторостроения и развития инновационных направлений, способствующих повышению уровня научно-технического прогресса в аграрном промышленном комплексе (АПК).

Отмечая значительные достижения в разработке экспериментально-теоретических вопросов энерговооруженности машинно-тракторного парка (МТП), следует указать на то, что они не в полной мере удовлетворяют современным запросам сельскохозяйственного производства. Особенно ярко проблемы механизации технологических процессов в АПК проявляются в сфере склонного земледелия, удельный вес которого в общеотраслевом масштабе Оренбургской области составляет 36,3% . По уровню механизации технологических процессов склонное земледелие отстает от инженерно-технического обеспечения, реализуемого в условиях равнинного землепользования. Специфика условий склонного земледелия предполагает его значительные технологические отличия от равнинного по агротехнике, методам управления мобильными энергетическими средствами (МЭС) и по способам обеспечения его курсовой устойчивости [22;85].

В связи со сложностями финансирования проектно-изыскательских работ и научно-технических исследований, направленных на создание высокотехнологичных специализированных машин, производители вынуждены использовать равнинные тракторы для выполнения технологических операций на склонах и других сложных конфигуративных опорных поверхностях. Это является экономически нецелесообразным и малоэффективным, поскольку приводит к грубейшим нарушениям требований безопасности, снижению производительности и качества выполняемых работ, ухудшению стабильности устойчивого движения и физического состояния оператора.

В настоящее время усилия инженеров-конструкторов ведущих научно-исследовательских и проектных организаций направлены на модернизацию суще-

ствующих конструкций машин, внедрение их в производство и широкое применение в сельскохозяйственной сфере. Комплексное усовершенствование МЭС, работающих на склонах, не может быть реализовано без стабилизации траекториального движения, уменьшения сползания трактора и увода агрегата за пределы защитных зон, улучшения тяговых сцепных показателей и обоснования инновационных методов курсовой устойчивости эксплуатируемых колесных машин. Создание системы тракторов по принципу улучшения деталей, узлов и агрегатов ходовой части, обладающих высокими динамическими и экономическими качествами, является важным условием для обеспечения развития механизации всех процессов, выполняемых на склонах. Однако внесение конструктивных изменений в серийный образец приводит к сложностям формирования процедурной модели процесса инновационирования и влечет за собой дополнительные материальные затраты в связи с чем наиболее целесообразной на сегодняшний день является локальная модернизация серийных машин в рамках производственных мощностей хозяйств-собственников. По мнению многих ведущих специалистов, занимающихся вопросами модернизации технических систем в АПК, такой подход является в достаточной степени целесообразным как с экономической, так с технологической точки зрения [53;80;93;97;117].

Речь идет о наиболее значимом вопросе в сфере инновационирования технологии и средств механизации и строгого исполнения агротехнических требований, обеспечивающих высокие экономические показатели. Фактически на исследовательском уровне актуализируется **проблема обоснования режима движения колесных машин при реализации сельскохозяйственных операций на наклонных опорных поверхностях**. Настоящая постановка проблемы достоверна и является следствием результата анализа резерва технологичности, определяющего функциональный потенциал исследуемых мобильных энергетических систем и лежит в основе развития инженерно-технического обеспечения реального сектора экономики АПК.

Объект исследования. Процесс курсовой стабилизации колёсного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на наклонной опорной поверхности.

Предмет исследования. Закономерности, отражающие изменение курсовой устойчивости трактора от величин углов увода шин колёс при движении по наклонной опорной поверхности.

Научная новизна

– закономерности, отражающие влияние углов бокового увода шин на полное поперечное смещение колёсного трактора от технологической траектории при проведении механизированных работ в условиях склонного земледелия;

– методика оценки эффективности энергетических затрат процесса курсовой стабилизации движения колесного трактора на наклонной опорной поверхности;

– методика оценки интенсивности изнашивания элементов шин колесного трактора, эксплуатируемого в различных агроландшафтных условиях и при наличии крюковой нагрузки, для проведения математического эксперимента;

– результаты производственных исследований влияния углов увода шин колёсного трактора на курсовую устойчивость.

Практическая ценность

– предложены закономерности определения величины полного поперечного смещения машинно-тракторного агрегата (МТА) от технологической траектории на наклонной опорной поверхности;

– разработан коэффициент оценки эффективности внедрения предлагаемого способа курсовой стабилизации колёсного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на наклонной опорной поверхности;

– обосновано влияние углов увода на интенсивность изнашивания элементов шин колесного трактора при реализации сельскохозяйственных операций на наклонной опорной поверхности;

– разработано программно-аналитическое обеспечение исследования процесса интенсивности изнашивания протектора шин в условиях варьирования углов увода шин на наклонных опорных поверхностях.

1 Анализ проблемы реализации выполнения курсовой устойчивости колесных машин при выполнении технологических операций в условиях склонного земледелия

1.1 Современные тенденции развития технологичности мобильных энергетических средств в аграрном промышленном комплексе

Тенденция к стабилизации выхода сельского хозяйства из кризисного положения должна рассматриваться в аспекте развития как рыночных отношений в экономике, так и в плане инновационного становления технологической сферы и технического обеспечения АПК. Общеизвестно, что повышение эффективности функционирования сельскохозяйственного производства пропорционально уровню эксплуатационной технологичности машин и специального оборудования, которая является доминантой в технологических процессах отрасли и предполагает постоянную реновацию. Это позволит гарантировать реализацию агротехнических, эргономических, экологических и других эксплуатационных требований, предъявляемых к инженерно-технической системе в АПК. Однако, по данным государственного научного учреждения всероссийского научно-исследовательского института экономики сельского хозяйства, можно отметить отрицательную тенденцию, когда списание техники значительно опережает ее ввод [53;82;111].

На сегодняшний день страна приступила к реализации второй Государственной программы, которая рассчитана на 2013 – 2020 годы и задает путь прогнозируемого развития отраслей АПК с намеченными целями и задачами, объемами финансовой поддержки [111]. Для реализации эффективных методов ведения производства в соответствии с Федеральным законом «О развитии сельского хозяйства» правительством разработана соответствующая стратегия модернизации отрасли, где предусматривается перспектива развития системы инновационирования в технической сфере, обеспечивающая экологическую безопасность, кон-

троль и управление качеством работы средств механизации биоаграрных технологий, а также ресурсосберегающих технологических процессов [5;7;10;81;102].

Как показывает практика, существующие сельскохозяйственные отечественные машины пользуются меньшим спросом у сельхозпроизводителей, нежели зарубежные. Причиной этого является то, что они уступают зарубежным моделям по показателям надежности и условиям труда оператора, хотя они значительно дешевле и поэтому сохраняют конкурентоспособность на рынке России, СНГ и ряда развивающихся стран.

При этом российская сельскохозяйственная отрасль на сегодняшний день сохранила достаточно высокий научный потенциал, в связи с чем при условии оказания государственной поддержки способна обеспечить создание и освоение конкурентоспособной продукции, а также удовлетворить потребность АПК в основных видах техники.

Так, в соответствии с целевыми индикаторами подпрограммы «Техническая и технологическая модернизация, инновационное развитие» государственной программы «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия Оренбургской области» на 2013–2020 годы в 2014 году было предусмотрено приобретение сельскохозяйственными товаропроизводителями области всех форм собственности, включая ЛПХ, новой техники: 601 трактор, 300 зерноуборочных и 41 кормоуборочный комбайн. За 2014 год сельскохозяйственными товаропроизводителями области приобретено 330 тракторов, что составило 54,9% от планового показателя на год, 153 зерноуборочных (51%) и 33 кормоуборочных комбайна (80,5%) [82,104].

Как показывает агроинженерная практика, для научно-исследовательской и проектной сфер деятельности специалистов АПК развитие системы инновационирования в технической области, прежде всего, выражается прогнозированием динамики прогресса в технологиях и обоснования системы машин для их реализации.

В настоящее время в машиностроительной индустрии России рассматриваются целевые аспекты ряда направлений, лежащих в основе методов инженерного

обеспечения и их технической реализации в аграрном секторе. Ряд отечественных тракторостроительных фирм (Челябинский, Владимирский, Волгоградский, Онежский, Петербургский, Липецкий, Алтайский тракторные заводы), а также зарубежные ведущие фирмы машинопроизводителей (John Deere, Valtra, JCB, Kubota, New Holland, Caterpillar, Bell, Минский и Харьковский тракторные заводы) в первую очередь рассматривают возможность решения проблем, связанных с электронным и электрогидравлическим управлением механизмов трансмиссии и электронно-гидравлического регулирования положения навесных устройств.

Несмотря на то, что в инженерной практике наблюдается использование стандартных способов регулирования, методов настройки и управления динамическими системами, конструкторские исследования приобретают ярко выраженный физико-технический «дуализм». Прежде всего, регулирование положения исполнительного органа в заданной системе координат реализуется за счет колебаний сил сопротивления в зонах контакта движителя с опорной поверхностью, определяемой спецификой их геометрической конфигурации. Однако ряд исследователей склоняются к развитию инновационного направления, связанного с гашением колебаний мобильных технических систем при их эксплуатации в различных средах и ландшафтных условиях, обуславливающие комплекс факторного воздействия на эксплуатируемую систему [97]. Приоритетным в данном случае является создание методов и технических устройств для гашения (подавления) вибрационных процессов как векторного, так и стохастического характера.

Однако для развития и организации конструкторских работ по данным направлениям не обеспечен достаточный ресурс для проведения прикладных исследований в плане адаптации к созданию средств автоматизации (СА) для новых моделей тракторов, которые характеризуются двумя особенностями. Во-первых, для подтверждения современного технического уровня инженерного обеспечения АПК и в качестве рекламы как средства повышения ряда важных потребительских свойств наличие средств автоматизации, как на тракторах так и на другом специализированном оборудовании стало основным критерием их класса технологичности. Во-вторых, достаточно большой ассортимент СА, предусматрива-

ющий применение электронной, в основном микропроцессорной техники в качестве элементной базы логических устройств, спроектирован и внедрен в современные модели МЭС для оптимизации режимов работы механизмов и устройств, обеспечивающих реализацию внутри структурных функций технической системы, но не способствующих оптимизации режима её взаимодействия с биологической средой, в аспекте выполнения технологических операций и повышения биологической урожайности.

В целом, аналитическая оценка состояния биотехнического комплекса должна быть выражена рекомендациями как к универсальному, так и к эксклюзивному совершенствованию технического обеспечения развития биологических сред и объектов. Зачастую поиск целей дает завуалированное представление о значимости исследуемых факторов и как, следствие, их критериальной оценки, в связи с этим актуализируется вопрос поиска вариантов решений, направленных на ускорение уровня механизации и расширение сферы внедрения современных технологий в сельскохозяйственной отрасли.

Требования, предъявляемые к эксплуатационным качествам тракторов, непрерывно развиваются и дифференцируются в зависимости от назначения машин и условий их использования. В широком смысле, речь идет о разработке и исследовании методов повышения надёжности и эффективности функционирования производственных процессов, машинно-тракторных агрегатов и технологических комплексов. Устранение нежелательных явлений, сопровождающих технологический процесс, обусловленных природой объективных предпосылок, может быть достигнуто путём выбора рациональных значений параметров звеньев в заданной системе реализации предполагаемого процесса. Данное утверждение в современных условиях является формулой инновационирования при выборе направлений и методов развития сельскохозяйственного машиностроения, но вопрос целесообразности внедрения модернизированной техники в отраслевые технологические процессы остается открытым. В основу этого положения должна лечь система принципов достижения целей, определяющая достоверность подбора методов, средств и приемов, интеграция которых формализует алгоритм по-

знания сути и природы процессов при взаимодействии технических систем и агрофонов.

В соответствии с современными концепциями создания средств технического обеспечения сельскохозяйственного производства сложились как наиболее выраженные в теоретическом и практическом плане направления работы по созданию специализированных машин и оборудования для реализации оптимальных режимов и технологических процессов, которые не только отвечают агротехническим требованиям, но и учитывают аномальные условия окружающей среды.

В настоящее время широкое распространение получила научная практика, направленная на исследование вопросов, связанных с автоматическим контролем ресурса и энергосберегающих характеристик технических систем и регулированием доз энергоносителей для обеспечения оптимальных режимов функционирования эксплуатируемой системы. Причем исследования могут быть направлены на насыщение энергетического уровня как привода, так и исполнительных механизмов, снижающих энергозатраты, что особенно ярко выражено в сложносочлененных узлах современных конструкций автотракторной техники [89;117].

Наиболее ярким примером данного направления инновационного развития научно-технического прогресса (НТП) является оснащение тракторов двигателями с многоклапанным газораспределением, а также электронным регулированием подачи топлива в дизель, что позволяет улучшить энергетические показатели МЭС, повысить их топливную экономичность на частичных нагрузках и холостом ходу, снизить токсичность выхлопных газов.

В связи с большим разнообразием функций системы, отражающих различные представления потребителей о ее целесообразности и эффективности, на сегодняшний день создан целый комплекс электронных приборов, представляющих инновационный проект, направленный не только на контроль техногенеза, но и взаимодействия технической и биологической компоненты в условиях биоценоза для конкретных климатических сред.

В совокупности со специализированным программным продуктом подобный комплекс может обеспечить оператора информацией об объеме собранного

урожая, обработанной площади, широте и долготе местонахождения, для создания карты урожайности, определяющих комплекс мероприятий по обработки питательных грунтов. Кроме того, возможности подобных систем значительно расширяет информационный план в процессе мониторинга ежедневных затрат машины и считывания параметрических характеристик и режимов технологических процессов при производстве сельскохозяйственной продукции. Например, широко используется информация о длине срезки, содержании сухой массы и др.

Одно из направлений, которое развивают многие фирмы – производители сельскохозяйственной техники, связано с роботизацией и автоматизацией контроля систем стабилизации устойчивости при вождении МЭС, а также контроля механизма и устройств, реализующих стабилизационные режимы.

Например, электрогидравлическая система «Хедертрак» позволяет в точности копировать в автоматическом режиме рельеф поля. Это обеспечивает высокие показатели производительности машин при работе на полях с меняющимися продольными и поперечными уклонами. Также она помогает при работе в ночное время и во время уборки культур, которые полегли по различным причинам [89;117].

В связи с тем, что транспортная скорость современных тракторов увеличивается до 40,50 и даже 70 км/ч, увеличиваются также рабочие скорости, и это привело к появлению разнообразных видов подвесок. Современные мобильные машины достаточно эффективно работают при оборудовании их мостов независимыми подвесками пневматического, гидропневматического типа различного конструктивного исполнения, основанного на электронном контроле (Case IH, Deutz-Fahr, Valmet, Fendt, John Deere и др.). Данные конструкции позволяют уменьшить количество толчков и ударов во время движения трактора, улучшить тягово-сцепные свойства за счет постоянного контакта колес с почвой, уменьшить шум и вибрации на рабочем месте тракториста, что говорит о переходе проектно-конструкторских работ на более высокий уровень инновационирования в эргономике и дизайне [88;89;117].

Надо отметить, что в последние годы практически все разработки и исследования направлены на улучшение эргономических показателей тракторов. К примеру, фирма Same оборудует тракторы серии Rubin кабиной с системой автоматического выравнивания ее положения на склонах до 25 %, что благоприятно воздействует на состояние оператора. Фирма John Deere на тракторах серии 8020 (мод. 8120, 8220 и др.), имеющих независимую подвеску всех колес, установила сиденье с активным демпфированием колебаний. Под сиденьем находится датчик, измеряющий ускорение. Эта информация используется электронной системой управления для гашения колебаний с помощью гидроцилиндра, встроенного в сиденье [117].

Популярными остаются создание и внедрение коробки перемены передач с автоматическим переключением под нагрузкой не только внутри диапазона, но и между диапазонами.

Альтернативой данного направления является оснащение машины автоматическими бесступенчатыми трансмиссиями, чем занимаются известные ведущие фирмы Fendt, John Deere, Steur и др.[117].

Стабилизация сельскохозяйственного производства в зоне рискованного земледелия требует проведения не только крупных технико-экономических мероприятий, составляющих базисную основу в системе ведения производства на современном этапе, но и соответствующей агротехники с применением новых технологий, связанных с совершенствованием энергетических машин. Фактически все внедренческие мероприятия, являющиеся следствием инновационирования и реновации в сельскохозяйственной отрасли, напрямую или опосредованно ориентированы на развитие двух направлений, определяющих технологическую специфику использования мобильных средств механизации в с.-х. Ведущие специалисты по данному вопросу практически единодушны. Прежде всего собственников интересуют машины с расширенным тяговым диапазоном, целесообразность использования которых подтверждает технико-экономический анализ, показывающий, что использование существующих средств механизации с заменой гусеничных тракторов (ДТ) на колесные (МТЗ) с расширенным тяговым диапазоном дает

значительный экономический эффект [50;80;89]. Как показывает экспериментальная практика, прибыль от использования тракторов тягового класса 14 кН в классе 30 кН связана с наименьшими отчислениями на реновацию и ремонтный фонд, с учетом значительной загрузки в течение года, а также более низкой балансовой стоимости [59;80].

Еще одним и не менее важным является направление, связанное с обеспечением устойчивости движения машин и составленных на их базе машинно-тракторных агрегатов, способствующих повышению качества выполняемых полевых технологических операций.

Необходимость обеспечения устойчивого движения еще более возросла в связи с появлением технологий точного земледелия и связанного с ними ужесточения требований адаптивности техники к агроландшафтам и природно-производственным условиям использования. При этом проблема стабилизации траектории движения во многом решается за счет подруливающих устройств и автопилотов, связанных с системами глобального позиционирования, которые значительно скомпенсировали ограниченность физических возможностей механизатора-человека как управляющего звена [93].

Однако их эффективность резко снижается при движении по невыровненным в горизонтальной плоскости полям, заявленная точность не выдерживается, а если выдерживается, то за счет применения дорогостоящего оборудования, обеспечивающего так называемую дифференциальную поправку и требующего для эффективной работы дополнительного количества спутников. При этом корректировка курса обеспечивается постоянным подворотом колес вверх по склону, что фактически идентично движению машины на подъем [2;41;42;44;54;88;93]. Это провоцирует повышение расхода топлива вследствие увеличения нагрузки на двигатель, роста сопротивления на перекатывание колес, которое возрастает на земельных угодьях, к примеру, с уклоном в 10–12° по сравнению с равнинными условиями на 30–40% и снижает тяговый КПД (коэффициент полезного действия) на 27%. Кроме того, оборудование для точного вождения, как показывает опрос

специалистов, не может полностью реализовать заложенный в него потенциал при его установке на отечественные тракторы [2;39;40;88;106;112].

В связи с этим в 80-годы произошел спад рационализаторской и проектно-исследовательской активности в аспекте развития создания систем автоматического вождения тракторов при движении их по технологическим грунтам. Причины этого явления связаны с тем, что найденные решения либо имели слишком узкие области применения при достаточной простоте конструкции (копировальные системы), либо оказались слишком сложными и дорогими при очевидной универсальности (системы на базе радионавигационных средств).

На сегодняшний день достоверность актуальности создания методов и систем обеспечения курсовой устойчивости технологических машин в АПК подтверждается экономической целесообразностью, в основе которой лежит тенденция к снижению средней площади земельных угодий. Дробление сельскохозяйственных предприятий на более мелкие хозяйства неизбежно ведет к росту потребности тракторов, в том числе и их модификаций, позволяющих задействовать новые дополнительные площади, не задействованные ранее в агротехнологическом цикле [22;85].

В соответствии с агроландшафтными условиями перестраиваются программы развития мобильной сельскохозяйственной техники, где предусматриваются современные эксплуатационные и агротехнические требования. Данные требования акцентируют внимание на повышении уровня маневренности, проходимости машин по любой поверхности и в междурядьях пропашных культур, а также минимизации вредного воздействия ходовой части на почву в процессе буксования и колееобразования, приводящих к уплотнению и истиранию (распылению) почвы, а также оставлению следов, что в свою очередь ведет к отрицательным эффектам, таким как снижение урожайности, разрушение структуры почвы, ветровой и водной эрозии и увеличению затрат на обработку (рисунок 1.1). Однако курсовая устойчивость МТА при реализации агротехнических процессов в регионах с преобладающим склоном земледелия остается основным критерием уровня технологичности и потребительской ценности МЭС. В связи с этим ведущими кон-

структурами активно проводятся исследования, концептуально меняющие направления инновационирования в области разработки систем, обеспечивающих движения МЭС.

Тенденция к дистанционному управлению роботизированными системами, как с помощью спутниковых навигационных комплексов, так и наземной лазер-

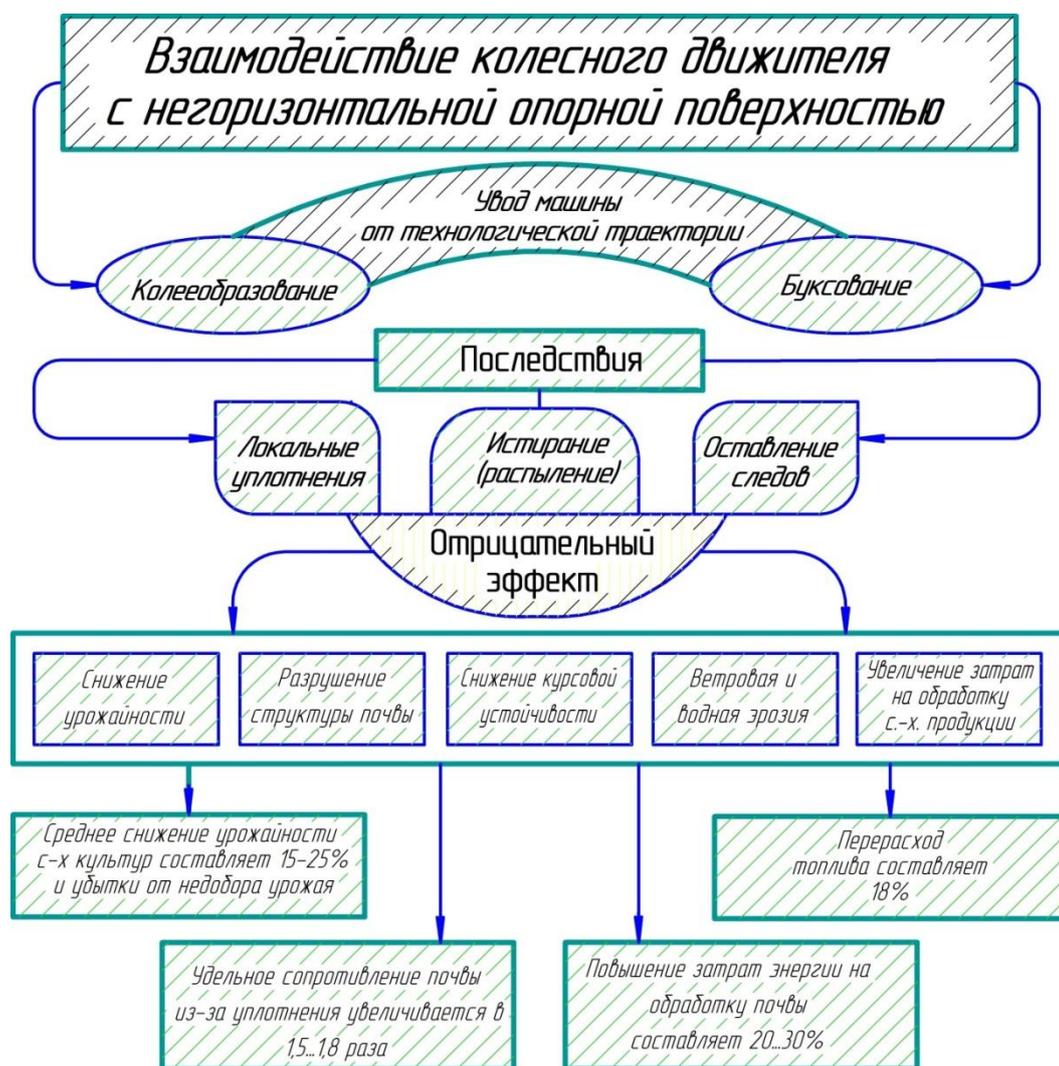


Рисунок 1.1 – Взаимодействие колесного движителя с негоризонтальной опорной поверхностью

ной навигации заменяется на разработку систем, обеспечивающих курсовую устойчивость на основе информации о параметрическом состоянии процессов взаимодействия в системе «двигатель – опорная поверхность» при условии гид-

ромеханической или гидропневматической обратной связи [13;95;109].

Концепция вывода мобильной машины при достижении предельно допустимых отклонений на требуемую траекторию движения имеет в основе своей два направления, успешно развивающихся как в теоретическом, так и прикладном плане. В принципе оба они заключаются в контроле отклонений от заданной траектории и выдачу корректирующих команд.

Стабильность курсовой устойчивости и повышение точности автоматического вождения достигается путем устранения влияния установившегося возмущения при сравнении длительности сигналов рассогласования разных знаков.

В случае превышения длительности сигнала одного из знаков создаваемого установившимся возмущением над длительностью сигнала ошибки, имеющего место при случайных возмущениях, производится корректировка либо параметров системы, либо параметров режима взаимодействия данной системы с несущей поверхностью.

В практике при эксплуатации МЭС как при грузоперевозках, так и в составе МТА наиболее характерными являются стохастические возмущения, являющиеся следствием временных сопротивлений при взаимодействии движителя с опорной поверхностью. Периодическое отклонение курсовой устойчивости в данном случае не является значительным и легко устраняется при воздействии оператора через рулевой механизм на элементы движителя. В случае увеличения амплитуды «рыскания» колесной машины происходит автоматическое или полуавтоматическое изменение параметров какой-либо из ее систем (увеличение пятна контакта, увеличение массы, подключение гидроувеличителя сцепного веса), что стабилизирует ее в допустимом коридоре движения. Однако при установившихся гомогенных возмущениях машина теряет курсовую устойчивость независимо от кинематических характеристик и реализации специализированных функций, заложенных в ее конструкцию. Например, при работе на наклонной поверхности происходит постепенное сползание машины и увод её от технологической траектории. Попытки водителя вернуть МТА в данный коридор движения посредством рулевого управления фактически являются переходом в новый режим взаимодействия

технической системы и несущей поверхности. В связи с этим выполнение агротехнических требований при установившихся возмущениях зависит от оптимизации параметрических характеристик указанного режима взаимодействия [75;88;89;117].

Таким образом, приоритетной составляющей инновационирования в реальном производственном секторе является исследование режимов взаимодействия мобильных энергетических средств в составе МТА с несущей поверхностью и его курсовой ориентации в процессе выполнения технологических операций, при условии реализации ресурсов – и энергосберегающих технологий в растениеводческой отрасли АПК (рисунок 1.2).

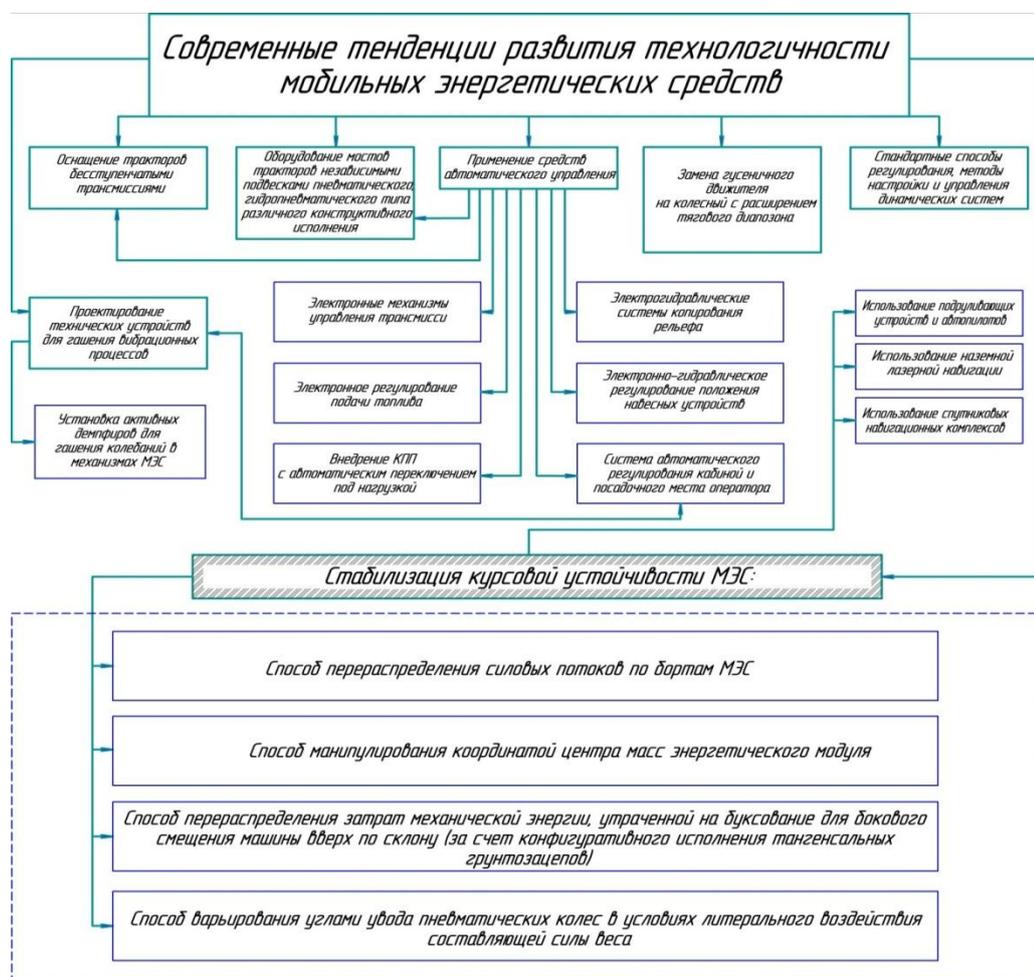


Рисунок 1.2 – Современные тенденции развития технологичности мобильных энергетических средств

1.2 Ландшафтная специфика земельных угодий в аграрном секторе Оренбургской области

Система земледелия должна строиться на основе глубокого анализа и всестороннего учета природных и экономических условий региона, а также уровня технической обеспеченности аграрного сектора. Районы Оренбургской области отличаются неоднородностью климатических, почвенных условий, структурой возделываемых культур, и главным образом, рельефом, что создает значительные сложности в формировании и использовании машинно-тракторного парка (МТП) для выполнения сельскохозяйственных операций.

Поскольку область лежит в отрогах Уральских гор, в ней имеются как равнинные земли, так и земли, расположенные на склонах, что привело к созданию не только систем равнинного земледелия, но и склонного. Поэтому использование только равнинной техники на склонах является нецелесообразным и низкотехнологичным, так как возникают проблемы с управляемостью и устойчивостью движения машин при выполнении технологических операций. Как было указано ранее, в соответствии с областной целевой программой за 2014 год было проведено обновление МТП, общее количество новой сельскохозяйственной техники которой составило 516 единиц [81]. Однако специализированных или модифицированных машин, предназначенных для склонного земледелия, приобретено не было. Отсутствие технических средств, предназначенных для работ в склонной местности, привело сельхозпроизводителей к необходимости использовать дорогостоящую горную специализированную технику. Таким образом, на сегодняшний день возникает необходимость создания модифицированных мобильных машин для работ в условиях склонного земледелия, что позволило бы повысить статическую и динамическую устойчивость, обеспечивающую безопасную работу МТА при движении поперек склона с крутизной до 20^0 , а также производительность тягового модуля [2].

Оренбургская область обладает большим земельным ресурсом. Так, областной баланс общей земельной площади составляет 12 370,2 тыс.га. В том числе,

сельскохозяйственные угодья занимают 10116,5 тыс. га (81,8%), из них на пашни выделены 6094 тыс.га (60,2%).

Учитывая ландшафтные характеристики Оренбургской области, ее делят на четыре зоны: западную, центральную, северную и восточную [22;49;85]. На Урало-Тобольском плато расположена восточная часть области, границы которой приняты в качестве границ Восточной сельскохозяйственной зоны. Плато представляет собой волнообразную возвышенность. Рельеф центральной части области имеет сложный холмисто-сопочный характер. Эта часть располагается на складчатой зоне южных отрогов Урала, которая фактически является сильно расчлененным долинами рек плато. Восточная и центральная части области занимают примерно третью часть ее территории, а остальные две трети относятся к западной и северной части – Южное Приуралье, почти посередине которых проходит возвышенность Общий сырт, также в ней можно выделить более холмистую, расположенную в лесостепи Северную зону и относительно ровную – Центральную (рисунок 1.3).

Таким образом, данная характеристика подтверждает, что ландшафтные условия каждого района Оренбургской области характеризуются своими особенностями, к наиболее важным относят сложность конфигураций сельскохозяйственных полей и угол их склона. В связи с этим целесообразно получение закономерности распределения площадей полей по классам угла склона, используя сплошной метод [49]. В соответствии с результатами исследования в северной зоне равнины и склоны до 3° занимают 57,15% территории, склоны $3-10^{\circ}$ – 42,04%, более 10° – 0,81 %. В центральной зоне 66,4% пахотных земель расположены на склонах до 7° ; 33,6% имеют уклон $7-10^{\circ}$ и выше. Из общей площади сельхозугодий западной зоны на склонах до 7° расположено 92,21%, с уклонами более 7° – остальная часть пашни. В восточной зоне пологие и слабопокатые склоны – 7° занимают 92,25%, склоны крутизной более 7° и выше – 7,75%. Неоднородность рельефа определяет существенные различия проведения почвообрабатывающих процессов на территории области.



Рисунок 1.3 – Сельскохозяйственные зоны Оренбургской области:
I,II,III,IV– северная, западная, центральная и восточные зоны соответственно

Как известно, в последние десятилетия используемые методы эксплуатации природно-ресурсного потенциала сельского хозяйства области привели к повсеместному его уменьшению. По данным Союза комплексного проектирования и землеустройства сельских территорий, в сельских административных районах Оренбургской области доля сельхозугодий уменьшилась на 3–12%. Наиболее велика доля пашни в административных районах северо-западной части области (67,8–73,0% площади сельхозугодий), а наиболее низкая – у групп районов юго-восточной части области (29,5–40,2%) [22;85]. Такие отличия в целом можно объяснить различиями ландшафтных условий.

Также важной причиной потерь пахотных площадей являются способы использования земель, способствующие широкому развитию почвенно-деградационных процессов. Так, при земледельческом освоении нашего региона приоритетным направлением было выравнивание ландшафтов для применения их в сельхозобороте, которое привело к уменьшению плодородного слоя почвы, в связи с этим сельхозпроизводители с неохотой используют данные земли [22;85].

Таким образом, в настоящее время развивается тенденция, в которой считается неперспективным применять земли, расположенные на склонах. Вдобавок к перечисленным причинам можно отнести влияние на машину возмущающих стохастических сил, вызванных нестабильностью ландшафтных условий, которые способствуют уводу МТА за пределы защитных зон коридора движения, что ведет к нарушениям агротехнических требований. По данным исследований Н.К.Бискаева, В.Д. Хопренинова, более 4 млн га пашни расположены на склонах, угол которых варьируется в промежутке $1-7^{\circ}$ [22;85].

Фактически проблематика вопроса стабилизации движения МЭС формируется на основе результатов исследований ученых П.А. Амельченко, И.П.Ксеновича, В.В.Гуськова, где авторами достоверно установлено, что уже начиная с уклона местности $6-7^{\circ}$ происходит значительно уменьшение поступательной скорости МТА. На склоне $10-11^{\circ}$ полезная тяговая мощность снижается на 25–27% [2;43] под действием возмущающих стохастических сил, что создает определённые сложности соблюдения принципов маршрутизации [8;9;93]. Кроме того, боковое смещение машины от технологической колеи приводит к снижению биологической урожайности, ухудшению условий труда механизатора и нарушению эргономических требований. Поэтому направление развития машинно-тракторного парка определяется оптимизацией функциональных характеристик и режимных параметров эксплуатируемой на склонах техники.

1.3 Пути реализации курсовой устойчивости колёсных машин на негоризонтальных опорных поверхностях

1.3.1 Способы стабилизации траекториальной устойчивости

Значительным природно-ресурсным потенциалом обладают районы Оренбургской области, имеющие земельные угодья (з.у.), расположенные на склонах, охватывающие около 2209,65 тыс. га территории [22;85]. Как известно, в склонном земледелии основные операции по обработке почвы, посев и уход за сельскохозяйственными культурами на негоризонтальных землях должны выполняться в соответствии ГОСТ 17.5.3.05-84 только в поперечном направлении, а на двусторонних и более сложных – контурно, в направлении горизонталей с целью предотвращения развития эрозионных процессов. Как правило, сельхозпроизводители не решаются вводить в оборот данные площади, поскольку уровень механизации работ в условиях склонного земледелия в 3–4 раза ниже, чем для равнинных территорий, что приводит к нецелесообразности эксплуатации сельхозтехники в этих условиях [2]. Специфика реализации агротехнических мероприятий в условиях склонного земледелия требует мобильных средств механизации, имеющих высокую степень устойчивого движения при интенсивных возмущениях как стохастического, так и гомогенного характера.

В настоящее время ужесточаются требования к совершенствованию экологических показателей, и прежде всего, к снижению уплотняющего воздействия движителей на почву, уменьшению эрозионных процессов и снижению повреждаемости растений.

Курсовая устойчивость МЭС обеспечивает движение в строго допустимом коридоре. Отклонения МТА от технологического коридора движения вызывают образование пропусков и перекрытий обрабатываемых площадей, разъемных борозд и высоких свальных гребней, неполное уничтожение сорняков в междурядьях, повреждения и засыпания культурных растений [54;70;71;72;74;75;93;110;118]. Таким образом, движители должны совершать движение по строго определенной

технологической колее и не воздействовать на зону возделывания растений. Это привело к применению так называемой маршрутизации движения сельскохозяйственных агрегатов по постоянной траектории в течение всего сезона возделывания и уборки сельскохозяйственных культур [93].

Вопрос маршрутизации на сегодняшний день решается несколькими путями. Одним из них является использование спутниковой навигационной системы с приемником, пропорционально преобразующим отклонение от требуемой траектории мобильной машины в электрический сигнал, изменяющийся по значению и направлению. При достижении предельных значений допустимых отклонений происходит вывод транспортного средства на требуемую траекторию путем изменения угла поворота управляемых колес в зависимости от имеющихся отклонений. В качестве параметров текущего положения МЭС используют её координаты направляющей точки в плане, заранее заданной в памяти приемника спутниковой навигационной системы [109]. Однако исследователям в данном случае не удалось избежать несоответствия курсового угла, кривизны маршрута движения машины от направления касательной к требуемой траектории. В связи с этим был разработан и предложен способ, при котором дополнительно определяются отклонения таких параметров текущего положения, как курсовой угол, кривизна траектории. Таким образом, применение данного способа позволяет определять отклонение параметров текущего положения машины от требуемых и автоматически корректировать их на основании величин данных отклонений, что приводит к повышению точности вождения [94]. Однако, как показывает агроинженерная практика, информация, предоставляемая спутниковой навигационной системой (GPS, ГЛОНАСС), служащей не только основой технологий дифференцированной обработки, но и базой автоматизации вождения, не обеспечивает необходимой точности определения места положения управляемого объекта. Кроме того, принято во внимание мнение специалистов о высокой стоимости оборудования использования его.

Новейшие исследования японских инженеров в области сельскохозяйственного машиностроения по созданию тракторов-роботов показали необходимость

применения сложных и дорогостоящих систем наземных ретрансляторов, обеспечивающих необходимую точность измерения при маршрутизации МЭС и удержании МТА в технологическом коридоре движения [117]. В связи с этим в настоящее время представляют интерес способы управления МЭС, основанные на разработках локальных навигационных систем на базе радиодальномеров и радарных датчиков, действующих на основе разработок Допплера, ведущий производитель которых – американская фирма Dikey John – проектировала их в качестве базового элемента для реализации эксплуатационно-технологического мониторинга, позволяющего рационально подбирать тягово-скоростные режимы для различных условий агрегатирования тракторов и состояния почвы. Это обеспечивает устойчивое движение машины без увода в защитную зону при систематических возмущающих воздействиях на движитель со стороны опорной поверхности. Наиболее распространенным способом, реализующим указанный принцип контроля движения МЭС, является использование фотоприемного устройства для регистрации движения машинно-тракторного агрегата по направлению лучей лазеров, установленных на заданном расстоянии друг от друга в зависимости от ширины междурядий и ширины захвата агрегата (рисунок 1.4) [13]. Данный способ повышает точность вождения энергетического модуля любого класса, что приводит к снижению повреждаемости растений при междурядной обработке почвы. Однако, как показала практика, использование наземно-радионавигационных систем не получило широкого распространения в связи с необходимостью перенастройки лазерных лучей и изменением технологических координат реперов по мере обработки междурядий и фиксации их лучей в заданном направлении.

Актуальными на сегодняшний день являются исследования, направленные на модернизацию датчиковых систем, установленных непосредственно на энергетических модулях. В частности, широкое распространение получило автоматическое управление с использованием электронных элементов для повышения точности движения тракторного агрегата и помехозащищенности процесса движения путем исключения искривлений траектории движения при кратковременных воздействиях возмущающих факторов.

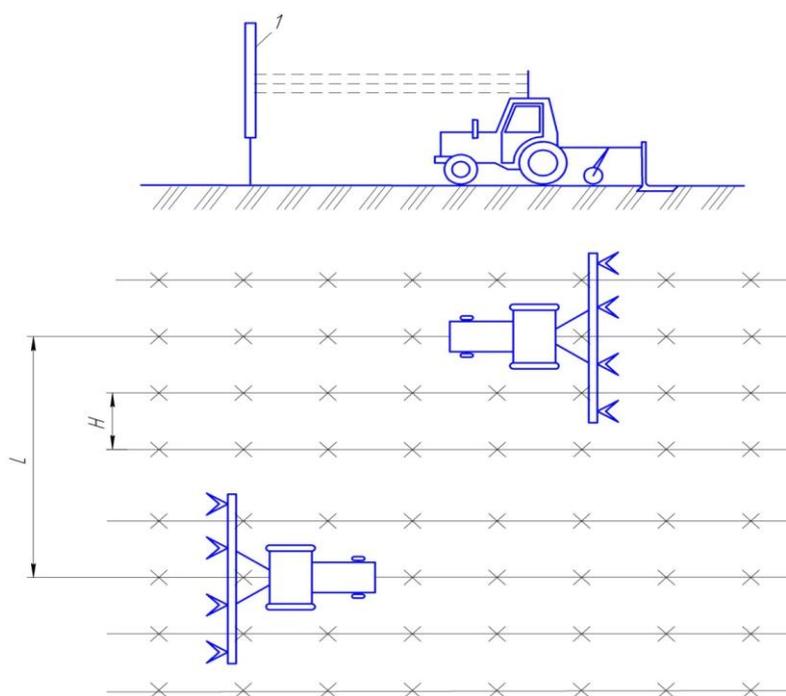


Рисунок 1.4 – Схема наземной лазерной навигации: 1 – фотоприемное устройство (репер); L – расстояние между реперами; H – расстояние между лучами лазеров.

Основопологающим принципом данного способа является определение действительной абсолютной величины производной отклонения тракторного агрегата по времени, заданным пороговым значением и сравнение его с действительной величиной данного параметра с прекращением коррекции направления движения МТА на период превышения действительной абсолютной величиной производной отклонения тракторного агрегата порогового значения [18;20]. Данный способ реализуется в перемещении чувствительного элемента трактора в борозде базового следа. Сигнал рассогласования траектории движения с базовым следом, вырабатываемый чувствительным элементом, поступает через блок переключения на вход блока преобразования. Последний формирует сигнал коррекции, воздействующий на исполнительный механизм, который обеспечивает поворот мобильной машины в направлении, корректирующем траекторию движения. В случае появления резкого возмущения движения тракторного агрегата, что оказывает влияние на скоростной режим, как при завале базового следа, так и при местном

уплотнении почвы, при котором чувствительный элемент может быть выброшен из борозды, в систему автовождения поступает сигнал ошибки [18]. Таким образом, данный способ позволяет уменьшить искривление траектории движения тракторного агрегата за счет исключения отработки ошибочных сигналов, что приводит к повышению эксплуатационной производительности агрегата, снижению удельного расхода топлива и к стабилизации скоростного режима МЭС.

Еще одним часто используемым критерием для оценки характера движения транспортного средства в процессе выполнения технологических операций является его положение относительно горизонтальной плоскости при движении МЭС по наклонной опорной поверхности. Данный способ основан на анализе углов крена ξ_1 , бокового сползания ξ_2 , галонирования ξ_3 (рисунок 1.5) и просадки трактора ζ (погрешность измерения угла галонирования). В качестве чувствительных элементов измерителей используются синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (КСВТ), выходные напряжения которых пропорциональны входным напряжениям и синусу угла поворота ротора трансформатора относительно статора. Конечное напряжение, после прохождения соответствующих схем умножения, сравнения и т.д., выпрямляется фазочувствительным выпрямителем и поступает на индикатор при ручном вождении или на исполнительный механизм рулевого управления при автоматическом вождении машинно-тракторного агрегата по горизонталям склонов [16].

В современном тракторостроении наиболее четко определены порядка 10 инновационных направлений развития МЭС. В частности, создание комфортных условий для оператора при выполнении технологических операций и снижение его физической и управленческой напряженности, связанных с постоянным подруливанием мобильного средства при движении его по наклонной опорной поверхности.

Как инновационный, был предложен способ манипулирования координатой центра масс энергетического модуля, в основе которого лежит принцип реализации поворачивающего момента, обеспечивающего изменения частоты вращения колес, выполняющих возврат модуля на первоначальную траекторию движения.

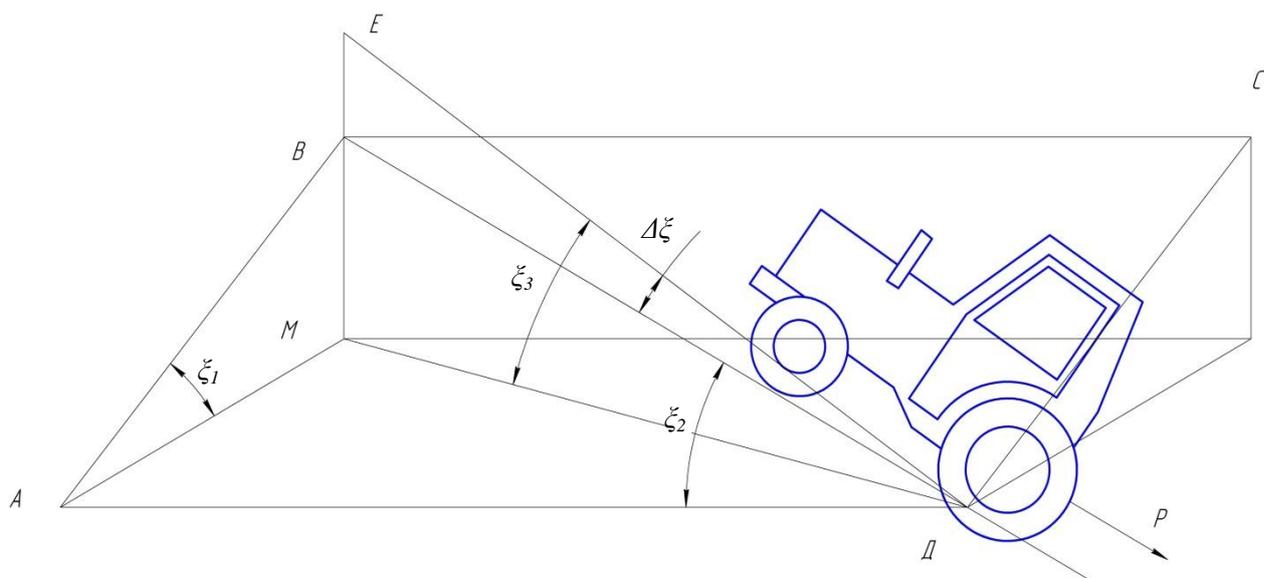


Рисунок 1.5 – Устройство для вождения машинно-тракторного агрегата: ξ_1 – угол крена; ξ_2 – угол бокового сползания; ξ_3 – угол галонирования; А,В,Е,С,Д,М – точки плоскостей; Р – крюковая сила

В данном случае не устраняется перераспределение реакций на колеса мостов, а создается пропорциональный дестабилизирующий момент. Так как между передним и задним мостами нагрузки распределяются не поровну, а колеса имеют различную жесткость, то моменты на каждом мосту создаются дифференцированно, а регулирование реакций осуществляется путем перемещения в поперечном направлении балластных грузов, закрепленных в передней и задней частях трактора пропорционально моментам увода, имеющих функциональную зависимость от угла наклона опорной поверхности [96]. Настоящие разработки были основаны на исследовании функциональных структур, обеспечивающих реализацию заданной функции посредством внесенных изменений в параметрическую схему системы. Однако такой путь приводит к достаточно сложным техническим решениям, начиная от конструкции чувствительных элементов (датчиков) и преобразователей и заканчивая излучателями и исполнительными механизмами. Поэтому последние исследования были направлены на изучении процессов, связанных со стабилизацией курсовой устойчивости и траектории движения машины, в аспекте

изменения параметров режима взаимодействия технической системы и опорной поверхности.

Особенность технологической реализации данного случая заключается в том, что при работе технического элемента возникающая в пятне контакта боковая составляющая реакции касательного усилия направлена навстречу составляющей увода, что стабилизирует движение и фиксирует мобильные средства на необходимой траектории. В связи с этим как наиболее ярко выраженные можно представить способы стабилизации курсового движения, реализованные в конфигуративных вариациях протекторов шин. Одним из путей является проектирование грунтозацепа в форме тангенсоиды, обеспечивающее боковое компенсационное смещение МЭС вверх по склону по принципу шнекохода. Однако проведенные исследования показали, что данный способ оказался неэффективным на сухих почвах, а на переувлажненных существенно снижается коэффициент использования сцепного веса и тяговый КПД машины [2;30;93].

Не удалось также решить проблему устойчивости движения по наклонной поверхности посредством искусственного (принудительного) отклонения вектора направления движения ведущего колеса от заданного направления движения МТА. Резко увеличивающийся износ и периодические амплитудные колебания (рыскание) машины с выходом из допустимого технологического коридора движения привели к повышенному удельному эффективному расходу топлива, снижению производительности агрегата и уменьшению биологической урожайности возделываемых культур [97].

Малоэффективным оказался также и способ перераспределения силовых потоков по бортам МЭС с целью обеспечения разночастотного вращения ведущих колес в зависимости от угла наклона опорной поверхности. В данном случае представляет сложность создание специализированных устройств и датчиков, создающих корреляционный сигнал между разностью частот ведущих колес и угловыми колебаниями машины в реальных ландшафтных условиях при различной пространственной ориентации опорных плоскостей [20].

Практическая реализация разработанных на сегодняшний день способов траекториальной стабилизации движения в условиях аграрного производства ставит перед фактом нерешенности многих технологических вопросов. Сложность и разнообразие технологий, направленных на получение сельскохозяйственной продукции в растениеводческой отрасли, особенно с учетом склонного земледелия, привели к необходимости расширения ассортимента технических средств, приспособлений и конструктивных решений, компенсирующих недостоверность методологических подходов в развитии сельскохозяйственного машиностроения. Создаваемые в настоящее время инновационные проекты, начиная с функционально-параметрического уровня и до момента создания программ для станков с числовым программным управлением привели к резкому научно-техническому прогрессу, но проблема адаптации сельскохозяйственной мобильной техники к сложным ландшафтными условиям, и особенно на слабых несущих грунтах, остается открытой как для научно-исследовательских организаций, так и для конструкторских бюро ведущих производителей машин.

1.3.2 Анализ средств и технических решений вопросов устойчивости движения колёсных тракторов

Вопрос обеспечения аграрного сектора специализированной мобильной техникой, способной реализовать современные технологии в растениеводстве и на транспортных работах, остается открытым и в настоящее время. Особенность в сложившейся ситуации заключается в том, что сегодня на территории России наметилась устойчивая тенденция к снижению средней площади угодий в связи с дроблением сельхозпредприятий на более мелкие хозяйства. Это неизбежно вызывает потребность использования незадействованных территорий с целью проведения на них сельскохозяйственных работ, в частности речь идет о землях, расположенных на склонах [22;85].

Увеличение объемов полевых работ и необходимость повышения энергообеспеченности отрасли вызывает спрос на технику, удовлетворяющую требования выполнения технологических операций на наклонной поверхности. Настоя-

щая система машин не учитывает изменения, происходящие в структуре землепользования, что приводит к вынужденным нарушениям аграрных технологий во время выполнения сельскохозяйственных операций. При этом увеличивается риск снижения биологической урожайности посевных культур, что ставит под сомнение целесообразность привлечения в земельный фонд территорий сложного характера.

В связи с этим сельхозпроизводители для повышения урожайности и соблюдения как агротехнических, так и экологических требований проводят ряд дополнительных технических мероприятий для подготовки к использованию равнинных мобильных машин на склонах с целью повышения стабилизации движения их на негоризонтальных полях.

Как известно, наиболее распространенным способом стабилизации трактора на наклонной поверхности является переоборудование равнинного трактора в низкоклинренский вариант посредством установки колёс уменьшенного диаметра с одновременным уширением колеи. Таким образом, величина предельных статических углов поперечного уклона увеличивается и находится в пределах $40\text{--}50^{\circ}$ [115].

Кроме этого, используется балластировка всех ходовых колес и переднего моста, с помощью чего достигается снижение центра тяжести и, следовательно, повышение устойчивости движения МЭС. На сегодняшний день также разработаны модификации с автоматическим перемещением балласта, как поперечной, так и по продольной базе в зависимости от режима работы трактора.

С этой же целью производится сдваивание движителей как с пневматическим, так и с решетчатым колесом, что обеспечивает работу трактора на склоне с углом до 26° . Того же эффекта добиваются с помощью цепей, откидных грунтозацепов и установки дополнительных колес на ширину обрабатываемых междурядий.

Достаточное распространение получило автоматическое регулирование давления в шинах верхнего и нижнего по склону колес, что увеличивает пятно контакта шины с опорной поверхностью, в связи с чем машина удерживается в

допустимом коридоре движения. Уменьшить вероятность увода машины в защитную зону можно посредством применения полугусеничного хода или установкой добавочного активного колеса в зону максимальных реакций несущей поверхности [80].

Несмотря на то, что приспособабливание равнинных тракторов для работы на склонах является наиболее простым способом с точки зрения организации производства, их использование затруднено на пропашных работах, особенно при возделывании высокостебельных культур, из-за низкого клиренса. Более того, при их проектировании в конструкцию не закладывалась целевая функция стабилизации курсовой устойчивости при движении по наклонной поверхности.

В связи с этим были проведены исследования, направленные на модернизацию конструкции равнинных тракторов для адаптации их к технологическим процессам, реализуемым на негоризонтальной опорной поверхности. Так, для удержания в вертикальном положении остова и колес при движении трактора по пересеченной местности без вмешательства водителя были созданы автоматические системы стабилизации остова (АССО).

Одним из конструкторских решений реализации вертикального положения остова является установка всех колес на шарнирном параллелограмме. Данная схема имеет два исполнения: центры шарниров параллелограммного механизма размещены по оси трактора или прикреплены по сторонам корпуса трансмиссии на определенном расстоянии. Кроме того, конструкция предполагает изменения ширины колеи в зависимости от угла наклона звеньев параллелограммного механизма, однако это отрицательно сказывается на стабильности коридора движения [2;115].

Для сохранения ширины колеи во время проведения полевых работ конструкторами создана схема стабилизации крутосклонных машин, основанная на перемещении относительно остова колес по высоте в противоположные стороны. В настоящее время данная схема переработана и в проект добавлены бортовые поворотные, качающиеся редукторы, управляемые гидроцилиндры и т.д. Это дало возможность машине копировать поперечный профиль опорной несущей по-

верхности, а также использовать его для обработки высокостебельных культур. Однако в предложенной схеме, несмотря на то, что проекция колеи в зависимости от крутизны склона остается постоянной, абсолютный размер колеи изменяется в зависимости от угла склона, что также приводит к нестабильности коридора движения и снижению биологической урожайности возделываемых культур [2;115].

В связи с этим были проведены исследования и обоснована конструкция стабилизации горизонтального положения остова маятникового типа обратного действия, подвешенного на переднем и заднем мостах. Это привело к улучшению условий труда оператора, поскольку постоянно фиксировало вертикаль его положения независимо от угла несущей поверхности посредством реализации функции поворота гидроцилиндров относительно нижних шарнирных опор. Несмотря на то, что стабилизируется только часть массы трактора и исключается возможность использовать преимущества стабилизации всей его массы, ширина колеи остается постоянной, что создаёт возможность технологической маршрутизации машинно-тракторного агрегата.

Однако проведенные проектно-конструкторские исследования, направленные на развитие систем стабилизации остова тракторов, эксплуатируемых на наклонных поверхностях, не привели к окончательному решению вопроса траекториальной устойчивости МТА. Это было вызвано, прежде всего, отсутствием специализированных устройств, обеспечивающих идентификацию угла наклона опорной поверхности и корректирование движения мобильной машины в соответствии с требуемой траекторией. И к тому же, существующие конструкции препятствуют реализации функций рулевого управления машиной вследствие появления дестабилизирующего момента передних мостов. Дестабилизирующие моменты различаются по величине, но, как правило, имеют одну природу происхождения – разность вертикальных опорных реакций в геометрических центрах тяжести пятен контакта колесного движителя.

В связи с этим инженерами-исследователями были предложены конструкции, на основе которых получили развитие все последующие технические реше-

ния, направленные на стабилизацию контакта движителя с несущей поверхностью независимо от угла ее наклона, перераспределения вертикальных опорных реакций и величины момента увода от заданной траектории движения. В случае отсутствия силового потока на передние колеса их вертикальное положение обеспечивается за счет шарнирной посадки тяг на оси кронштейна, прикрепленного к торцу переднего бруса моста. При этом балка передней оси, кронштейны кулаков и тяги с распорками образуют параллелограммный механизм, обеспечивающий реализацию копирующей функции переднего моста вследствие поворота передней оси вокруг оси качения бруса на склоне. При подаче силового потока к ведущим колесам переднего моста в кинематическую схему конструкции был введен дополнительный редуктор стабилизации, установленный между корпусом верхней конической пары и нижним колесным редуктором, что является принципиальным отличием от конструкций ведущих мостов равнинных тракторов. Это лежит в основе обеспечения вертикального положения ведущих колес при работе на склонах в установленном коридоре движения МЭС [2;115].

Решение вопроса реализации курсовой устойчивости закономерно привело к развитию систем и устройств, обеспечивающих адаптацию мобильных средств к ландшафтной специфике несущих грунтов. Несмотря на то, что на сегодняшний день практически все направления в сфере сельхозмашиностроения насыщены электронными приборами от узкоспециализированных до многофункциональных, в агроинженерии продолжают создаваться и эксплуатироваться системы автоматического управления, в основе которых лежат принципы пневмомеханики, гидромеханики и гироскопирования. Достаточно много современных научно-исследовательских работ направлены на развитие систем стабилизации остова транспортного средства и его курсовой устойчивости при выполнении технологических операций. Анализ проектно-конструкторских решений показал основные тенденции развития технологичности МЭС в соответствии с характером и видом функциональных сбоев трактора при работе его на наклонной опорной поверхности.

Одной из наиболее значимых причин нарушения курсовой устойчивости колесного транспортного средства является самопроизвольный поворот управляемых колес на гребнистых и каменистых грунтах вследствие возникновения стохастических возмущений.

Для уменьшения частоты и величины самопроизвольных поворотов управляемых колес наиболее целесообразно применять техническое решение, в основе которого лежит использование ртутного датчика поперечного крена, состоящего из трубки с ртутью и двух омических сопротивлений, соединенных электрической цепью с электродвигателем через датчики продольного крена мостовой схемой. При этом конец ротора посредством муфты и червячного редуктора жестко связан с рулевым валом, управляющим работой распределителя и гидравлического замка, содержащего плунжер и два запорных клапана. В случае отклонения МТА от курса сигнал на исполнительный механизм поступает от датчика крена на контакт через указанные выше элементы конструкции, в результате чего осуществляется поворот управляемых колес в сторону ликвидации ошибок и возвращения трактора в исходное положение. При этом по мере выравнивания машины напряжение на обмотке электродвигателя уменьшается вследствие увеличения сопротивления, что повышает устойчивость МТА по курсу и обеспечивает движение его по первоначальной горизонтали [15].

Необходимо отметить как недостаток то, что такая конструкция реагирует только на изменение крена и не учитывает боковое смещение машины. Как показали эмпирические исследования, использование предлагаемого устройства является малоэффективным при курсовой стабилизации транспортного средства в случае его увода при неравномерном распределении вертикальных опорных реакций [93;97]. Более того, анализируя работу тяговых модулей в сложных условиях, конструкторы пришли к выводу создания устройств, обеспечивающих автономную стабилизацию курсовой устойчивости для оптимального траекториального движения транспортных средств в случае переутомления оператора.

В связи с этим ведущие специалисты в области автоматизации и приборостроении предложили использовать датчики измерения угла бокового сноса и уг-

ла курсового отклонения, с помощью которых определяется суммарный вектор увода машины от ее траектории движения. Обработывая полученные данные в интегральном устройстве в совокупности с сигналами датчика пути, бортовой компьютер в перманентном цикле определяет величину отклонения, сравнивая ее с пороговым значением. Результатом этого сравнения является формирование команды на дифференциальные механизмы машины для создания разности частот вращения колес по ее бортам до момента возврата на необходимую траекторию [20]. Надо отметить, что оборудование машин электронными системами является определяющим в плане их адаптации к специфике внешних условий, но вопрос реализации функции исполнительных механизмов остается открытым, поскольку заложенный в них потенциал до конца не реализуется, что обусловлено недостаточным уровнем эксплуатационной технологичности машины. Таким образом, развитие электронного оснащения мобильных машин напрямую зависит от совершенствования их технической структуры.

В связи с этим в последние годы попытки решить вопрос стабилизации курсовой устойчивости привели к проектированию ряда устройств, основанных по принципу создания касательной силы тяги на движителях бортов посредством равномерного распределения мощности между ними в момент появления рассогласования по частоте вращения путем увеличения момента на отстающем движителе. Так, например, одним из решений стабилизации направления движения МТА является конструкция, в которой ось 1 колесных движителей 2 снабжена зубьями 3, взаимодействующими с подпружиненными упорами рычагов 4, расположенных на дополнительных плечевых колесах 5. При преодолении естественного препятствия 6 ведущим колесом 2 его ось 1 стремится занять нижнее положение по отношению к оси 7 плечевого колеса 5. Вследствие такого взаимного перераспределения положения осей происходит воздействие упора рычага 4 на зубья 3. В результате к крутящему моменту $M_{кр}$ отстающего ведущего колеса добавляется плечевой момент $M_{пл}$, что способствует доводу его на угол рассогласования по частоте вращения с опережающим колесом (рисунок 1.6) [12]. У транспортных средств, оборудованных устройствами подобного типа, отсут-

ствует явление неуправляемого поворота агрегата в сторону движителей, имеющих худшее сцепление с почвой. Это приводит к ухудшению курсовой устойчивости и, как следствие, к повышению качества выполняемой технологической операции. Однако для реализации технической функции на этапе разработки технической структуры и обоснования параметров мобильной машины необходимо учитывать коэффициент сложности проекта, который возрастает при дублировании систем, реализующих заданную функцию. В данном случае речь идет об устройствах дублирующих функцию дифференциальных механизмов повышенного трения. Такой подход к созданию инновационных проектов не оправдывает себя с точки зрения надежности и технологичности машин.

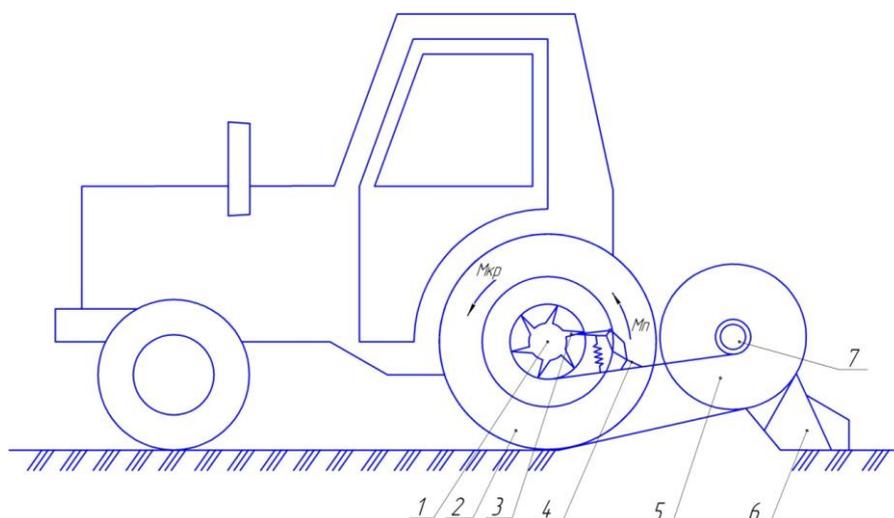


Рисунок 1.6 – Схема устройства стабилизации колёсного трактора при движении на склоне

В связи с этим в настоящее время параллельно развиваются и имеют серийное исполнение устройства, предназначенные для компенсации боковой составляющей силы тяжести, направленной вниз по склону и приводящей к выходу трактора за защитную зону. Заложённая в них концепция основана на развитии двух эксплуатационных направлений, одно из которых – создание воздушной тяги, по величине равной и по направлению противоположной силе, смещающей транспортный агрегат вниз по склону [19]. Другое направление заключается в ис-

пользовании специализированной конфигурации протектора движителя, при взаимодействии которого с опорной поверхностью происходит перемещение грунта между грунтозацепами, вследствие чего возникают реакции, которые воздействуют на движитель, перемещая его верх по склону. Надо отметить, что протектор спроектирован чередующимися в окружном направлении грунтозацепов 1 и канавок 2, представляющие тангенсоиду, что позволяет работать на склонах с различными углами наклона α за счет адекватного изменения реакций D_1, D_2 , от взаимодействия с опорной поверхностью (рисунок 1.7). При реализации данного способа ущерб здоровью механизатора не наносится, более того, снижаются его энергозатраты на управление трактором [98;99;101].

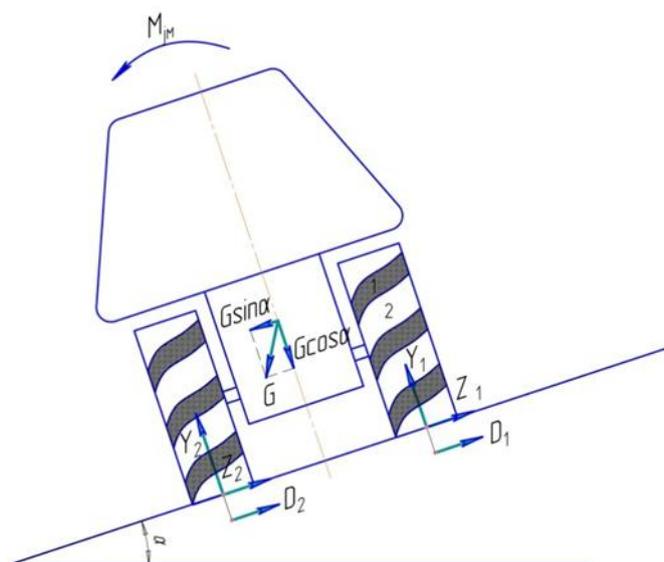


Рисунок 1.7 – Трактор со специализированной конфигурацией протектора движителя при движении по склону: G – эксплуатационный вес трактора; M_{jm} – момент вращающихся частей двигателя и деталей передачи; Y_1, Y_2 – реакции почвы на ходовую часть трактора, направленные по нормали к почве; Z_1, Z_2 – реакции почвы на ходовую часть трактора, направленные параллельно почве.

В случае использования воздушной тяги для удержания машины в коридоре движения задействован тяговый ведущий винт, снабженный электродвигателем постоянного тока с блоком управления с заданным в соответствии с углом крена числом оборотов и направлением вращения (рисунок 1.8). В процессе пе-

ремещения машины постоянно контролируется угол наклона её с помощью датчика крена, и в случае отклонения датчика от нулевого значения включается винт, создающий силу воздушной тяги, по величине равную и по направлению противоположную силе, смещающей транспортный агрегат вниз по склону (рисунок 1.8). Использование такой конструкции обеспечивает исключение вредного влияния боковой составляющей силы тяжести сельскохозяйственного агрегата, улучшается динамика устойчивости мобильной машины. Это позволяет значительно увеличить рабочие скорости движения техники в процессе обработки почвы и расширить эксплуатационные возможности МТА путем обеспечения безаварийной работы их на склонах. Однако данное техническое решение нельзя использовать для работы крупногабаритных машин. Кроме этого, в результате эксплуатации конструкций подобного типа происходит негативное воздействие воздушной загрязненной массы на оператора [19].

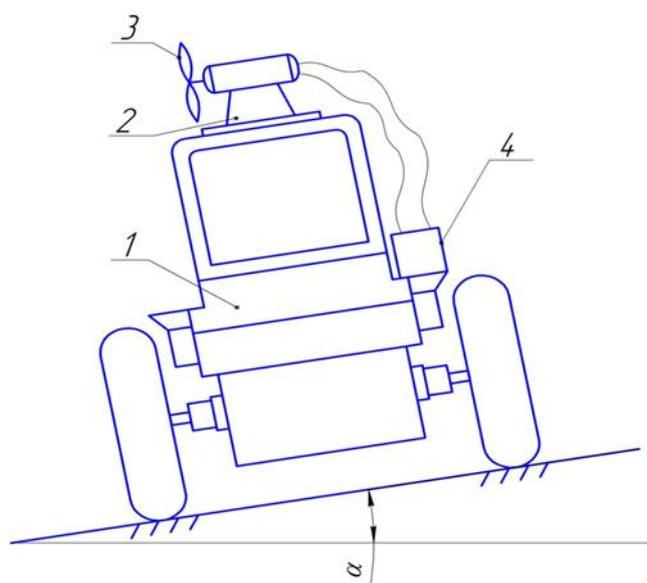


Рисунок 1.8 – Схема стабилизации движения трактора посредством воздушной силы тяги: 1– трактор; 2 – электродвигатель постоянного тока; 3 –тяговый ведущий винт; 4 – датчик.

Необходимо акцентировать внимание на том, что уровень технологичности тягового модуля является значимым, но не определяющим критерием при разработке методов оптимизации конструкционных параметров и режимов работы мо-

бильных технических систем и машинно-тракторных агрегатов. Речь идет о том, что для обеспечения стабилизации курсовой устойчивости машины, лежащей в основе жесткой маршрутизации, МТА в агротехнологическом цикле определяется, прежде всего, управляемостью собственно тягового средства. Помимо этого, в агрегате с технологической машиной должен реализоваться режим, при котором сохраняется заданное направление движения, легкость изменения его направления по желанию механизатора и обеспечение поворота машины на ограниченном пространстве. Попытки решить вопрос подобного рода предпринимались при создании устройств для автоматического вождения в условиях осложненных возмущениями стохастического характера в сочетании с ландшафтной нестабильностью. Характерной ситуацией для данного случая является поворот колесной машины на негоризонтальной опорной поверхности и грунтах с малой несущей способностью. Когда оператор не может адекватно оценивать уклон и управлять поворотом либо вниз, либо вверх по склону, ситуация, как правило, заканчивается опрокидыванием транспортного средства, причем летальные случаи не исключены. В связи с этим конструкторы добиваются эффекта снижения скорости поворота трактора вниз по склону, и наоборот, повышения интенсивности при повороте его вверх по сравнению с той, которая потребовалась бы в адекватных условиях в процессе выполнения маневра на равнине. Для этого машина оборудовалась регулятором расхода масла, работающего от сигнала датчика крена, связанного с гидроцилиндром струйного усилителя через электрогидравлический распределитель. При срабатывании одного из электрогидравлических усилителей управления сигнал с выхода порогового элемента через контакт поступает в электрогидравлический распределитель, который вызывает перемещение штока гидроцилиндра и поворот органа управления регулятора расхода масла, так, чтобы расход масла уменьшился либо увеличился при повороте трактора вниз или вверх по склону соответственно. Однако предложенный проект не учитывал сложность оптимизации характеристик устройств гидравлического и электрического типа, а оборудование машины электрогидравлическими системами и механизмами, син-

хронизирующими их работы, привело к резкому увеличению себестоимости опытного образца предложенной разработанной конструкции трактора [17].

Также известно техническое решение, целью которого является обеспечение корректирования направления движения при отклонении продольной оси трактора от фактического направления движения, где при автоматическом срабатывании механизма стабилизации остова и повороте бортовых редукторов относительно полуосей в разные стороны на одинаковый угол посредством шарнирного параллелограмма и трапецеидального шарнирного механизма поворачивают колёса в горизонтальной плоскости в сторону, противоположную сползанию, так что с изменением крутизны склона изменяется угол поворота колёс [14]. Однако указанное устройство, обеспечивающее способ корректирования направления движения трактора при сползании его по склону, не предполагает реализацию функции создания адекватных стабилизирующих реакций, компенсирующих воздействие на пневматики боковой составляющей результирующей силы реакций крутосклонного трактора, что приводит к появлению моментов увода как задних колёс, так и передних, причем момент увода задних ведущих колёс значительно больше, чем передних ведущих колёс. Вследствие этого движущийся поперёк склона трактор имеет постоянную тенденцию не только к выходу из технологического коридора по причине смещения его продольной оси от фактического направления движения, но и к развороту в собственно коридоре движения относительно своего центра масс, что является закономерным результатом взаимодействия эластичной шины с наклонной опорной поверхностью. Предотвращение подобного явления приводит к необходимости постоянного воздействия оператора на органы системы рулевого управления, что в условиях склонного земледелия неизбежно введет трактор в неустановившийся режим траекториального движения – «рыскание машины» в пределах технологического коридора и может привести не только к недопустимым нарушениям агротехнических требований при проведении сельскохозяйственных работ, но и к опрокидыванию самого трактора.

Изучая реализацию функций мобильной машины, исследователи пришли к выводу возможного использования не только положительных проявлений серий-

ных конструкций, но и отрицательных–побочных, которые в соответствии с современными методами прогнозирования развития производства используются при создании математических моделей для определения макросред и специфики производственных условий эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Так, группой ученых было предложено использование отрицательного воздействия дестабилизирующих моментов, возникающих при перераспределении вертикальных реакций на колеса транспортного средства при движении его поперек склона, – это отрицательное функциональное проявление машины было использовано для обеспечения повышения курсовой устойчивости при маршрутизации технологических машин на наклонной поверхности. В данном случае конструкторами был реализован эффект изменения направления движения машины за счет манипулирования координаты ее центра масс. Конструктивно такой способ реализуется обычно за счет автоматического догружения верхнего по склону колеса. Таким образом, чтобы вертикальные реакции Y_A, Y_B почвы на верхние колеса были больше на величину адекватную углу наклона α , при этом возникают стабилизирующие моменты M_{cm} , пропорциональные моментам увода, действующие на соответствующие мосты трактора, благодаря чему курсовая устойчивость транспортного средства повышается, и машина стабилизируется в заданный коридор движения (рисунок 1.9). Однако данный способ, задачей которого является повышение эксплуатационной технологичности колёсного транспортного средства, реализуя корреляционную связь между величиной перемещения груза и углом наклона опорной поверхности, вызывающую необходимое перераспределение вертикальных реакций на колёса для создания поворота вверх, не обеспечивает устойчивого движения транспортного средства в заданном технологическом коридоре при выполнении сельскохозяйственных операций вследствие сползания пневматики вниз по склону под воздействием внешних факторов, влияющих на тягово-сцепные качества колёсного движителя. Таким образом, при движении поперек склона транспортного средства с незаблокированным дифференциалом ведущих мостов и с выключенной системой перемещения грузов, несмотря на появление стабилизирующего момента, способного предотвратить боковой увод

пневматики, в случае изменения почвенного фона, при котором сила сцепления с несущей поверхностью в пятне контакта уменьшается, происходит смещение продольной оси транспортного средства от фактического направления движения и соответственно его выход из технологического коридора [93;96,100].

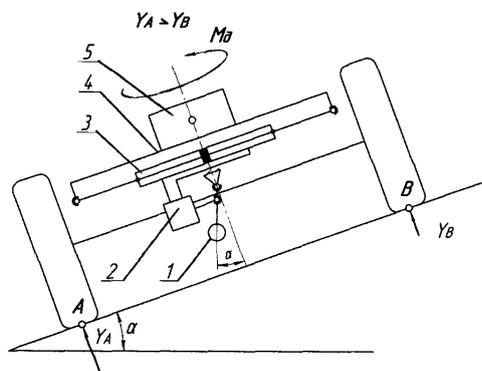


Рисунок 1.9 – Изменение направления движения машины за счет манипулирования координаты ее центра масс: 1 – маятниковый датчик; 2 – гидрораспределитель; 3 – гидроцилиндр; 4 – рычаг; 5 – груз; M_b – дестабилизирующий момент

При реализации поисковых процедур оценивался уровень релевантности существующих способов к поставленной задаче – стабилизации курсового движения МТА при реализации сельскохозяйственных технологических операций в условиях склонного земледелия, который показал недостаточность использования какого-то из существующих технических решений. В связи с этим пришли к необходимости создания инновационного решения удержания машины на заданной технологической траектории, основанного на оптимизации взаимодействия конструктивно-режимных параметров движителя колесной машины с опорной поверхностью при условии соблюдения всех технических и эксплуатационных требований (рисунок 1.10).

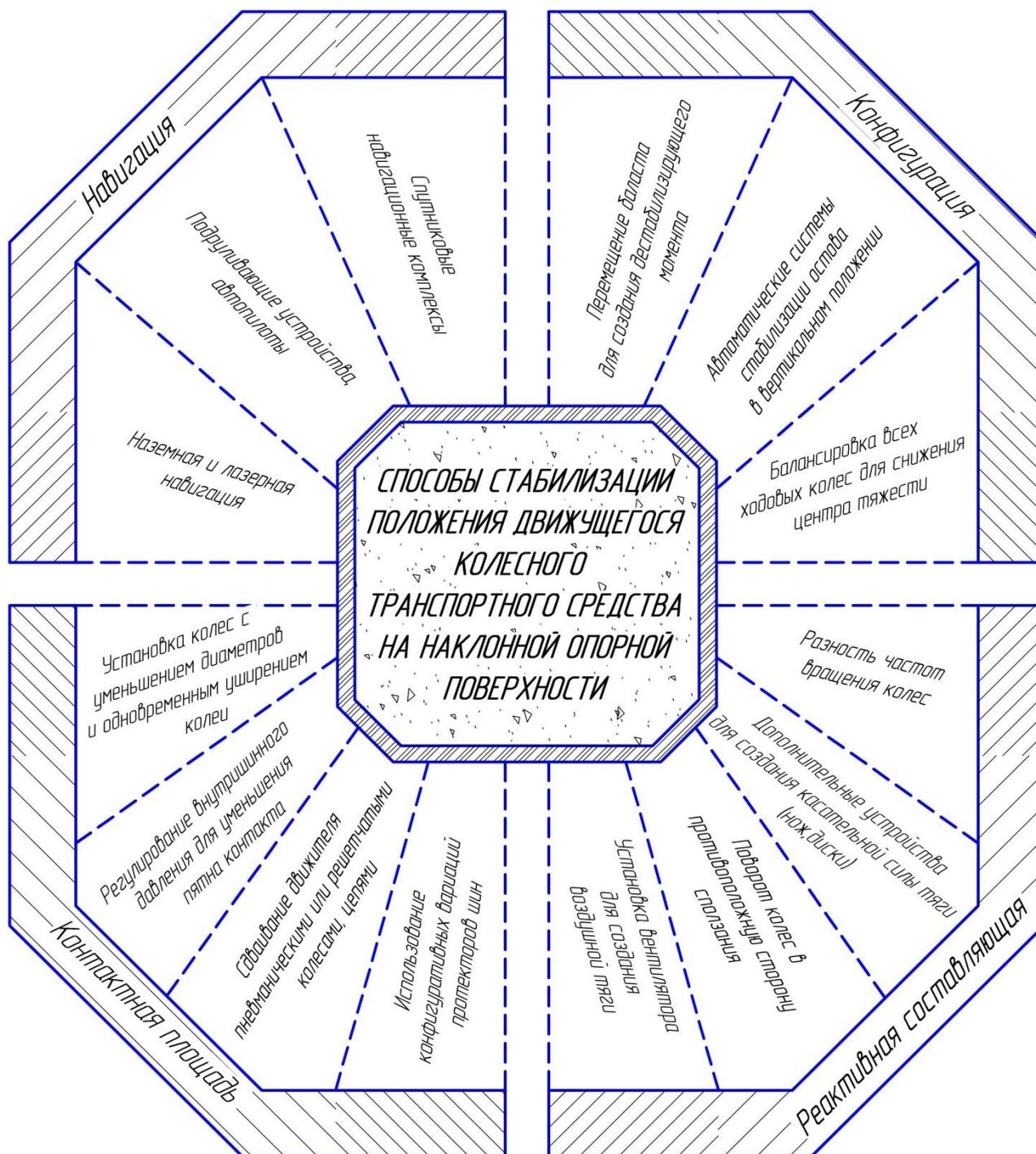


Рисунок 1.10 – Анализ путей и технических решений вопросов устойчивости движения колесных машин

1.4 Исследование направлений теоретического анализа динамики тяговых средств на негоризонтальной опорной поверхности

В 1963 году на специальной сессии Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук имени В.И. Ленина, где были рассмотрены вопросы механизации сельскохозяйственных работ в условиях ландшафтной нестабильности, была принята рекомендация, основанная на многолетних исследованиях ученых, занимающихся изучением склонного земледелия, которая предполагала необходимость и обязательность проведения основных видов обработки почвы, посева и ухода за сельскохозяйственными культурами исключительно поперек склона.

Однако создание теоретических предпосылок при разработке специализированной техники требовала методики оценки устойчивости МЭС. Это вызвано сложностью оптимизации режимных показателей МТА и технологичности проектируемых его модификаций, предназначенных для склонного земледелия. В частности, для оценки курсовой устойчивости Д.И. Мельников [77] исследовал процесс отклонения от траектории движения трактора в междурядьях, в результате чего был установлен коэффициент устойчивости движения

$$K_{UD} = 1 - \sqrt{\frac{V_{CB} - v_T t_B \sin \frac{v_T t_B}{R_{ПОВ}}}{v(t_0 + t_B \sin \frac{v_T t_B}{R_{ПОВ}}) - V_{CB}}},$$
 где учитывается не только радиус поворота

$R_{пов}$ и скорость движения трактора v_T , но и ширина свободной зоны в междурядьях V_{CB} , а также время отклонения t_0 и выравнивания траектории t_B трактора на участке длиной S . При такой постановке вопроса траекторию движения трактора можно рассматривать как кривую, близкую по виду к синусоиде, что позволило определить критические значения отклонений на установленном участке пути при любых ландшафтных характеристиках.

Теория Д.И. Мельникова получила свое развитие в научных исследованиях С.С. Шадрина, лежащих в основе создания методики расчетной оценки параметров управляемости и устойчивости машины, базирующейся на получении исход-

ных данных в результате ограниченного количества полигонных испытаний, таких как продольная и боковая скорости, угловая скорость относительно вертикальной оси, угол поворота рулевого колеса, для создания математической модели движения машины. Предлагаемый теоретический комплекс основан на расчетной зависимости «приведенной» боковой реакции, действующей в пятне контакта пневматической шины с опорной поверхностью, от угла увода при нестационарном движении. Это позволяет оценивать динамику движения исследуемого объекта посредством имитационного моделирования, что может быть применимо для сокращения сроков проектирования, испытаний, доводки автоматизированных технических систем, проведения научно-исследовательских конструкторских работ.

Расширение методологической базы всегда находилось в прямой зависимости от масштаба факторного комплекса, используемого в научно-исследовательских процедурах, о чем говорят работы таких ученых, как Л.Л.Гинцбург, Ю.Л. Мариенбах, Е.Е.Черейский [2;27;41;62], которыми были установлены зависимости между отклонением машины от заданной траектории и средним углом поворота рулевого колеса, кроме того, их исследования явились теоретическими предпосылками при оценке влияния средней угловой скорости поворота рулевого колеса, среднего угла отклонения остова от заданного курса и средней скорости бокового смещения кузова на стабилизацию курсовой устойчивости движения.

Фактически все исследователи работали над целевой формализацией процессов взаимодействия технических элементов и биологической среды, что было необходимо в дальнейшем для создания МТА с высоким уровнем технологичности, который явился для многих ученых оценочным показателем потенциала реализации функциональных характеристик транспортного средства в заданном коридоре движения. Об этом подробно изложено в работах В.А. Кима [57;124]. В связи с этим большой интерес для ученых, занимающихся проблемой курсовой стабилизации машин, представляют исследования критических скоростей движения на негоризонтальных поверхностях и определение предельных углов наклона

несущих опорных грунтов, на которых работают МТА. Методы математического анализа представленные в работах А.М. Атаносова, Т.В.Хухуни [27;114], К.Krombholz, R. Persching, H. Spenser [27;122;123], делают доступным формирование проектного комплекса и определения параметров технологических режимов для тяговых средств, работающих в составе машинно-тракторных агрегатов. В этом же аспекте проводились теоретические исследования специалистами в области устойчивости движения Р.Р. Двали, О.В. Маргвелашвили, В.В. Махалдиани [27;46;47;76], направленные на изучение функции изменения пространственных координат машины в процессе перемещения на различных почвенных фонах, а также исследование курсовой устойчивости при различных степенях свободы и перераспределения нормальных реакций на элементах движителя колёсной машины.

Одним из основных факторов, влияющих на устойчивость движения МТА, является боковая составляющая веса машины, которая пропорциональна углу наклона опорной поверхности и при качении вызывает поперечные сдвиги почвы в пятне контакта с движителем и деформацию эластичного колеса. Одним из первых ученых, который занимался теорией качения эластичного колеса, является Е.А. Чудаков [115]. Развитие указанной теории, в частности, изучение явления бокового увода, получило в трудах Д.А.Антонова, Е.Ю. Ечеистова, В.В. Гуськова, В.И. Кнороза, Я.М. Певзнера, Я.Е. Форобина, А. Julien, В.Schlippe, R. Dietrich, W. Bergman, G.Freudenstein и др. [27;42;86]. Ими получен большой объем экспериментальных данных о влиянии на увод шины её конструктивных параметров: давления воздуха, нормальной нагрузки, продольных сил, развала колеса и др. На основании трудов указанных ученых была разработана теория бокового увода шин, в частности, гипотеза Рокара [94], в которой исследовали боковую силу $P_y = K_y \cdot \delta$, действующую на шину. Боковая сила в данной гипотезе пропорциональна углу бокового увода δ и коэффициенту сопротивления уводу шин K_y . Однако в гипотезе Рокара не были учтены вертикальные колебания колеса, наклоны и момент, возникающий при скручивании шины.

Дальнейшее развитие теории бокового увода шин осуществлено В.Е. Красильниковым в методике определения зависимости боковой силы от угла увода на деформируемой почве. В.Е. Красильников исследовал боковой увод шины как сумму увода эластичной шины и увода, обусловленного деформацией почвы [60], но в предложенной им методике не было учтено такое явление, как буксование колес.

Это явление было рассмотрено в трудах А.Ф. Андреева [3], В.Г. Яровой [121], где были описаны зависимости коэффициента сопротивления уводу от величины продольных сил и буксования колеса. Также необходимо отметить, что явление бокового увода тракторных шин изучали П.А.Кудинов [61], И.М. Лутаев, О.В. Маргвелашвили [76], В.А. Мещеряков [79], А.Ф. Полетаев, А.С. Шарара [116] и др. Но наиболее полно описан процесс качения колеса в теории кинематических связей М.В. Келдыша. В работе М.В. Келдыша показана сложная деформация шины и определены уравнения кинематических связей при качении без проскальзывания по плоской поверхности под действием постоянной нормальной нагрузки. В данной теории реакции опорной поверхности на шину выражаются через деформации пневматики. Разработанное учение легло в основу теоретического исследования устойчивости движения колесных машин таких ученых как Я.М. Певзнер [86], И.К. Пчелин, А.А. Хачатуров [91;92], Ю.И. Неймарк, Н.А.Фуфаева[83], Е.Ю. Малиновский, М.М. Гайцгори [73]. В их работах также анализируются математические модели механизмов и машин, разработанные для целевой модернизации сельхозтехники, предназначенной для склонового земледелия.

Исследователь П.М. Пасенченко, изучавший устойчивое движение машин поперек склона, определил эмпирическую зависимость угла бокового увода шин колес задней оси от угла склона и внутришинного давления. Однако данная зависимость не учитывает перераспределение нормальных реакций по бортам, вызванное креном трактора, обусловленных разностью сопротивлений качению верхних и нижних по склону колес, являющееся основным фактором, провоцирующим отклонение машины от заданного курса.

Профессор Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова В.В. Поддубный свои исследования посвятил разработке модели системы «опорная поверхность–шина–колесная машина–система управления движением», где использован современный мехатронный принцип построения динамических систем, позволяющий воспроизвести пространственную, динамическую, многоэлементную, регулируемую систему с применением основных положений механики, электроники и теории регулирования. В частности, для максимального приближения модели к реальному объекту и введения внутренних сил и моментов для моделирования движения колесных машин, регулирования и управления ими В.В. Поддубным был предложен метод описания внутреннего силового взаимодействия между телами системы [89].

В настоящее время при проектировании мобильных систем и их эксплуатационных режимов используются методы математического описания моделей для определения стационарных силовых характеристик шин, полученных на основании экспериментальных исследований закономерности скольжения протектора и распределения напряжений в контакте шины с опорной поверхностью [89;93].

Современные методы исследования динамической системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением» делают возможным определение главного вектора и главного момента силового взаимодействия с опорной поверхностью при неустановившемся движении и одновременном действии продольных и поперечных сил. Более того, математическая модель пневматического колеса учитывает действие микрорельефа опорной поверхности и наклон плоскости обода колеса, что позволяет исследовать перераспределение вертикальных реакций по бортам колесного движителя. В последние годы доказана взаимосвязь между перераспределением вертикальных реакций в колесном движителе и величиной поворачивающего момента, являющегося причиной увода машины с предполагаемой траектории. Это описано в работах ученых Г.И. Шайшмелашвили, Г.Д. Гогелидзе, О.В.Маргвелашвили [76], И.М. Лутаева [69]. Проведенные исследования модели пневматического колеса при качении на грунтах с различными углами наклона и изменением внутришинного давления показа-

ли, что уменьшение углов бокового увода пневматических шин возможно в том случае, если плоскость обода колеса имеет вертикальное расположение, т.е. колесо стабилизировано. Такой подход позволил ученым создать теорию, на основе которой предложен метод траекториальной стабилизации транспортного модуля, получивший развитие в двух направлениях. Во-первых, предложено обоснование режимных параметров, устраняющих поворачивающий момент с пролонгированием в техническое решение стабилизации остова машины, и во-вторых, создание математической модели, позволяющей использовать дестабилизирующие моменты в качестве положительного фактора при удержании машины в заданном коридоре движения. Оба направления имеют общую тенденцию к манипулированию координаты центра масс машины, в первом случае в вертикальной плоскости при сложных конструктивных реализациях и во втором – в горизонтальной плоскости, позволяющей упростить целевые проекты модификации машин для склонного земледелия [93].

Однако решить проблему стабилизации курсовой устойчивости на склоне достаточно сложно, если принимать во внимание фактор крюковой нагрузки, поскольку выполнение технологических операций производится машинно-тракторным агрегатом, а воздействие тягового сопротивления на трактор приводит к его «рысканию» в коридоре движения. Это отмечено в работах Л.В.Гячева [45], Э.С. Гаспаряна, А.В. Войтикова и Э.С.Мирзоева [27]. Особое внимание в работах уделяется влиянию величины тяговой нагрузки и ее смещения относительно продольной плоскости симметрии трактора на устойчивость его движения по заданному курсу. Теоретически доказан и имеет достоверное эмпирическое подтверждение тот факт, что курсовая устойчивость трактора выше при работе с навесными агрегатами, чем с прицепными [27], причем траектория движения МТА имеет колебательный характер, среднеквадратичные отклонения которой с ростом крутизны склона возрастают.

Таким образом, в условиях склонного земледелия инновационной считается разработка способов стабилизации курсового движения в пределах защитной зоны в соответствии с маршрутизированной траекторией. Это направление развития

технологичности МЭС всегда было приоритетным и остается актуальным на сегодняшний день, поскольку определяется сложным комплексом функциональных взаимодействий между элементами технической и биологической систем.

Существующие методы стабилизации движения машин, относящиеся к актуальным направлениям прогнозирования технического прогресса в аграрных технологиях, не полностью решают проблемы устойчивого движения МЭС при реализации сельскохозяйственных технологических операций на наклонной поверхности в условиях ландшафтной нестабильности и грунтах с малой несущей способностью. В связи с этим в данной работе была поставлена цель и определены задачи исследования (рисунок 1.11).

Выводы:

1. В результате проведенного анализа научных работ в области обоснования закономерности функционирования механизированных технологий АПК, связанных с проблемой обеспечения роста эффективности производства продуктов растениеводства, установлено, что повышение курсовой устойчивости колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на негоризонтальных опорных поверхностях повлияет на сокращение потерь сельскохозяйственной продукции и энергетических затрат, увеличит производительность тягового средства и улучшит условия труда оператора.

2. Изученная ландшафтная специфика земельных сельскохозяйственных угодий (на примере Оренбургской области) показала актуальность научных исследований, направленных на стабилизацию движения МТА на склонах во время выполнения сельскохозяйственных операций для соблюдения агрономических требований.

Цель исследования. Повышение курсовой устойчивости колесного трактора при работе на негоризонтальной опорной поверхности.

Задачи диссертационного исследования

1. Исследовать влияние конструктивно-режимных параметров колёсного трактора и ландшафтных факторов на процесс полного поперечного смещения движущегося МТА от технологического коридора в условиях склонного земледелия.

2. Разработать метод оптимизации углов увода шин пневматических колёс адекватно компенсации полного поперечного смещения трактора от заданной траектории при выполнении работ в растениеводстве.

3. Исследовать зависимость интенсивности износа протектора пневматической шины движущегося трактора по наклонной опорной поверхности от его конструктивно-режимных параметров с учётом крюковой нагрузки.

4. Разработать алгоритм и компьютерную программу для реализации математического эксперимента при исследовании характеристик надежности рабочих элементов протектора, взаимодействующих с наклонной опорной поверхностью.

5. Провести производственные испытания колёсного трактора при его работе в режиме варьирования углов увода шин и дать экономическое обоснование целесообразности внедрения предлагаемого способа.

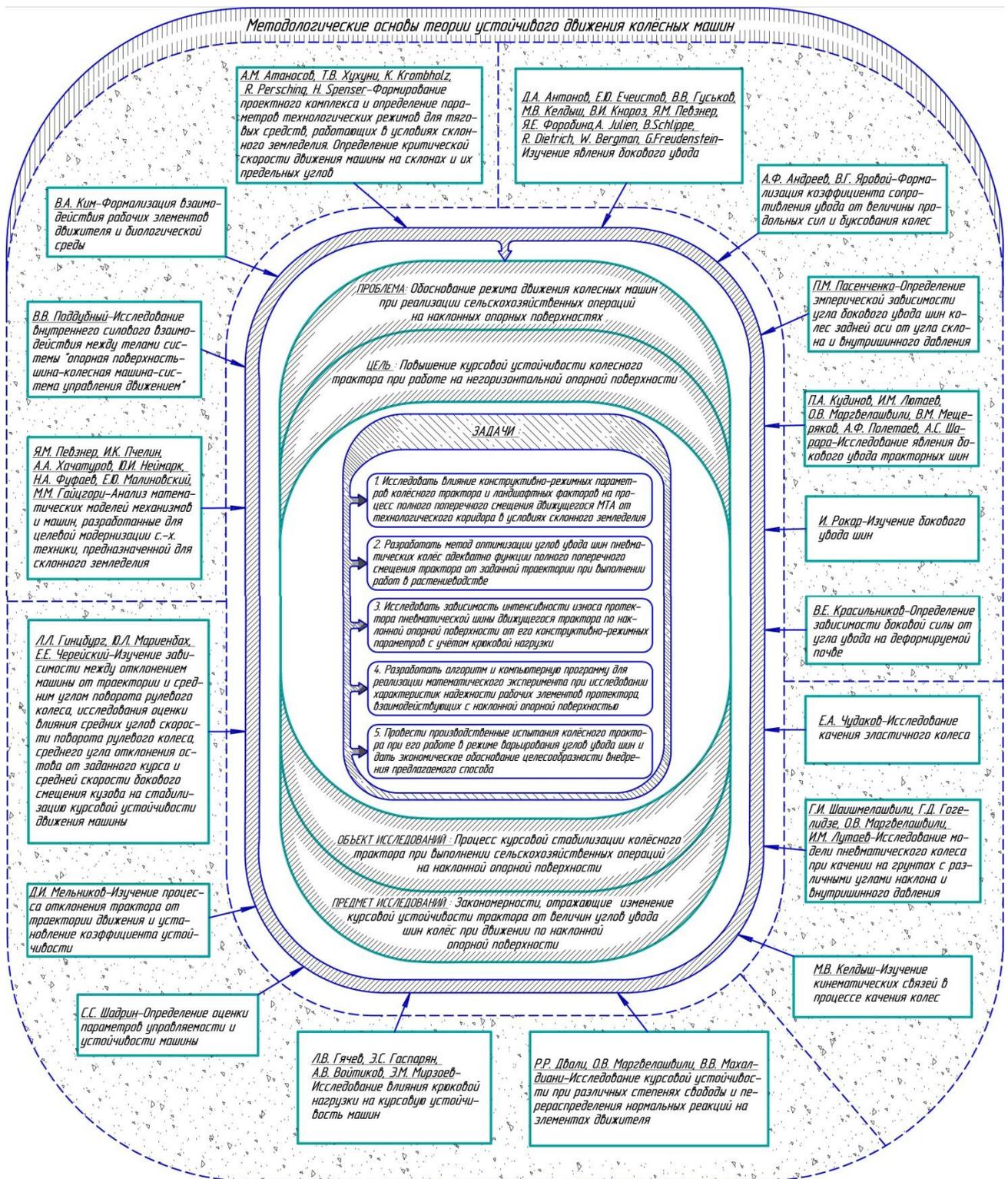


Рисунок 1.11 – Обоснование проблемы, цели и задач посредством методологических основ теории устойчивого движения колесных машин

2 Теоретическое обоснование способа повышения курсовой стабилизации колёсного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на наклонной опорной поверхности

2.1 Методика определения величины поперечного смещения колёсного трактора на наклонной опорной поверхности

Режим движения технологического агрегата находится в непосредственной функциональной связи с ландшафтной спецификой, структурой почвы, скоростью движения и конструктивным исполнением трактора. Трактор как ведущий элемент такого агрегата обладает шестью степенями свободы. Однако при движении поперёк склона тяговое средство тенденциозно отклоняется от направления движения вниз по склону. Это объясняется воздействием на машину составляющей силы тяжести, направленной по наклонной поверхности к её основанию, при условии недостаточной поворачиваемости серийной конструкции колёсного движителя [2;93;115].

Таким образом, под действием боковой силы шина колеса деформируется в поперечном направлении. При этом след её отклоняется от продольной плоскости колеса. В результате действия составляющей силы тяжести и появления углов бокового увода происходит смещение тягового средства по нормали от траектории движения. Величина смещения не должна превосходить ширину защитной зоны технологического коридора [2;27]. Как известно, ширина защитных зон $b_{з.з.}$ посаженных культур при первых обработках составляет 0,2...0,3м, а только затем их ширина устанавливается в зависимости от степени развития растений. Выбор допустимой величины коридора движения определяется спецификой работы трактора. При отсутствии жестких агротехнических требований величина коридора движения должна выбираться из соображения экономичности и безопасности работы [27].

Наряду с самопроизвольным уводом может иметь место скольжение по грунту как передних, так и задних колёс. Скольжение в основном зависит от фи-

зико-механических свойств почвы, угла склона и нагрузки на колёса. Одновременное скольжение передних и задних колёс увеличивает поперечное смещение трактора от траектории пути [2;4].

Таким образом, движение машины, реализуемое в технологическом коридоре, должно быть основано на эффекте возврата машины на величину, равную полному поперечному смещению.

Полное поперечное смещение складывается из бокового увода колёс и величины скольжения в связи с разрушением почвенного слоя [2,11] (рисунок 2.1):

$$l_{\text{полн}} = l_{\text{ск}} + l_{\text{ув.}}^{\text{нед.п.}}, \quad (2.1)$$

где $l_{\text{полн}}$ – полное поперечное смещение трактора от заданной траектории, м;
 $l_{\text{ск}}$ – смещение, вызванное поперечным скольжением трактора по опорной поверхности, м;
 $l_{\text{ув.}}^{\text{нед.п.}}$ – смещение, вызванное углами увода трактора при его недостаточной поворачиваемости, м.

Полное поперечное смещение не должно превышать допустимую ширину защитной зоны ($l_{\text{полн}} \leq 0,2 \dots 0,3\text{м}$).

Смещение, вызванное углами увода трактора при его недостаточной поворачиваемости, определяется как (рисунок 2.1):

$$l_{\text{ув.}}^{\text{нед.п.}} = L_{\text{пр.}} \cdot \text{tg}\delta, \quad (2.2)$$

где $L_{\text{пр}}$ – длина прямолинейной траектории, м;

δ – угол бокового увода центра тяжести трактора, рад.

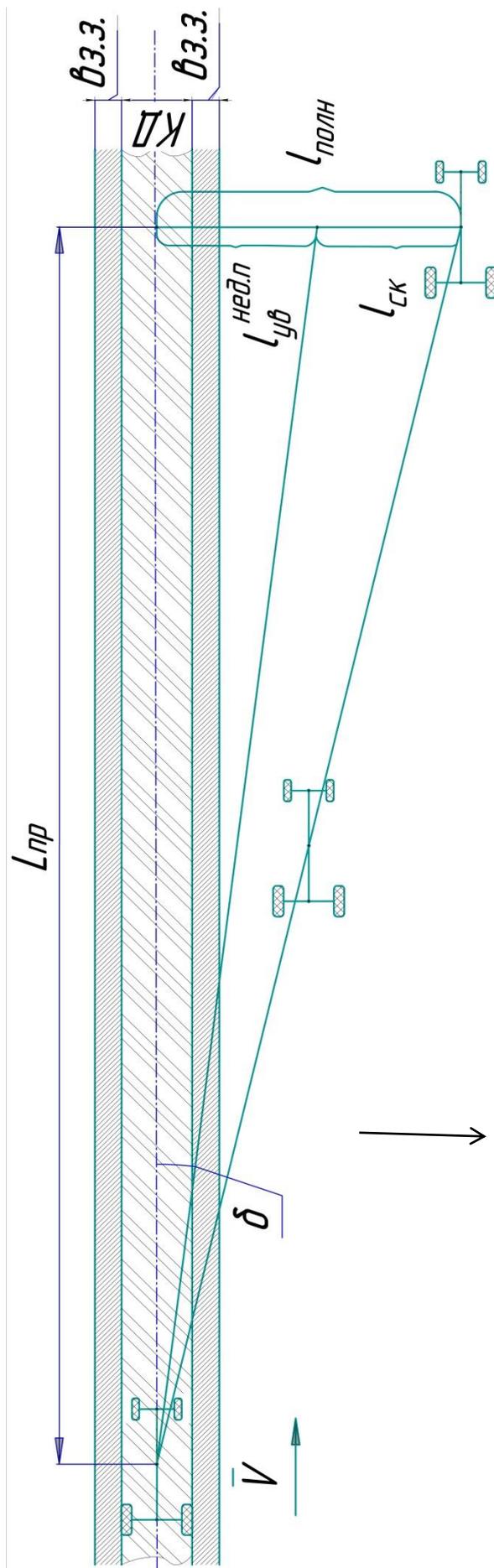


Рисунок 2.1 – Схема полного поперечного смещения трактора от технологической траектории: $l_{\text{полн}}$ – полное поперечное смещение трактора от заданной траектории; $l_{\text{ск}}$ – смещение, вызванное поперечным скольжением трактора по опорной поверхности; $l_{\text{ув. нед.п.}}$ – смещение, вызванное углами увода трактора при его недостаточной поворачиваемости; $L_{\text{пр}}$ – длина прямой траектории; $в_{3.3}$ – ширина защитной зоны; $КД$ – ширина коридора движения; \downarrow – градиент склона

В результате параметрического анализа функции полного поперечного смещения установлено, что диапазон значений смещения от увода реализуется в рамках физической модели, адекватной реальным технологическим условиям, а величина смещения, вызванного скольжением машины по опорной поверхности определяется физико-механическими свойствами почвы и её ландшафтными характеристиками. В связи с этим необходимо задать режим движения колёсной машины таким образом, чтобы не только исключить смещение от увода при незначительных изменениях в её конструкции, но и компенсировать смещение от скольжения, независимо от качества опорной наклонной поверхности. Для этого необходимо установить функционально-параметрические зависимости эксплуатируемого тягового средства и их влияние на проявление увода и характеристики процесса смещения.

Кроме того требуется исследовать функции углов увода шин передних δ_1 и задних δ_2 колёс в различных технологических условиях. В этой связи особую ценность представляет научно-методический подход В.П.Бойкова, направленный на изучение вопросов, связанных с характеристиками увода тракторных шин. В частности, приведена формула для получения углов увода передних и задних колёс [24]:

$$\delta_1 = \frac{G \cdot \sin \alpha}{K_{y1}}, \quad (2.3)$$

$$\delta_2 = \frac{G \cdot \sin \alpha}{K_{y2}}, \quad (2.4)$$

где δ_1 – угол увода переднего колеса, рад;

δ_2 – угол увода заднего колеса, рад;

G – вес трактора, Н;

α – угол склона, рад;

K_{y1} – коэффициента сопротивления боковому уводу переднего колеса;

K_{y2} – коэффициента сопротивления боковому уводу заднего колеса.

Используя полученное автором [24] выражение коэффициента сопротивления боковому уводу:

$$K_y = C_1 + C_2 \cdot p_\omega \cdot G \cdot \cos \alpha, \quad (2.5)$$

где C_1, C_2 – коэффициенты аппроксимации характеристик бокового увода шин;

p_ω – давление воздуха в шине (Па), можно установить искомую зависимость для углов δ_1 и δ_2 посредством уравнения:

$$\delta_1 = \frac{G \cdot \sin \alpha}{C_1 + C_2 \cdot p_{\omega 1} \cdot G \cdot \cos \alpha}, \quad (2.6)$$

$$\delta_2 = \frac{G \cdot \sin \alpha}{C_1 + C_2 \cdot p_{\omega 2} \cdot G \cdot \cos \alpha}, \quad (2.7)$$

представляющего возможность алгоритмировать необходимые вычислительные процедуры без дополнительных экспериментальных исследований конкретных типов шин, основываясь только на значениях коэффициентов аппроксимации характеристик их бокового увода (рисунок 2.2).

Для дальнейшей реализации аналитических и экспериментальных процедур конструктивно-режимных исследований в настоящей работе будет делаться акцент на параметрические характеристики трактора МТЗ-82.1. В данной модели при существующих передаточных отношениях межосевого привода комплект шин подбирается исходя из условия, что соотношение свободных диаметров d_1 и d_2 шин передних и задних колёс должно быть $d_1/d_2 = 0,64$. Такому условию удовлетворяет следующая комплектация шин: 11,2-20 и 15,5R38; 13,6-20 и 16,9R38; 16-20 и 18,4R38 [24]. Вследствие были определены по аналитической зависимости $\delta_{1;2} = f(p_{\omega 1;2}, \alpha, G, C_1, C_2)$ углы бокового увода трактора МТЗ -82.1, оборудован-

ного шинами на передних и задних колёсах соответственно 11,2-20 модели Ф-35-1 и 15,5R38 модели Ф-2А на различных склонах (рисунок 2.3).

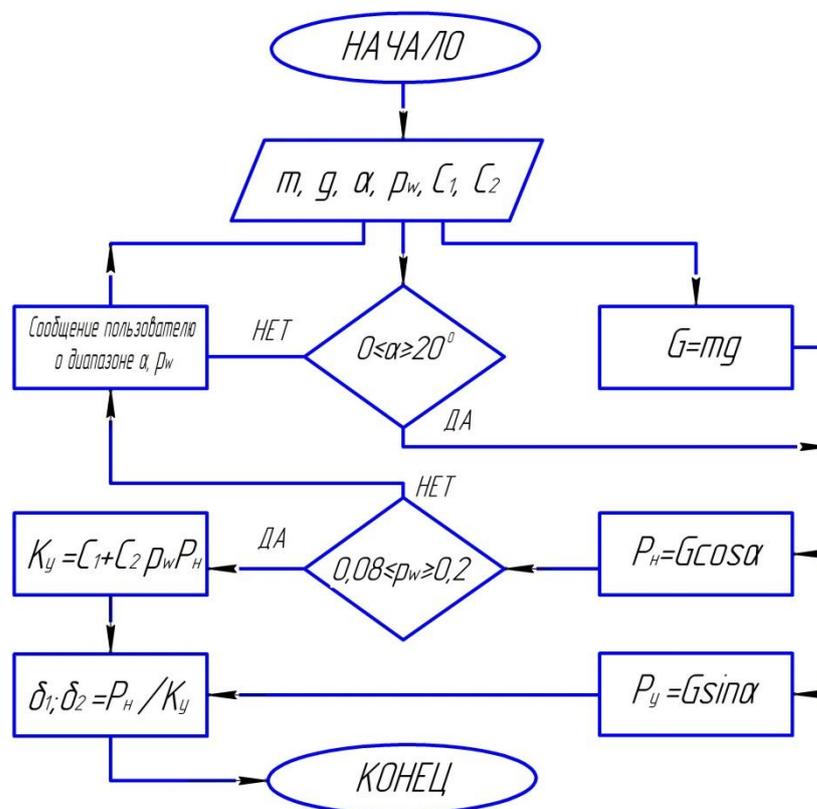


Рисунок 2.2 – Алгоритм расчета углов увода пневматических шин

По данным графикам возможно определить оптимальные значения углов бокового увода колёс на склоне в интервале исследования $[5^0; 30^0]$ при различных давлениях воздуха в шинах. Условия функционирования пропашных тракторов в технологических процессах сельскохозяйственного производства предусматривают проведение работ на опорных поверхностях с наклоном до 20^0 . В связи с этим необходимо было рассмотреть интервалы полученных углов увода (рисунок 2.3) на склонах от 5 до 20^0 . Из графиков видно, что интервалы изменения углов бокового увода задних колёс значительно меньше, чем в передних колесах, что говорит о нецелесообразности дальнейших исследований эффективности изменения давления в данных шинах. Кроме того, при наличии крюкового сопротивления нагрузка распределяется в основном на задние колёса, что делает непрактичной реализацию перепада внутришинного давления в них [11].

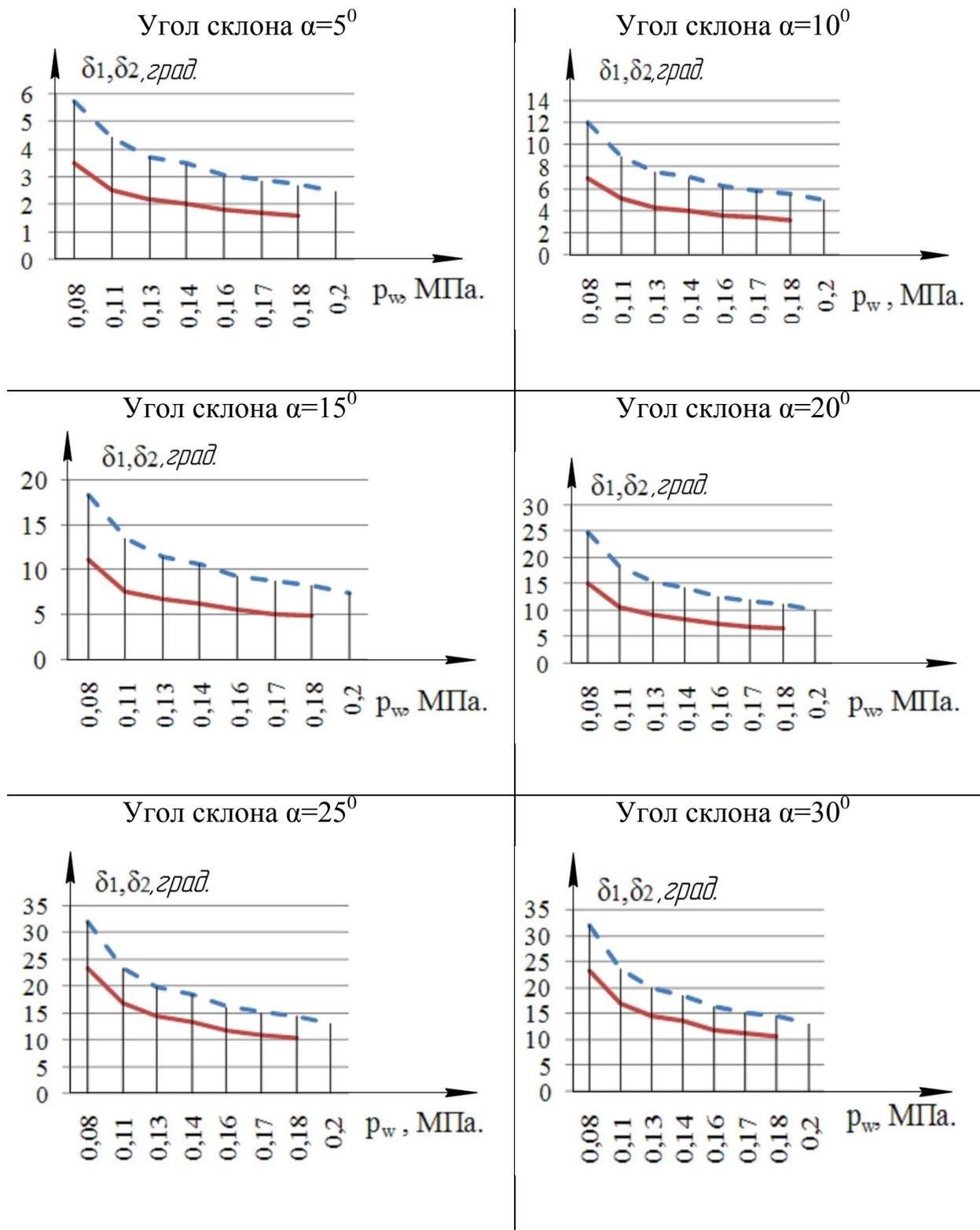


Рисунок 2.3 – Зависимость углов бокового увода колес шин 11,2-20 модели Ф-35-1 и 15,5R38 модели Ф-2А от внутришинного давления на различных склонах: - - - – угол бокового увода δ_1 шины 11,2-20 модели Ф-35-1, град.; — – угол бокового увода δ_2 шины 15,5R38 модели Ф-2А, град.

Как известно, увеличение буксования, влияющее на интенсивность изнашивания шин, прямо пропорционально углам бокового увода колёс, которые не должны превышать допустимое значение 15° [24]. В связи с этим необходимо подбирать внутришинное давление в шинах, чтобы углы увода не превышали 15° .

2.2 Методика теоретического исследования влияния углов бокового увода на поперечное смещение движущейся колёсной машины на негоризонтальном участке пути

Для обоснования способа курсовой стабилизации колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операции на наклонной опорной поверхности посредством компенсации полного поперечного смещения машины при движении по склону целесообразно проанализировать процесс поворота машины на плоскости, при котором возникает центробежная сила, создающая углы бокового увода в пневматических шинах. Аналогичное явление можно наблюдать при движении машины на склоне, где роль центробежной силы будет выполнять составляющая силы тяжести при условии реализации бесконечно большого радиуса поворота, чем и является технологическая траектория [115]. При конструктивном исполнении ходовой части с излишней поворачиваемостью центр поворота машины располагается выше по склону, что позволяет осуществить поворот вверх и тем самым компенсировать поперечное смещение, вызванное скольжением. В данном случае будет отсутствовать смещение машины, заданное углами увода колёс при условии её недостаточной поворачиваемости ($l_{ув.}^{нед.п.} = 0$) (приложение 1, приложение 2).

Для стабилизации агрегата на технологической траектории необходимо соблюдение аналитического условия, при котором смещение от скольжения машины вниз теоретически равно смещению мобильного средства вверх по склону, вызванному излишней поворачиваемостью, и следовательно, равно полному поперечному смещению (рисунок 2.4)[11,103]:

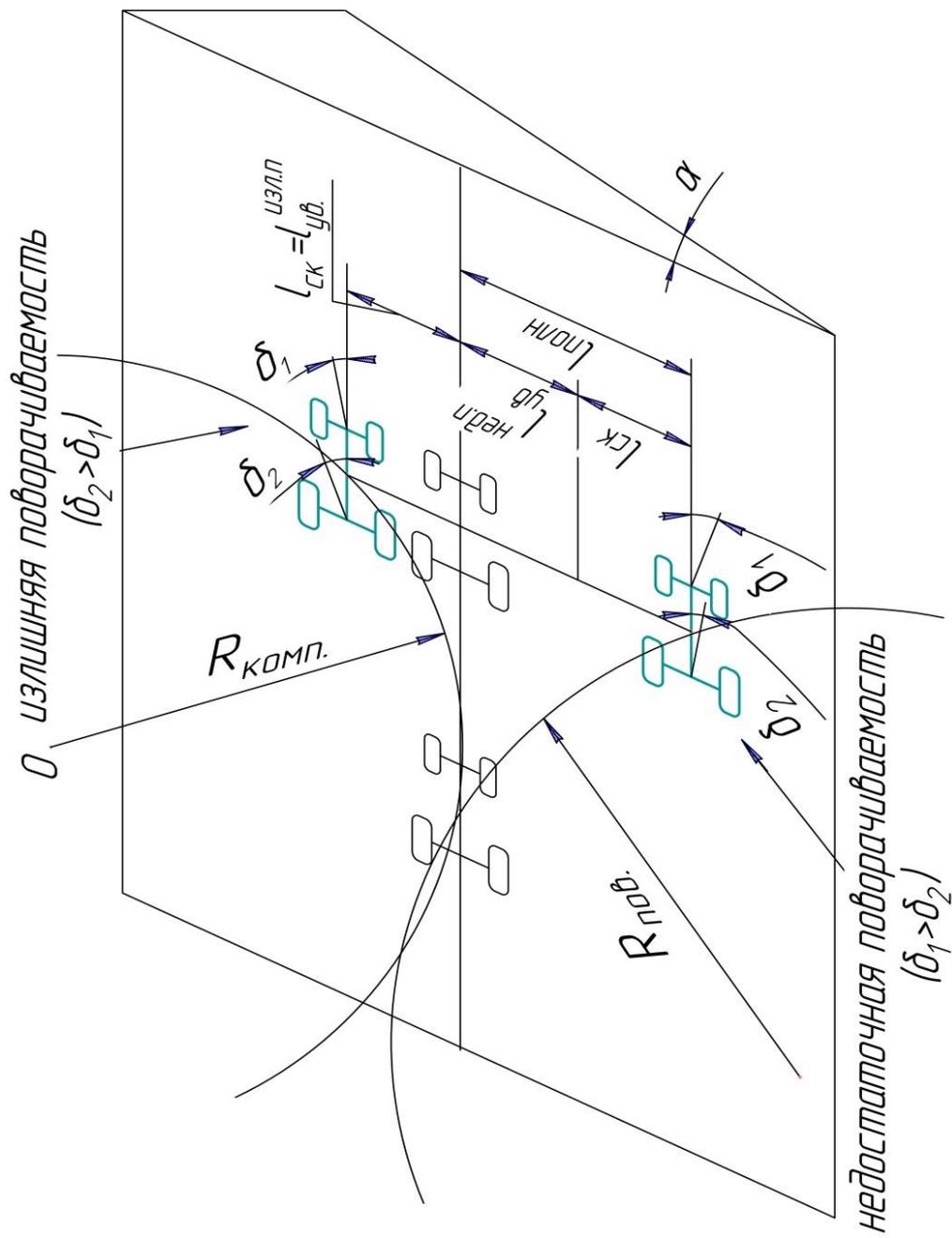


Рисунок 2.4 – Схема компенсации смещения колесной машины от технологической траектории: $R_{комп}$ – компенсационный радиус; $R_{пов.}$ – радиус поворота, м; $R_{комп.}$ – компенсационный радиус, м.

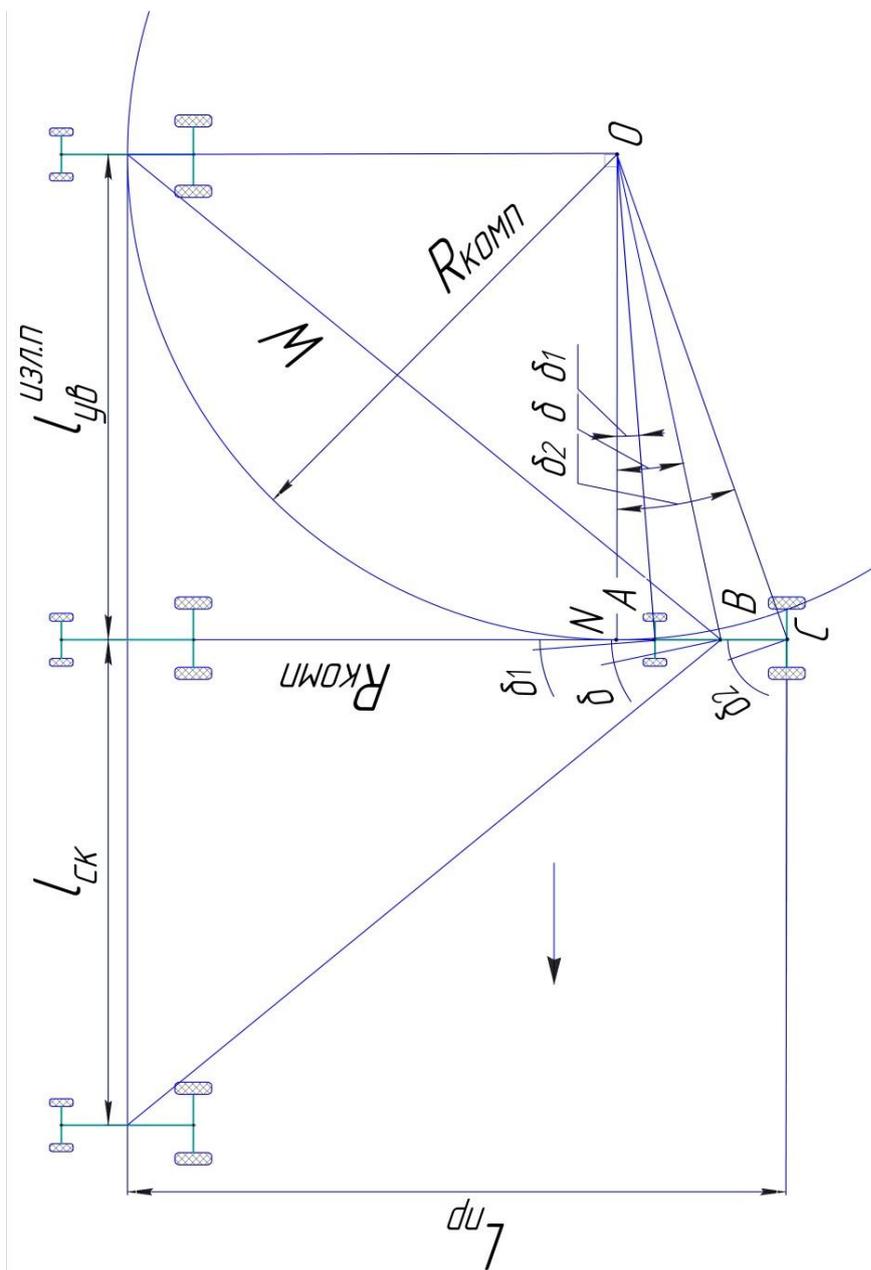


Рисунок 2.5 – Схема компенсационного смещения трактора: $R_{\text{КОМП}}$ – компенсационный радиус; B – центр тяжести машины; w – величина, равная хорде окружности поворота трактора; $L_{\text{УВ}}^{\text{ИЗЛ.П.}}$ – смещение, вызванное углами увода трактора при условии его излишней поворачиваемости; A, C – точки центра соответственно передней и задней осей; N – точка пересечения нормали, проведенной из центра поворота машины на ось коридора движения \leftarrow – градиент склона

$$l_{\text{СК}} = l_{\text{ув.}}^{\text{изл.п.}} = l_{\text{полн}}, \quad (2.8)$$

где $l_{\text{ув.}}^{\text{изл.п.}}$ – смещение, вызванное углами увода трактора при условии его излишней поворачиваемости (м), которое определяется как (рисунок 2.5):

$$(l_{\text{ув.}}^{\text{изл.п.}})^2 = w^2 - L_{\text{пр.}}^2. \quad (2.9)$$

$w = 2 \cdot R_{\text{комп.}} \cdot \sin\left(\frac{\pi + \delta}{2}\right)$ – длина хорды окружности поворота трактора вверх при условии излишней поворачиваемости, м (рисунок 2.5),

где $((\pi/2 + \delta)/2)$ – центральный угол, рад;

δ – угол увода центра тяжести машины, рад.

В первом приближении величина смещения, вызванная углами увода трактора при условии его излишней поворачиваемости, определяется из условия отличия длины хорды от длины дуги на участке прямолинейной траектории не более 5%.

Предлагаемое логическое построение предполагает необходимость выражения функции компенсационного радиуса от углов увода колёс переднего и заднего мостов. В этой связи необходимо отметить, что для компенсации поперечного смещения, вызванного скольжением, следует рассматривать длину прямолинейной траектории равную сумме компенсационного радиуса, вызванного поворотом трактора с излишней поворачиваемостью вверх, и геометрического элемента $|NB|$, то есть, м:

$$L_{\text{пр.}} = R_{\text{комп.}} + NB. \quad (2.10)$$

Следовательно, поперечное смещение от скольжения можно выразить как, м:

$$l_{\text{СК}} = l_{\text{ув.}}^{\text{изл.п.}} = l_{\text{полн}} = \sqrt{\left(2 \cdot R_{\text{комп.}} \cdot \sin\left(\frac{\pi + \delta}{2}\right)\right)^2 - (R_{\text{комп.}} + |NB|)^2}. \quad (2.11)$$

Для получения аналитических уравнений необходимо иметь в виду, что как углы бокового увода передних управляемых колёс, так и углы бокового увода задних ведущих колёс равны по принципу соответствия осевому расположению и изменяются одинаково вследствие регулирования давления в шинах. Более того, при дальнейшем развитии аналитических процедур необходимо учитывать как координаты центра тяжести машины, так и координаты центра поворота, которые являются составляющими комплекса предпосылок для определения компенсационного радиуса $R_{\text{комп.}}$.

Компенсационный радиус $R_{\text{комп.}}$ является результатом анализа геометрии с использованием конфигуративно-параметрической модели в фазовых фиксациях тягового средства (рисунок 2.5) и выражается, м:

$$R_{\text{комп.}} = |BO| = \sqrt{|NO|^2 + |NB|^2}. \quad (2.12)$$

В соответствии с функциональной тригонометрией технологической маршрутизации получили величины, равные $|NO| = |AO| \cdot \cos\delta_1$, $|NB| = |NC| - |BC|$ и $|NC| = |CO| \cdot \sin\delta_2$.

В результате математических преобразований формализация компенсационного радиуса траектории движения тягового средства вверх будет выглядеть следующим образом, м:

$$R_{\text{комп.}} = |BO| = \sqrt{(|AO| \cdot \cos\delta_1)^2 + (|CO| \cdot \sin\delta_2 - |BC|)^2}. \quad (2.13)$$

В связи с тем, что

$$|AO| = \frac{|NA|}{\sin \delta_1} = \frac{|NC| - |AC|}{\sin \delta_1} = \frac{|CO| \cdot \sin \delta_2 - |AC|}{\sin \delta_1}. \quad (2.14)$$

Исходя из условия

$$|CO| = \frac{|NO|}{\cos \delta_2} \quad (2.15)$$

и принимая во внимание выражение:

$$|AC| = |NC| - |NA| = |NO| \cdot \operatorname{tg} \delta_2 - |NO| \cdot \operatorname{tg} \delta_1, \quad (2.16)$$

тогда необходимо установить зависимость:

$$|NO| = \frac{|AC|}{\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1} \quad (2.17)$$

Тогда:

$$|CO| = \frac{|AC|}{(\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1) \cdot \cos \delta_2}. \quad (2.18)$$

И из чего следует:

$$|AO| = \frac{|AC|(\operatorname{tg} \delta_2 - 1)}{(\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1) \cdot \sin \delta_1}. \quad (2.19)$$

В результате, искомый компенсационный радиус можно сформулировать выражением, м:

$$R_{\text{комп.}} = \sqrt{\left(\frac{AC \cdot (\operatorname{tg} \delta_2 - 1) \cdot \operatorname{ctg} \delta_1}{(\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1)}\right)^2 + \left(\frac{AC \cdot \operatorname{tg} \delta_2}{(\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1)} - BC\right)^2}. \quad (2.20)$$

В свою очередь величина $|NB|$ определяется как, м:

$$|NB| = |NC| - |BC| = |CO| \sin \delta_2 - |BC| = \frac{|AC| \cdot \operatorname{tg} \delta_2}{(\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1)} - |BC|. \quad (2.21)$$

Из анализа полученного выражения 2.20 видно, что наиболее значимой при реализации вычислительных процедур является величина $\operatorname{ctg} \delta_1$, что в технологическом аспекте значительно упрощает проблему инновационирования предлагаемого метода при его технической реализации, поскольку величину угла бокового увода задних колёс можно принять как const по возможно наибольшему значению (таблица 2.1). Следовательно, величина внутришинного давления задних колёс будет соответствовать наименьшему допустимому значению в соответствии с эксплуатационными требованиями. Это позволяет варьировать величинами углов бокового увода передних колёс в предельно допустимом диапазоне.

Таблица 2.1 – Значения угла увода задних колёс
(для шины 15,5R38 мод. Ф-2А, $p_{\omega 2}=0,08$ МПа, $G=3150$ кг, $C_1=25,5$, $C_2=17,7$ на различных углах склона)

Угол увода задних колёс	Угол склона α , град.						
	5	8	10	13	15	18	20
$\delta_2 = \frac{G \cdot \sin \alpha}{C_1 + C_2 \cdot p_{\omega 2} \cdot G \cdot \cos \alpha}$							
δ_2 , рад.	0,06	0,09	0,12	0,16	0,19	0,22	0,25

Однако установления функции компенсационного радиуса при различных углах увода колёс недостаточно для определения поперечного смещения тягового средства. С этой целью необходимо формализовать процедуры оптимизации угла увода центра тяжести машины δ при условии её излишней поворачиваемости.

Для этого предлагается рассмотреть систему равенств(рисунок 2.6)[6]:

$$\begin{cases} |AB| + |BC| = |AC|; \\ |NO| \cdot tg \delta_2 - |NO| \cdot tg \delta = |BC| \\ |NO| \cdot tg \delta - |NO| \cdot tg \delta_1 = |AB|. \end{cases} \quad (2.22)$$

В результате проведения математических преобразований, искомую величину угла увода центра тяжести машины можно сформулировать следующим образом, и рад:

$$tg \delta = \frac{|AB| \cdot tg \delta_2 + |BC| \cdot tg \delta_1}{|AB| + |BC|}. \quad (2.23)$$

Необходимо считать целесообразным введение в формулу 2.22 коэффициента $k = \frac{BC}{AB}$, позволяющего учитывать координаты центра тяжести машины, что предполагает аналитическое варьирование при параметрической оценке различных моделей тяговых средств:

$$\delta = arctg \frac{|AB|(tg \delta_2 + k \cdot tg \delta_1)}{L_M^{прод.б}}, \quad (2.24)$$

где $L_M^{прод.б} = |AB| + |BC|$ – продольная база машины, м.

Построена графическая реализация математического описания функции угла увода центра тяжести трактора МТЗ-82.1 при различных комбинациях углов увода задних и передних колёс (рисунок 2.7).

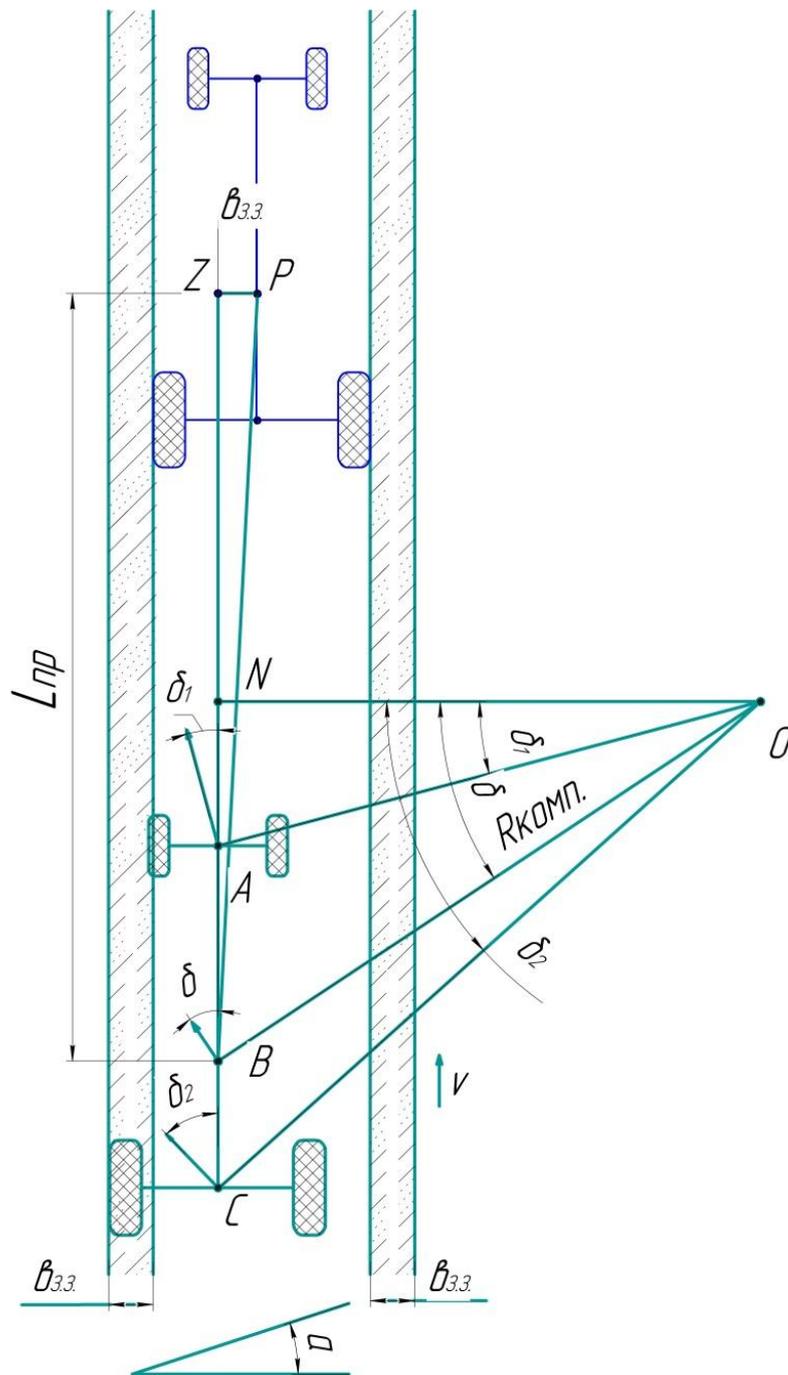


Рисунок 2.6 – Схема поворота машины на склоне при реализации избыточной поворачиваемости: O – точка центра поворота машины; $\delta, \delta_1, \delta_2$ – углы увода соответственно центра тяжести машины, передних и задних колёс; v – вектор скорости; $b_{3.3}$ – ширина защитной зоны; α – угол склона; N – точка пересечения отрезков $|NO|$ и $|NA|$

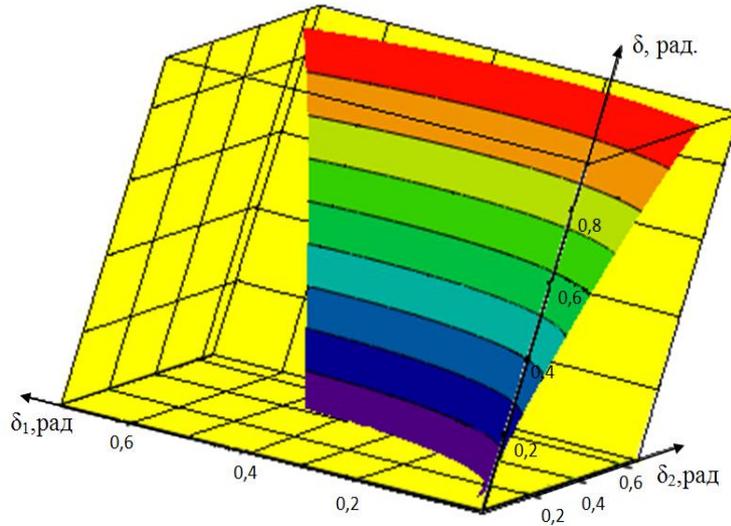


Рисунок 2.7 – Функциональная поверхность угла увода центра тяжести машины: $\delta, \delta_1, \delta_2$ – углы увода соответственно центра тяжести машины, передних и задних колёс

Таким образом, расчёт компенсации полного поперечного смещения трактора, движущегося по наклонной опорной поверхности, с излишней поворачиваемостью можно наглядно продемонстрировать схемой алгоритма (рисунок 2.8) и окончательно определить по формуле, м:

$$l_{ув}^{изв.н} = l_{полн} = l_{ск} = \sqrt{\left[2 \cdot \sqrt{\left(\frac{AC(tg\delta_2 - 1)ctg\delta_1}{(tg\delta_2 - tg\delta_1)} \right)^2 + \left(\frac{AC \cdot tg\delta_2}{(tg\delta_2 - tg\delta_1)} - BC \right)^2} \cdot \sin \left(\frac{\frac{\pi}{2} + \arctg \left(\frac{AB \cdot tg\delta_2 + BC \cdot tg\delta_1}{AB + BC} \right)}{2} \right) \right]^2 - \left[\sqrt{\left(\frac{AC(tg\delta_2 - 1)ctg\delta_1}{(tg\delta_2 - tg\delta_1)} \right)^2 + \left(\frac{AC \cdot tg\delta_2}{(tg\delta_2 - tg\delta_1)} - BC \right)^2} + \left(\frac{AC \cdot tg\delta_2}{(tg\delta_2 - tg\delta_1)} - BC \right) \right]^2} \quad (2.25)$$

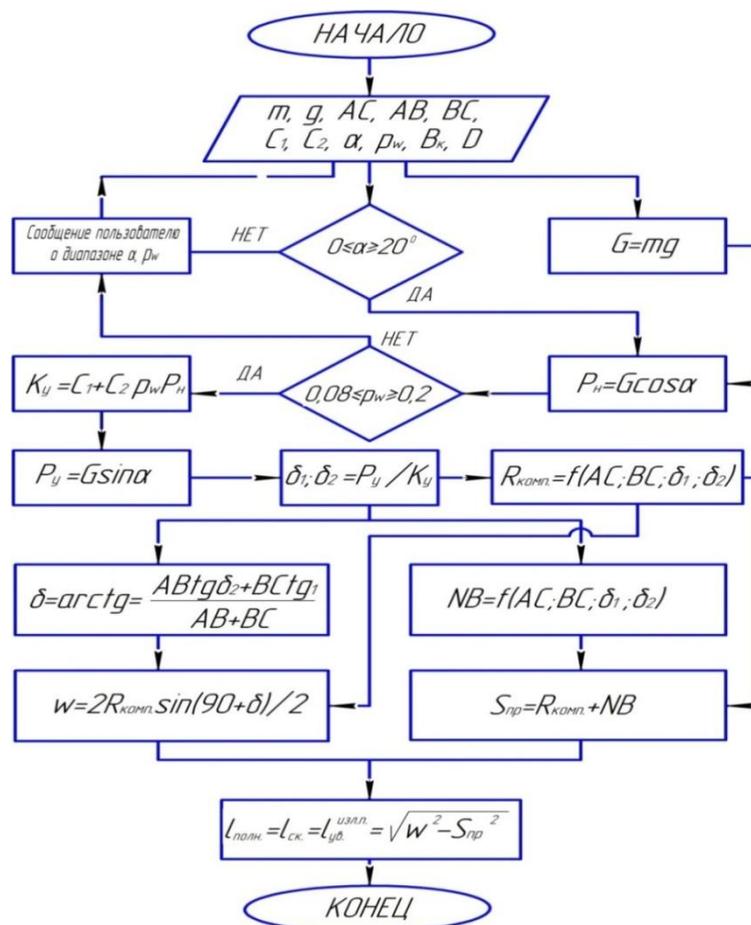


Рисунок 2.8 – Алгоритм расчета компенсации полного смещения машины с излишней поворачиваемостью при наличии угла наклона опорной поверхности

Однако данная функция не дает возможным определение смещения Δ на коротком участке пути, поэтому, используя геометрическое построение (рисунок 2.9), определили данную величину, м:

$$\Delta = R_{\text{комп}} - R_{\text{комп}} \cos \sigma, \quad (2.26)$$

где σ – угол поворота (рад) и при условии, что

$$\sin \sigma = \frac{L_{\text{пр}}}{R_{\text{комп}}}, \quad (2.27)$$

тогда

$$\Delta = R_{\text{комп}} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{L_{\text{пр}}}{R_{\text{комп}}} \right)^2} \right). \quad (2.28)$$

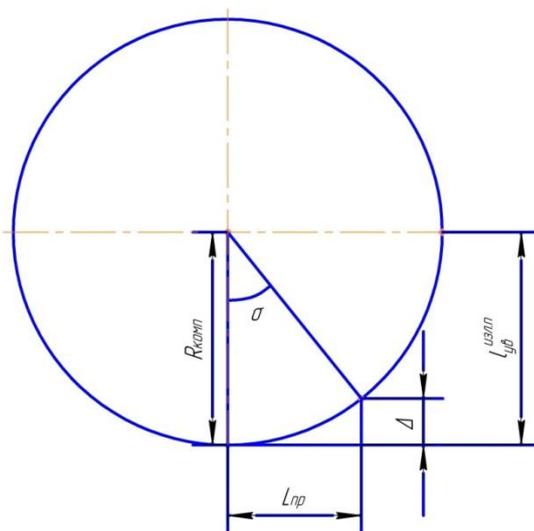


Рисунок 2.9 – Схема для определения смещения машины вверх

Таким образом, в результате проведенного параметрического анализа установлены функциональные связи и зависимости, диапазон значений которых реализуется в рамках физической модели, что достоверно подтверждает возможность создания режима движения колёсной машины с полной компенсацией поперечного смещения вниз по склону независимо от природы их проявления.

2.3 Анализ оценки энергетической составляющей процесса стабилизации курсового движения машины на склоне

В соответствии с предложенным способом курсовой стабилизации движения машина должна реагировать на изменения углов склона в любой момент времени. Т.е. значения внутришинного давления воздуха должны изменяться в ав-

томатическом режиме, задавая компенсационный поворот, направляя трактор вверх на величину смещения, и наоборот при горизонтальной ориентации он должен работать в обычном режиме. Еще одна особенность предлагаемого способа заключается в том, что заброс машины вверх на величину смещения ограничивается текущими значениями его коридора движения, определяемого координатами крайних точек. Таким образом, можно утверждать, что на данный момент исследовательских изысканий возникает необходимость определения уравнения движения трактора на склоне в любой момент времени с учётом углов увода, полного поперечного смещения, конструктивных параметров трактора и агротехнологических требований.

Функцию движения трактора с учётом реальных агроландшафтных условий в координатной форме можно представить системой уравнений и иллюстрированной схемой (рисунок 2.10):

$$\begin{cases} x = v_x \cdot t \\ y = v_y \cdot t, \end{cases} \quad (2.29)$$

где t – время движения трактора по склону во время выполнения сельскохозяйственных операций, с;

v_x – скорость трактора по оси коридора движения, м/с;

v_y – скорость трактора по нормали к оси коридора движения, м/с.

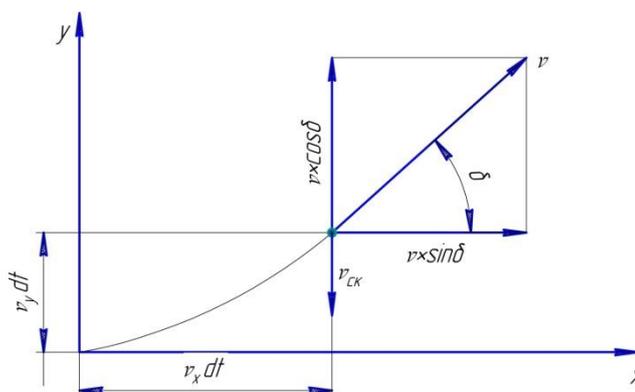


Рисунок 2.10 – Схема движения трактора в координатной форме:
 v – абсолютная скорость движения трактора во время выполнения сельскохозяйственных операций, м/с

При исследовании системы следует сделать следующие допущения. Несмотря на то, что в реальных условиях вектор смещения может иметь отклонение от нормали к траектории, полагаем, что мгновенный центр скоростей при движении трактора находится всегда на нормали к направлению технологического коридора без учета смещения, вызванного скольжением и уводом. Так как при соблюдении правил агротехнологии (движение трактора не выходит за ширину защитной зоны ($v_{з.з.}=0,2-0,3\text{м}$)) диапазон отклонений нормали курса от вертикали будет стремиться к нулю, в связи с этим погрешность от данного допущения будет незначительна.

Составляющие скорости движения трактора выражаются следующими зависимостями, м/с:

$$v_x = v \cdot \cos \delta, \quad (2.30)$$

$$v_y = v \cdot \sin \delta - v_{\text{ск}}, \quad (2.31)$$

где v – скорость движения трактора во время выполнения сельскохозяйственных операций, м/с;

$v_{\text{ск}}$ – скорость скольжения трактора по нормали к оси коридора движения, м/с.

Скорость поперечного смещения от скольжения можно определить как функцию, зависящую от величины поперечного смещения от скольжения $l_{\text{ск}}$, длины прямолинейной траектории $L_{\text{пр}}$ и скорости движения во время выполнения сельскохозяйственных операций v , м/с:

$$v_{\text{ск}} = \frac{l_{\text{ск}} \cdot v}{S_{\text{пр}}}. \quad (2.32)$$

При рассмотрении геометрической модели треугольника ΔBZP на рисунке 2.6 определяется величина BZ , которая является длиной прямолинейной траекто-

рии $L_{пр}$. В связи с тем, что остов машины относится к типу жестких форм, углы увода отдельных колёс δ_1, δ_2 интегрируются в величину увода центра тяжести машины, поэтому величина $L_{пр}$ определяется:

$$L_{пр.} = \frac{ZP}{\tan \delta}. \quad (2.33)$$

Из данного выражения видно, что длина прямолинейной траектории $L_{пр}$ зависит от угла увода центра тяжести машины, на которую в свою очередь влияют углы увода передних и задних колёс δ_1, δ_2 , а также расстояние ZP равно ширине защитной зоне $b_{3.3}$, тогда окончательная формула определения скорости скольжения ,м/с:

$$v_{ск.} = \frac{l_{ск.} \cdot v \cdot \text{tg} \delta}{B_{3.3}}. \quad (2.34)$$

Функция движение трактора в координатной форме имеет вид с учетом закономерностей 2.29;2.30;2.34:

$$\begin{cases} x = v \cdot \cos(\arctg \frac{|AB| \cdot \text{tg} \delta_2 + |BC| \cdot \text{tg} \delta_1}{|AB| + |BC|}) \cdot t \\ y = \left(v \cdot \sin(\arctg \frac{|AB| \cdot \text{tg} \delta_2 + |BC| \cdot \text{tg} \delta_1}{|AB| + |BC|}) - \frac{l_{ск.} \cdot v \cdot \text{tg} \delta}{B_{3.3}} \right) \cdot t \end{cases} \quad (2.35)$$

Составляющая $l_{ск.}$ системы определена в предыдущем пункте и не указана, так как имеет громоздкое выражение. Функция движения трактора на склоне определяет координаты его смещения от траектории в конкретный момент времени, что позволит использовать данное математические исследование в последующих экспериментальных процедурах.

Траектория даже с учётом применения технического решения будет иметь синусоидальную форму, идеального движения трактора по заданной траектории

создать невозможно. Длина траектории движения трактора, полученная при применении технического решения, может быть определена зависимостью, м:

$$L_{\phi} = \int_0^t \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}. \quad (2.36)$$

Графоаналитическая процедура (рисунок 2.11, 2.12) наглядно показала наличие площадей (S_P , $S_{П.С.}$), очерчиваемых реальной технологической траекторией 1 движения трактора и траекторией движения 2, полученной с помощью применения математически обоснованного предлагаемого способа с учетом эксплуатационных, агротехнологических условий, определяющих вводные параметры. Траектория 3 является идеальной ($S_{И}=0$).

Площадь полученной фигуры (S_C), очерченной траекторией 4, не является величиной отвлеченной, а есть графическое изображение энергетической составляющей целесообразности компенсации, которой техническими средствами не представляется возможной в связи с усложнением систем контроля и управления тягового транспортного средства. Такое усложнение может повлечь за собой не только стоимостные затраты, но и снижение надёжности модернизированного трактора. Как известно, такое искривление рабочей траектории происходит за счет естественных препятствий, в результате неточного вождения, нарушения регулировок механизмов управления и ходовой части, что вызывает удлинение пути, проходимого трактором, которое оценивается коэффициентом удлинения пути $K_{у.п.}$. Значения данного коэффициента лежат в пределах от 0,1 до 0,15 [67].

В связи с этим необходимо сравнение полученных энергетических показателей S_P , $S_{П.С.}$ как вынужденных работ, связанных с подруливанием (воздействием механизатора на управляющие органы).

С энергетической точки зрения, эффективность внедрения способа стабилизации положения движущегося колёсного транспортного средства на наклонной опорной поверхности может определяться следующим энергетическим показателем (рисунок 2.11, 2.12):

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{S_p - S_{п.с.}}{S_p}, \quad (2.37)$$

где K – коэффициент оценки эффективности внедрения предлагаемого способа;

$S_{п.с.} = \int_0^t y(t) \cdot x'(t) dt$ – площадь, описанная траекторией движения машины на склоне с применением предлагаемого способа, которая определяется посредством закона движения 2.35:

$S_p = \int_0^t \psi \sin t \cdot \omega(t)' dt$ – площадь, описанная реальной траекторией движения машины на склоне:

$\psi = 0,5KД$ – величина, равная половине ширины коридора движения, м;
 ω – частота воздействия оператора на рулевой механизм, c^{-1} .

При исследовании площадей описанными траекториями следует сделать следующее допущение. Для значительного упрощения исследовательского анализа принимаем траектории движения трактора в технологическом коридоре в виде синусоидальных кривых (одновременно для траекторий 1 и 2), в связи с этим величина предлагаемого коэффициента изменится незначительно и будет находиться в диапазоне от 0 до 3% (рисунок 2.12).

Таким образом, коэффициент оценки эффективности внедрения предлагаемого способа в конечном варианте выражается как:

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_0^t \psi \cdot \sin \omega(t)' dt - \int_0^t y(t) \cdot x'(t) dt}{\int_0^t \psi \cdot \sin \omega(t)' dt}. \quad (2.38)$$

В случае движения колесной машины по идеальной траектории коэффициент K имеет максимальное значение, равное 1, а при перемещении трактора по реальной траектории данный коэффициент стремится к 0.

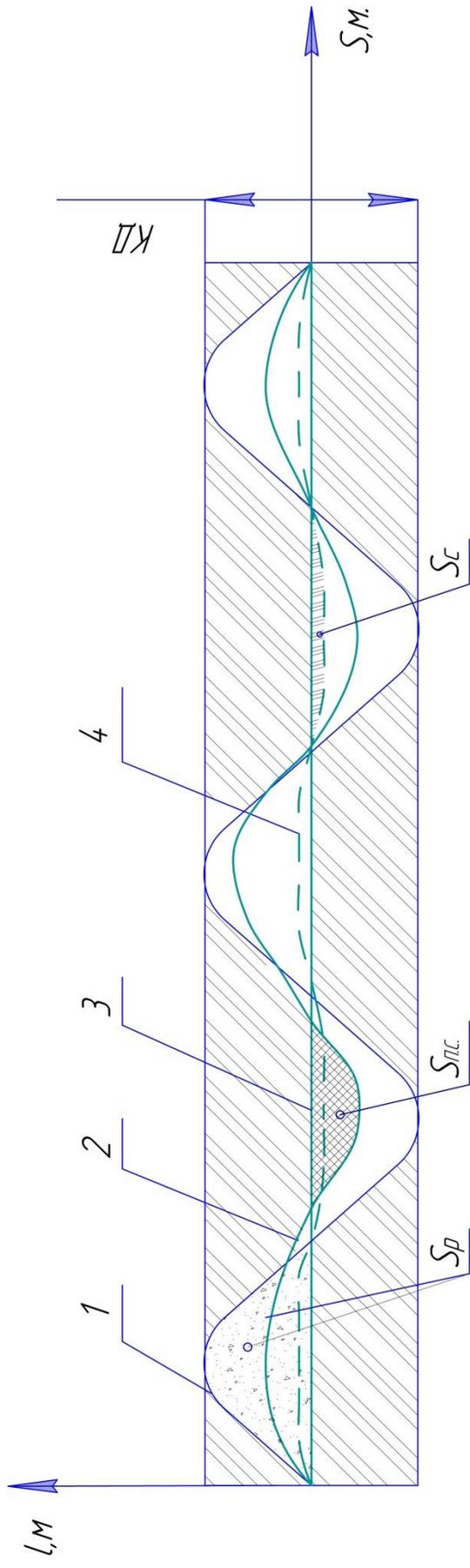


Рисунок 2.11 – Виды траекторий движения колёсной машины

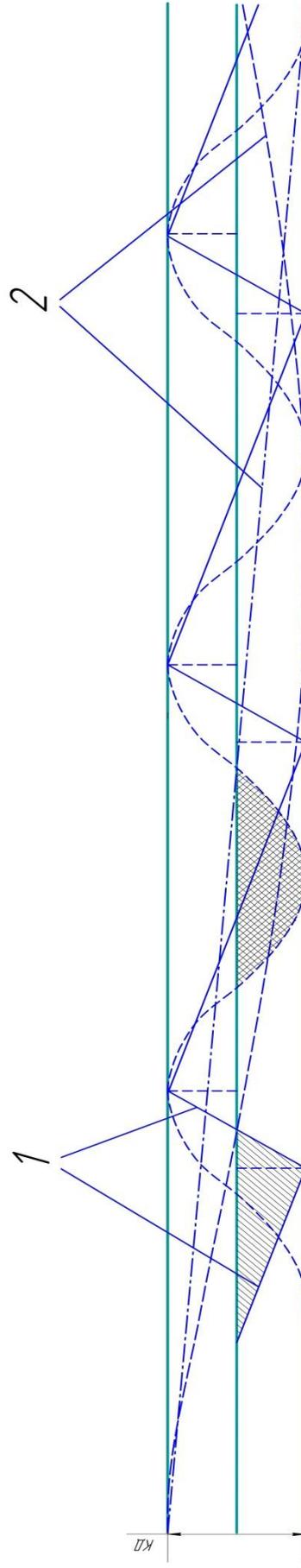


Рисунок 2.12 – Модели траекторий движения колёсной машины в технологическом коридоре

Выводы:

1. Разработана функция полного поперечного смещения колесного трактора при реализации технологических операций на склоне от смещений, вызванных скольжением по наклонной опорной поверхности, и углов увода пневматических шин, позволяющая определять величину заброса трактора вверх в различных агроландшафтных условиях.

2. Исследовано явление возникновения поворота трактора вверх в процессе изменения вида поворачиваемости, которое легло в основу обеспечения способа курсовой стабилизации движения колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на наклонных опорных поверхностях.

3. Разработана функция движения трактора в координатной форме с учетом реальных агроландшафтных условий и различных углов увода шин для оптимизации параметров и режимов работы технической системы в условиях склонного земледелия.

4. Предложен коэффициент, определяющий эффективность функционирования способа курсовой стабилизации колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на наклонных опорных поверхностях.

3 Методика исследования по обоснованию эксплуатационных требований к режиму варьирования углов увода шин

3.1 Принцип функционального алгоритмирования оценки износа элементов протектора шин при планировании машинного эксперимента

Исследование динамики износа шин неразрывно связано с изучением процесса качения пневматического колеса по грунту, являющегося составляющим элементом системы «дорога-шина-машина». В одинаковых условиях работы трактора износ шин зависит от пути скольжения шины по опорной поверхности. Таким образом, чем чаще происходят повороты колёс для установления машины на заданную траекторию, а также её разгон и торможение, тем больше путь скольжения и, следовательно, интенсивность изнашивания. Также наибольший износ колёс тракторов наблюдается в случае поперечного перемещения поверхности беговой дорожки шины относительно опорной поверхности дороги, что является характерным для качения с уводом.

В связи с тем, что научная новизна работы заключается в варьировании углов увода шин за счет изменения давления воздуха при движении машины на негоризонтальной опорной поверхности для обеспечения её курсовой устойчивости, возникает вопрос о влиянии изменения углов увода на интенсивность износа.

В настоящее время существуют методические, математические и процедурные наработки, позволяющие значительно снизить затраты на проведение лабораторных и производственных экспериментов, основанных на использовании дорогостоящих опытных образцов испытуемой техники и значительных капиталовложений в комплектовании технического обеспечения в закладываемых экспериментах [51]. Однако, оценивая уровень релевантности при реализации поисковых и исследовательских процедур, можно прийти к выводу о недостаточности использования какой-то одной из существующих методик для анализа исследуемого процесса. То есть в нашем случае для проведения анализа влияния углов увода

колёс на интенсивность износа шин машины при движении её по наклонной опорной поверхности.

В связи с этим можно сделать вывод о необходимости формирования метода комплексного исследования влияния углов увода колёс на износ шин, который позволит создать информационную лабораторную базу данных экспериментальных процедур, тем самым сократить затраты денежных средств.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса качения колеса с пневматической шиной описаны в работах как отечественных, так и зарубежных ученых [61;66;69;120]. Основоположником теории качения эластичного колеса считается академик Е.А. Чудаков. Дальнейшее развитие данной теории, в частности, исследования явления бокового увода тракторных шин, описано в работах В.Е. Красильникова, П.А.Кудинова, И.М. Лутаева, О.В. Маргвелашвили, В.А. Мещерякова, А.Ф. Полетаева, А.С. Шарара, В.Г. Ярового, В.Schlippe, W.Berqman, R. Dietrich. Перечисленными учеными получен большой объем экспериментальных данных о влиянии на увод шины её конструктивных параметров, давления воздуха, нормальной нагрузки, продольных сил и др. [27;61;69;76;79;116;121]. Однако в научных изысканиях не акцентировалось внимание в плане влияния бокового увода на интенсивность изнашивания шин. Наиболее фундаментально было описано данное явление в работах В.П. Бойкова, в результате исследования которого была получена эмпирическая зависимость, определяющая интенсивность изнашивания шин пневматических колес, взаимодействующих с горизонтальной опорной поверхностью:

$$I = \frac{K_{и} \cdot p_{ср} \cdot \mu_{тр} \cdot a \cdot \delta_i}{2 \cdot \pi \cdot r_k}, \quad (3.1)$$

где $K_{и}$ – коэффициент истирающей способности грунта;

$p_{ср}$ – среднее номинальное давление в контакте, МПа;

$\mu_{тр}$ – коэффициент трения резины о грунт;

δ_i – угол увода i -го колеса, рад.;

r_k – радиус качения колеса, м;

a – длина пятна контакта колеса, м.

Данная методика определения интенсивности износа устанавливает взаимосвязь между конструктивными и эксплуатационными параметрами шины, которые являются как опытными данными, так и математическими зависимостями. Для решения предлагаемого уравнения необходимо знать функции определения углов увода, длины области контакта и среднего номинального давления в контакте, также функции параметров, входящих в них. Однако автор не счёл целесообразным установить и формализовать вышеуказанные математические выражения, что привело к ограничению исследовательского диапазона предложенной методики. Таким образом, чтобы методика представляла собой математическую процедуру, реализующую наиболее адекватную модель исследуемого процесса необходимо установить теоретические, формальные связи и математические выражения эмпирических составляющих в указанной методике В.П. Бойкова. Для этого были проведены научные изыскания, в результате реализации которых было установлено, что деформированное пятно контакта колеса оказывает значительное влияние на управляемость трактора [24]. Площадь пятна контакта тракторных шин, непосредственно связанную с нормальной деформацией, определяют за счет эллиптического отпечатка контакта шины. Большая полуось эллипса является половиной длиной пятна контакта шины, входящей в математическое описание процесса износа, которую можно определить приближенно, рассматривая схему колеса, находящегося под действием нагрузки [24,105]:

$$a = 2 \cdot \sqrt{r_c^2 - r_{ст}^2}, \quad (3.2)$$

где $r_{ст}$ – статический радиус колеса, м;

r_c – свободный радиус колеса, м.

Однако методический подход установления длины пятна контакта локализован системой погрешностей при оценке эмпирических составляющих. В связи с этим в результате разработки новых методов и использования современного инженерного обеспечения на базе ОАО «Научно-исследовательский тракторный институт» были внесены коррективы и разработаны достоверные способы определения конструктивно-режимных параметров движителя, в том числе длины пятна контакта. В связи с этим в уравнение 3.2 внесен уточняющий коэффициент, находящийся в предел от 0,7 до 0,75 [24,105]:

$$a = (0,7 \dots 0,75) \cdot 2 \cdot \sqrt{r_c^2 - r_{ct}^2} \quad (3.3)$$

В полученном выражении исследовательский интерес представляет разность между свободным и статическим радиусом, характеризующий нормальный прогиб шины h_z [48;87]. Таким образом, выражение длины контакта шины можно преобразовать в формулу, удобную для дальнейших математических процедур определения износа шин:

$$a = 2 \cdot (0,7 \dots 0,75) \cdot \sqrt{h_z^2} = (1,4 \dots 1,5) \cdot h_z, \quad (3.4)$$

где h_z – нормальный прогиб шин колеса, м.

Как известно, для нахождения нормального прогиба существует ряд эмпирических выражений, позволяющих оценить нормальный прогиб в зависимости от нормальной нагрузки, давления воздуха и размеров шин [24;87,105], но достоверной, по мнению ведущих специалистов, является методика, предложенная Р.Хедекелем, учитывающая как внутришинное давление, так и угол опорной поверхности (рисунок 3.1):

$$h_z = \frac{G \cdot \cos \alpha}{\Pi \cdot p_{\omega} \cdot \sqrt{D \cdot B_k}}, \quad (3.5)$$

где b_k – ширина колеса, м;

D – диаметр колеса, м.

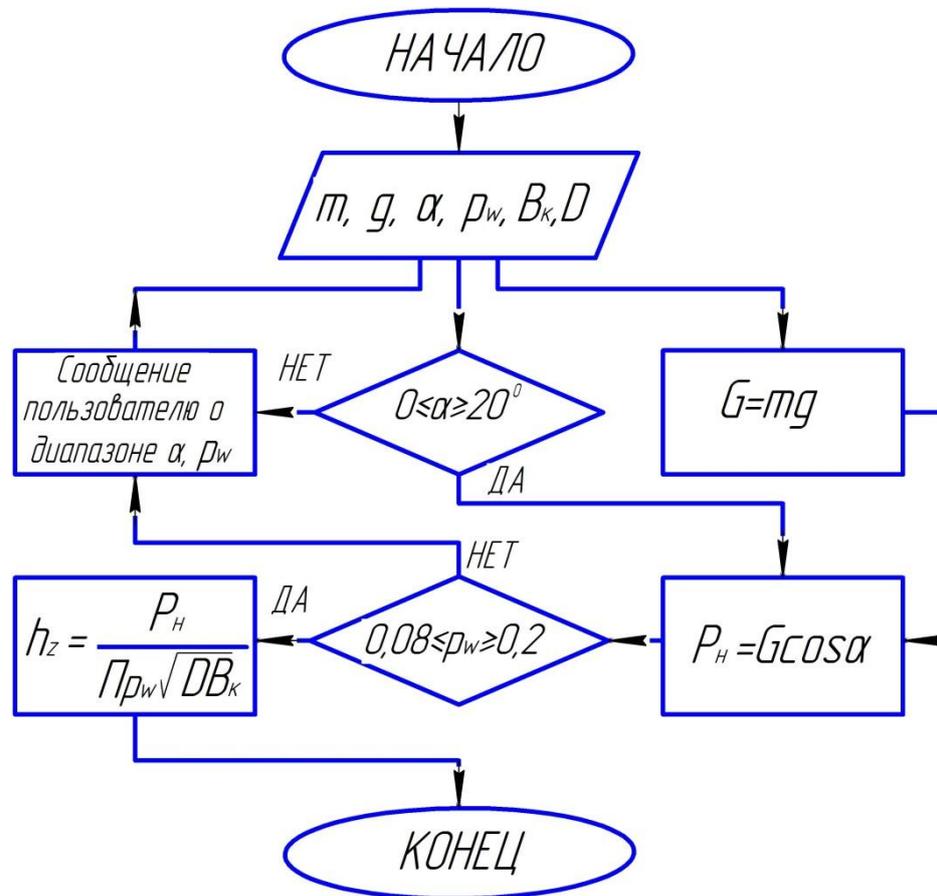


Рисунок 3.1 – Алгоритм расчета нормального прогиба пневматических шин

Как предусмотрено в методике В.П. Бойкова, при работе колеса на наклонной опорной поверхности износ шины имеет специфический характер, связанный с влиянием углов увода на деформацию шины. Однако автор не установил математическую зависимость определения угла увода, а обозначил ее как эмпирический параметр, который невозможно выразить без проведения реальных, лабораторных и производственных экспериментов. В связи с чем затраты, связанные на проведении научно-технических исследований, увеличиваются в сегменте создания физического опытного образца. Фактически речь идёт о целесообразности аналитического подхода к решению вопроса формирования массива искомых зна-

чений вместо дорогостоящих измерительных процедур. Таким образом, способ расчета угла увода колёс с помощью отношения $G \cdot \sin \alpha$ к выражению $(C_1 + C_2 \cdot p_{\omega 1,2} \cdot G \cdot \cos \alpha)$ представляет особый интерес для теоретизации интенсивности износа шин, лежащих в основе настоящих научных исследований и разработки, в конечном итоге, математической модели устойчивого движения машины по наклонной опорной поверхности.

В дальнейших исследованиях пришли к необходимости определения величины среднего номинального давления в пятне контакта шины с опорной поверхностью $p_{\text{ср}}$, которая выражается из отношения составляющей нормальной силы N и площади пятна контакта $F_{\text{п.к.}}$.

Значения составляющих нормальной силы отличаются в зависимости от расположения колес относительно продольной и поперечной осей трактора, так (рисунок 3.2)[105]:

– составляющая нормальной силы правого переднего колеса равна, Н:

$$N_{\text{п.п.к.}} = 0,4 \cdot G \left(\frac{\cos \alpha}{2} + \frac{h}{B} \sin \alpha \right); \quad (3.6)$$

– составляющая нормальной силы правого заднего колеса, Н:

$$N_{\text{п.з.к.}} = 0,6 \cdot G \left(\frac{\cos \alpha}{2} + \frac{h}{B} \sin \alpha \right); \quad (3.7)$$

– составляющая нормальной силы левого переднего колеса, Н:

$$N_{\text{л.п.к.}} = 0,4 \cdot G \left(\frac{\cos \alpha}{2} - \frac{h}{B} \sin \alpha \right); \quad (3.8)$$

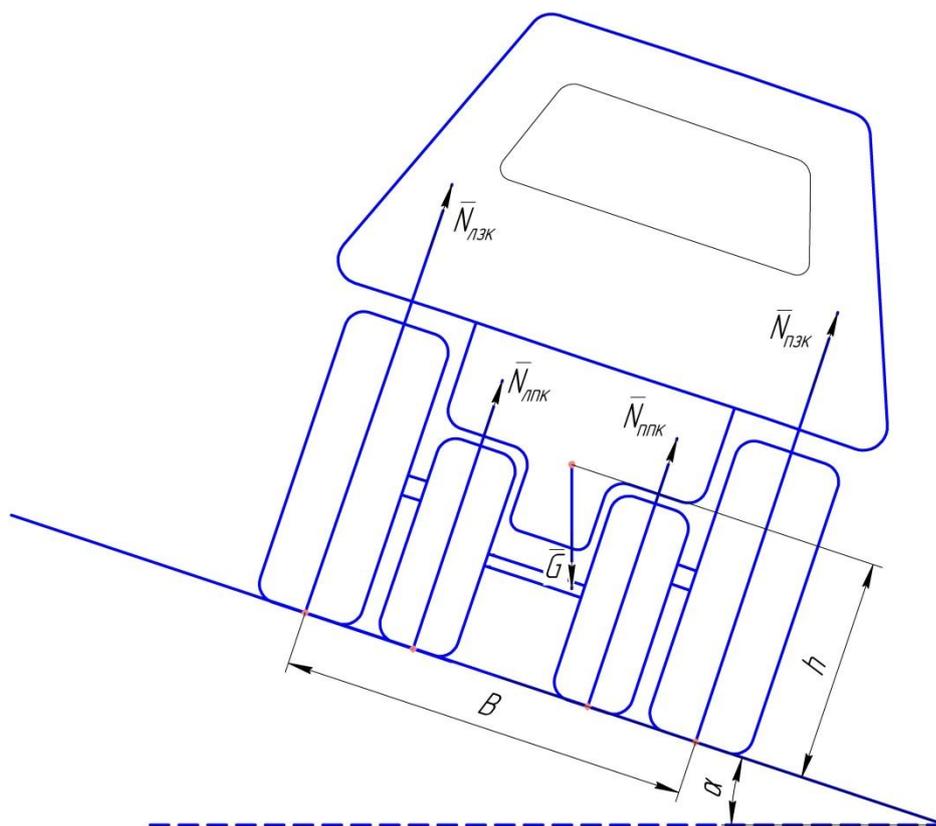


Рисунок 3.2 – Схема к определению составляющих реакций наклонной опорной поверхности на колёса

– составляющая нормальной силы левого заднего колеса, Н:

$$N_{л.з.к.} = 0,6 \cdot G \left(\frac{\cos \alpha}{2} - \frac{h}{B} \sin \alpha \right), \quad (3.9)$$

где h – высота центра тяжести трактора, м;

B – ширина колеи колёс, м.

Усилие на крюке $P_{кр}$ перераспределит нагрузку на колесах (рисунок 3.3). Передние колёса будут разгружены, а задние колёса будут дополнительно нагружены. Величины этих дополнительных нагрузок определяются из уравнений моментов относительно мгновенного центра скоростей задних и передних колёс. Допустимо рассмотреть силовую нагрузку в продольной плоскости. Суммарная реакция на передних колёсах изменится на величину $-\Delta N_{п.}$, а на задних – на величину $-\Delta N_{з.}$

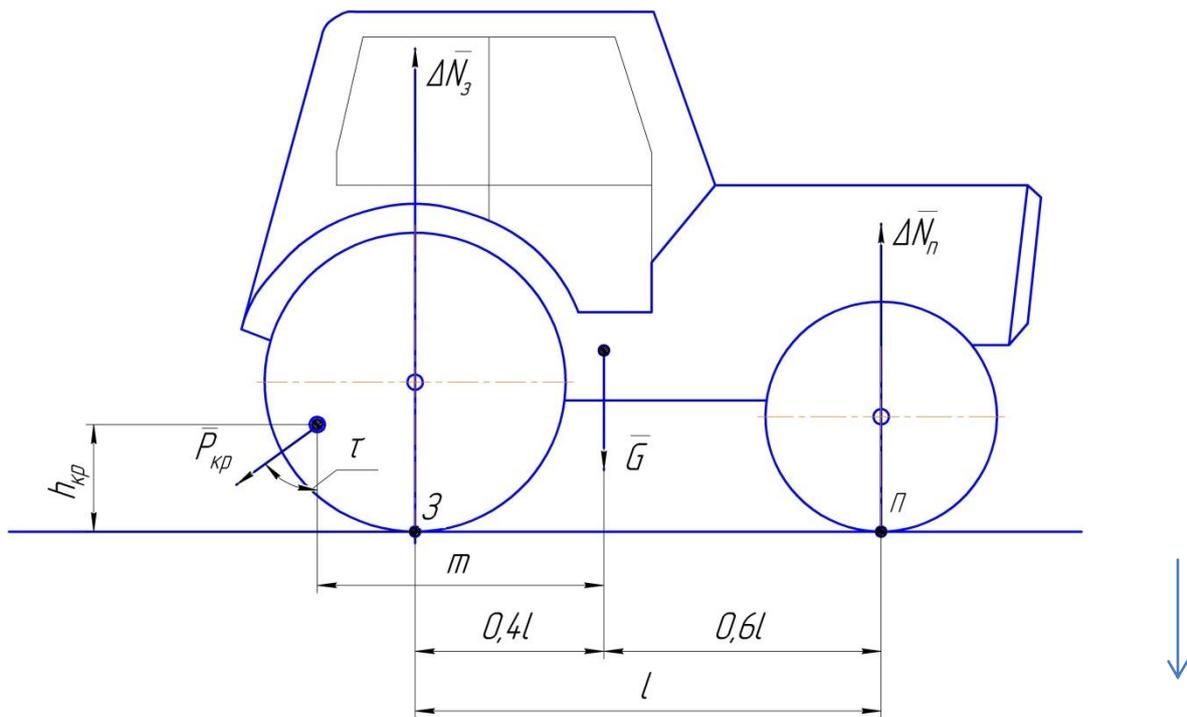


Рисунок 3.3 – Схема к определению составляющих реакций наклонной опорной поверхности на колёса с учётом крюкового усилия: $P_{кр}$ – крюковая сила, Н; $h_{кр}$ – высота приложения крюкового усилия; m – расстояние между крюковым усилием и центром тяжести трактора; l – расстояние между осями передних и задних колёс; З, П – точки приложения соответственно заднего и переднего колёс с опорной поверхностью; \downarrow – градиент склона

$$\begin{cases} Mom_{З}^{\bar{F}_t} = 0; \\ Mom_{П}^{\bar{F}_t} = 0 \end{cases}; \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \Delta N_{П} \cdot l + P_{кр} \cdot h_{кр} \cdot \sin \tau + P_{кр} \cdot \cos \tau \cdot (m - 0.4l) = 0 \\ -\Delta N_{З} \cdot l + P_{кр} \cdot h_{кр} \cdot \sin \tau + P_{кр} \cdot \cos \tau \cdot (m + 0.6l) = 0 \end{cases}; \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} \Delta N_{П} = -\frac{P_{кр} \cdot (h_{кр} \cdot \sin \tau + \cos \tau \cdot (m - 0.4l))}{l} \\ \Delta N_{З} = \frac{P_{кр} \cdot (h_{кр} \cdot \sin \tau + \cos \tau \cdot (m + 0.6l))}{l} \end{cases}; \quad (3.12)$$

Одно переднее колесо будет разгружено на величину $\frac{\Delta N_{\text{п}}}{2}$. Одно заднее колесо будет дополнительно нагружено силой величиной $\frac{\Delta N_{\text{з}}}{2}$.

Таким образом, получим уравнения составляющих нормальной силы с учетом крюковой нагрузки:

– составляющая нормальной силы правого переднего колеса равна, Н:

$$N_{\text{п.п.к.}} = 0,4 \cdot G \left(\frac{\cos \alpha}{2} + \frac{h}{B} \sin \alpha \right) - \frac{P_{\text{кр}} \cdot (h_{\text{кр}} \cdot \sin \tau + \cos \tau \cdot (m - 0,4l))}{2l}; \quad (3.13)$$

– составляющая нормальной силы правого заднего колеса, Н:

$$N_{\text{п.з.к.}} = 0,6 \cdot G \left(\frac{\cos \alpha}{2} + \frac{h}{B} \sin \alpha \right) + \frac{P_{\text{кр}} \cdot (h_{\text{кр}} \cdot \sin \tau + \cos \tau \cdot (m + 0,6l))}{2l}; \quad (3.14)$$

– составляющая нормальной силы левого переднего колеса, Н:

$$N_{\text{л.п.к.}} = 0,4 \cdot G \left(\frac{\cos \alpha}{2} - \frac{h}{B} \sin \alpha \right) - \frac{P_{\text{кр}} \cdot (h_{\text{кр}} \cdot \sin \tau + \cos \tau \cdot (m - 0,4l))}{2l}; \quad (3.15)$$

– составляющая нормальной силы левого заднего колеса, Н:

$$N_{\text{л.з.к.}} = 0,6 \cdot G \left(\frac{\cos \alpha}{2} - \frac{h}{B} \sin \alpha \right) + \frac{P_{\text{кр}} \cdot (h_{\text{кр}} \cdot \sin \tau + \cos \tau \cdot (m + 0,6l))}{l}, \quad (3.16)$$

Площади пятна контакта $F_{\text{п.к.}}$ выражается как, м²:

$$F_{\text{п.к.}} = \frac{\pi \cdot b_{\text{п.к.}} \cdot a}{4}, \quad (3.17)$$

где $b_{\text{п.к.}}$ – ширина пятна контакта колеса, м;

$P_{\text{кр}}$ – крюковая сила, Н;

τ – угол наклона крюкового усилия, рад.

Необходимые для определения интенсивности износа в методике В.П. Бойкова такие параметры, как коэффициент истирающей способности грунта $K_{и}$, коэффициент трения резины о грунт $\mu_{тр}$, радиус качения колеса r_k являются справочными данными для каждой конкретной модели шины [23;24;31;32;58;65]. Тогда можно утверждать, что интенсивность изнашивания протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия и наличия крюковой нагрузки описывается выражением:

$$I = \frac{2 \cdot K_{и} \cdot N_i \cdot \mu_{тр} \cdot G \cdot \sin \alpha}{r_k \cdot \pi \cdot \pi^2 (C_1 + C_2 \cdot p_{\omega} \cdot G \cdot \cos \alpha)}. \quad (3.18)$$

Полученная методика позволила проанализировать величину силового взаимодействия шины с опорной поверхностью при её деформации и проскальзывании в пятне контакта, что в условиях бокового увода является характеристикой интенсивности износа.

Учитывая возможность численного решения анализируемой системы уравнений, наиболее целесообразно дальнейшую формализацию поисковых процедур проводить в формате математического эксперимента с учетом его машинной интерпретации в программе MathCAD 14.

Согласно созданной методике необходимо, чтобы математическое моделирование износа шин и планируемые многофакторные эксперименты по определению курсовой устойчивости МЭС проводились в аналогичных условиях, с использованием эксплуатационных и конструктивных параметров одной модели. В связи с этим наиболее целесообразно реализовать производственные испытания на тракторе МТЗ-82.1 с учетом его комплектации шинами моделей 11,2-20 Ф-35-1 и 15,5R38 Ф-2А соответственно передних и задних колес.

Моделирование функции интенсивности износа от углов склона и внутреннего давления представлено на рисунке 3.4, которое проводилось при следующих принятых условиях: $p_{w1} = [0,08; 0,2 \text{ МПа}]$, $p_{w2} = [0,08; 0,18 \text{ МПа}]$, $\alpha =$

$[0^0; 20^0]$, $G=3150\text{кг}$, $C_1^{\text{пер.к}} = 24,8$, $C_2^{\text{пер.к}} = 10,3$, $D^{\text{пер.к.}} = 985\text{мм}$, $V_K^{\text{пер.}} = 284\text{мм}$, $r_K^{\text{пер.к}} = 460\text{мм}$, $C_1^{\text{задн.к}} = 25,5$, $C_2^{\text{задн.к}} = 17,7$, $D^{\text{задн.к.}} = 1540\text{мм}$, $V_K^{\text{задн.}} = 394\text{мм}$, $r_K^{\text{задн.к}} = 730\text{мм}$, $\mu_{\text{тр}} = 0,07$ (приложение 3) [28;32;33;35;89,105]. Полученные поверхности показали взаимосвязь трех параметров, необходимых для удобства дальнейшего использования при анализе износа шин (рисунок 3.5).

Определение оптимальных значений внутришинного давления с учетом минимизации величины интенсивности износа при движении трактора на различных склонах является важнейшей задачей, решения которой позволит выявить границы применимости разработки и сформулировать рекомендации по выбору пути дальнейших исследований.

Как показал анализ массива значений интенсивности износа на единицу длины, с увеличением угла склона возрастает величина интенсивности износа для шины 11,2-20 до $2 \cdot 10^{-10}$, а для шины 15,5R38 – до $4 \cdot 10^{-11}$ относительно роста давления воздуха от 0,08 до 0,2 МПа.

Согласно предлагаемому научному подходу удержания машины на траектории необходимо устанавливать допустимое низкое значение давления воздуха в колёсах заднего моста ($p_{\omega 2} = 0,08$ МПа) в связи с тем, что они подвергаются тяговым нагрузкам, а также для создания излишней поворачиваемости трактора, что позволит увеличить интервал варьирования углов увода передних колёс. Таким образом, интенсивность износа задних колёс будет иметь постоянную величину, а величина интенсивности износа передних колёс будет изменяться за счет изменения углов увода с 1^0 до 15^0 . Анализ результатов математических экспериментов показывает, что значение углов увода, лежащих в пределах $[0^0; 15^0]$, реализуемых в заданных условиях, незначительно влияет на интенсивность износа шин, что явилось ещё одним подтверждением целесообразности настоящих исследований.

Вследствие этого, полученные данные в результате проведения машинного эксперимента показали, что дальнейшие исследования предлагаемого подхода удержания транспортного средства на технологической траектории при движении

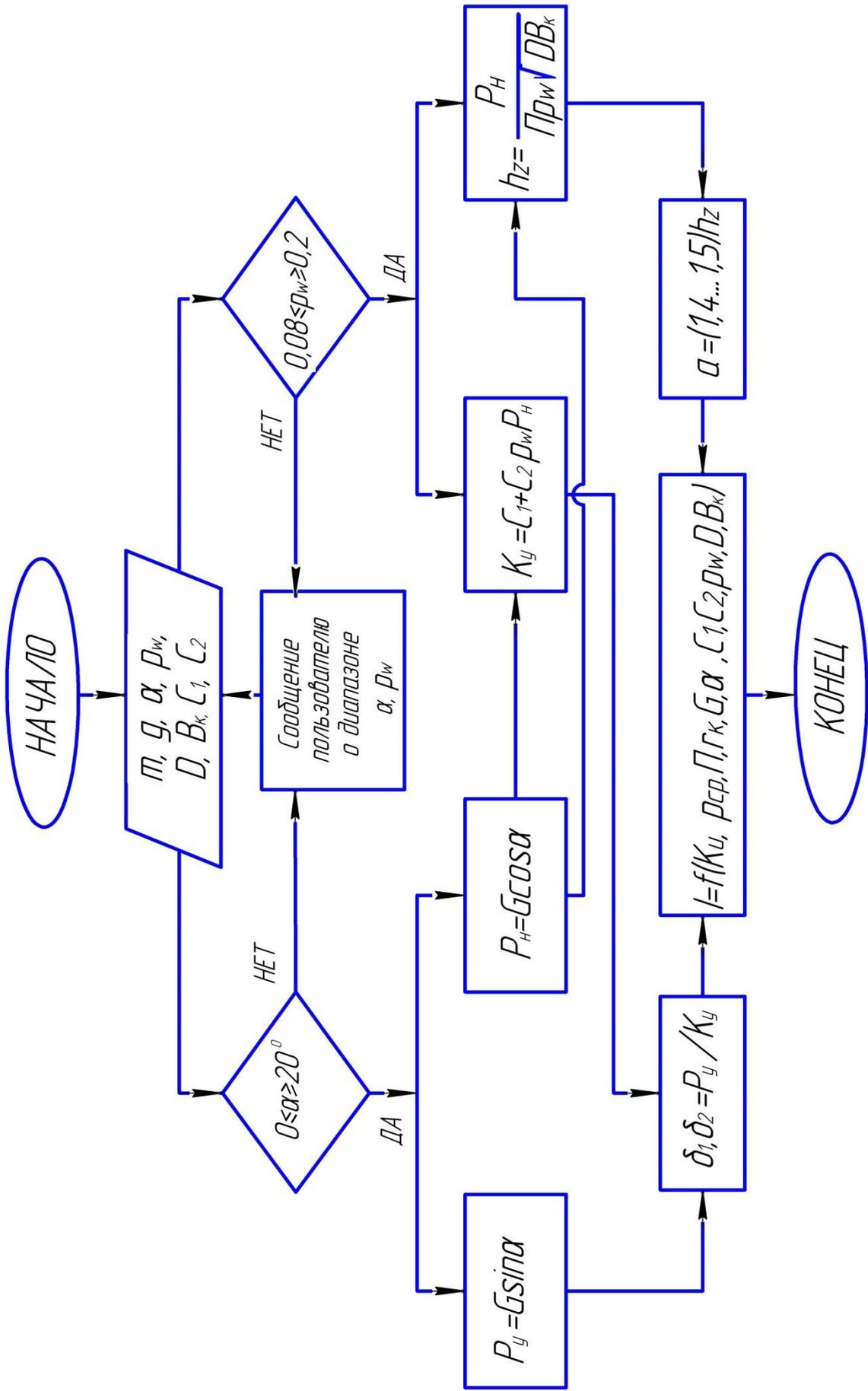


Рисунок 3.4 – Алгоритм расчета интенсивности износа шины при качении колеса по наклонной опорной поверхности

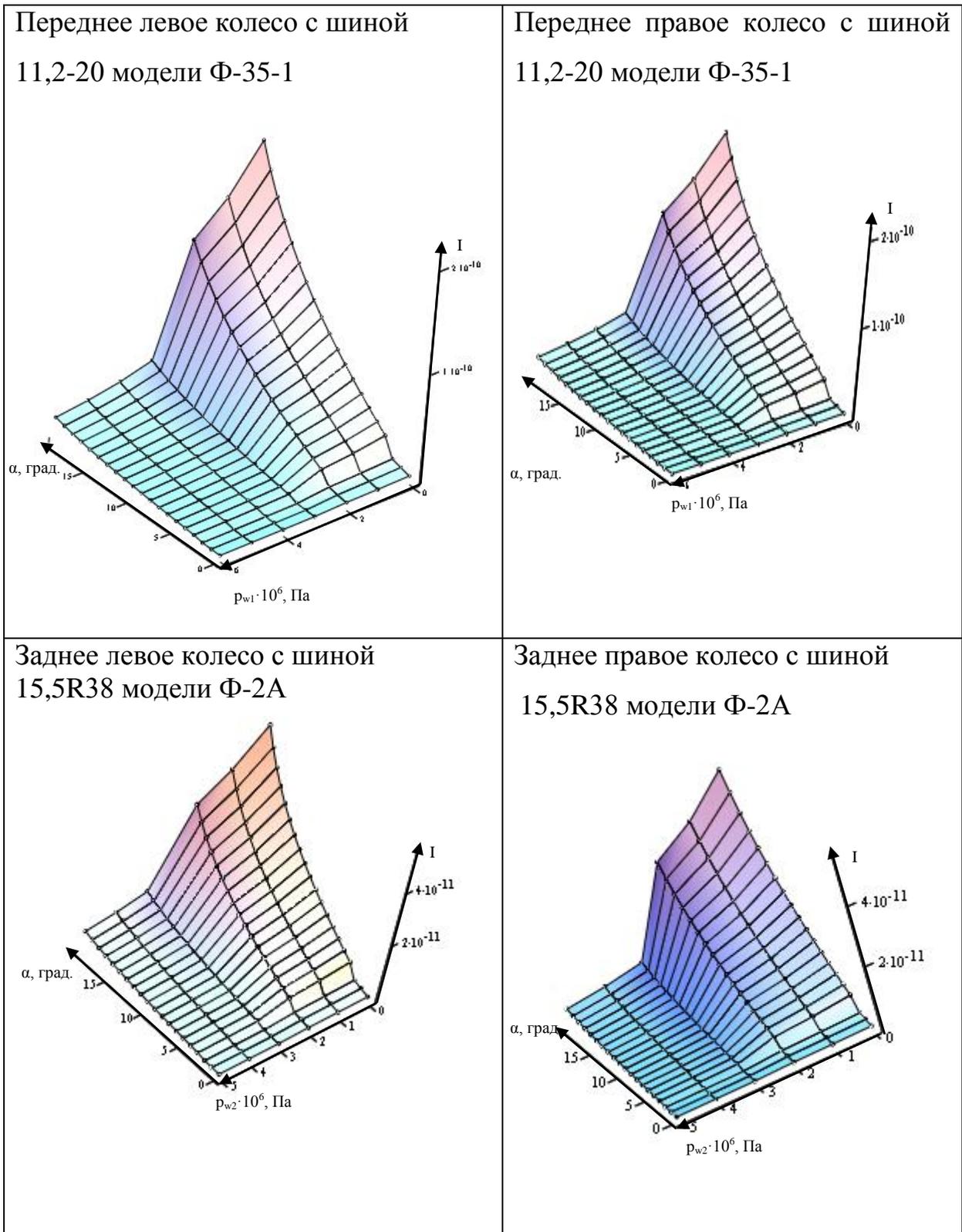


Рисунок 3.5 – Функция интенсивности износа шин от внутрিশинного давления на различных склонах (правые колеса располагаются ниже по склону)

по склону целесообразно осуществлять на углах наклона от 3 до 20° . Данный интервал обусловлен тем, что до 5° склона увод машины от траектории незначительный, а в случае более 20° целесообразно использовать крутосклонные тракторы. Угол увода передних колес должен варьироваться в пределах $[0^{\circ};15^{\circ}]$, в данном интервале интенсивность износа шин 11,2–20 лежит в пределах допустимых значений. В результате решения физических задач, связанных с поиском функций длины области контакта, среднего номинального давления в контакте и углов увода шин от внутришинного давления и углов склона, были установлены аналитические зависимости, имеющие прикладную инженерную направленность на модернизацию параметров и определение режимов работы машины при движении по негоризонтальной опорной поверхности. Рекомендованные оптимальные значения углов увода и склона сужают диапазон производственных экспериментов, из этого следуют материальные затраты на их проведение.

3.2 Разработка программно-аналитического обеспечения исследования процесса интенсивности изнашивания протектора шин

Разработанный на основе совокупности предлагаемых различными авторами [24;58;63] методик вычислительный алгоритм расчёта интенсивности износа шин при качении колеса по наклонной опорной поверхности (рисунок 3.2) делает возможным получение решения исходного уравнения 3.11 с учетом системы и совокупности числовых значений искомых величин интенсивности износа. В связи со сложными вычислительными операциями по его выражению и оптимизации величин, входящих в функцию интенсивности износа, определяющими условиями поставленной задачи на траекториальную стабилизацию машины при выполнении технологических операции пришли к необходимости создания компьютерной программы для определения интенсивности износа протектора пневматического колеса, взаимодействующего с негоризонтальной опорной поверхностью (№ 2015614951) (приложение 4).

Программа предназначена для определения интенсивности износа протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия. Функции формализуются конкретными формулами и интервалами допустимых значений, влияющих на процесс износа для соответствующих условий при ландшафтной нестабильности и эксплуатации колесного движителя. Используется алгоритм, реализующий целевую функцию интенсивности износа протектора в пятне контакта с опорной поверхностью, в которую входят интервалы таких значений, как угол склона, вес трактора, радиус и ширина колеса, внутреннее давление, высота центра тяжести трактора, ширина колеи колес и функции составляющих нормальной силы для каждого колеса, а также коэффициенты аппроксимации характеристик бокового увода шин, трения резины о грунт и истирающей способности грунта.

Алгоритм работы программы определения интенсивности изнашивания протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия представлены на рисунке 3.6.

Моделирование процесса взаимодействия пневматической шины с опорной поверхностью при нестабильных ландшафтных условиях с использованием данного программного обеспечения решает проблемы, связанные с оптимизацией допусков эксплуатационных и технических параметров транспортного средства, не требуя значительных материальных средств и времени (рисунок 3.7).

Фактически, полученные результаты научных исследований являются предпосылкой к разработке теории планирования многофакторного эксперимента с созданием возможности проведения производственных работ при условии сокращения повторяемости дорогостоящих исследований в рамках реального экономического сектора. В связи с тем, что посредством математического моделирования предстояло определить оптимальные значения углов увода колес в различных ландшафтных условиях, реализацию процесса стабилизации машин различных моделей внутри технологического коридора предлагалось решать посредством математического моделирования интенсивности износа шин, но уже в рамках многофакторного эксперимента.

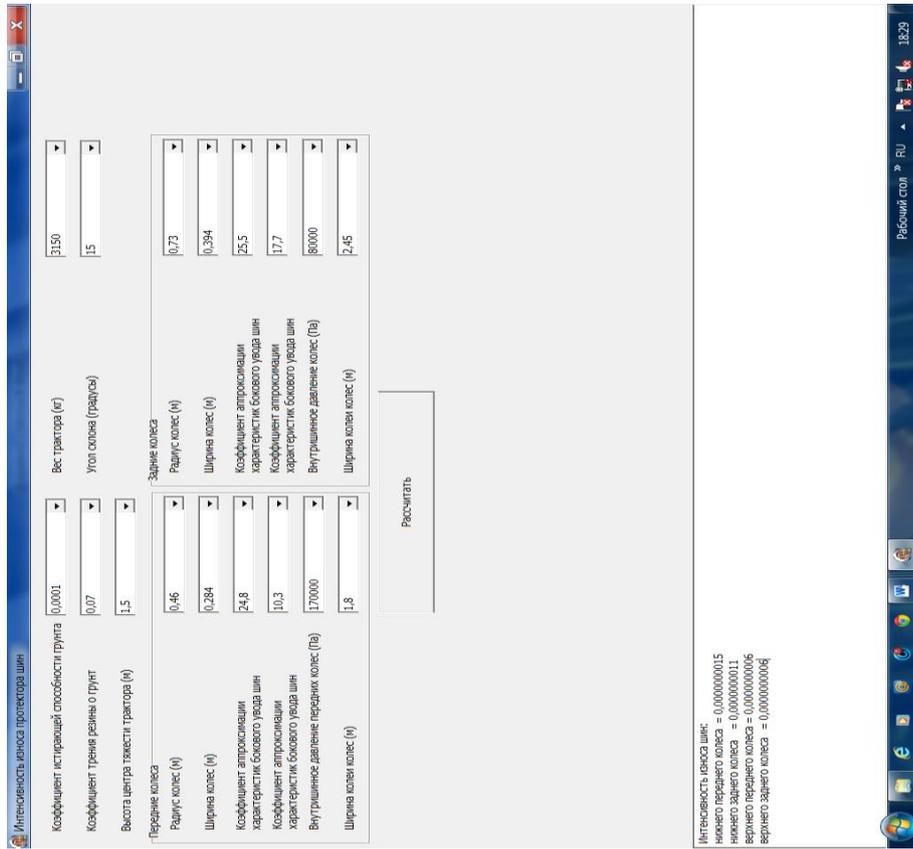


Рисунок 3.7 – Интерфейсное окно программного средства «Определение интенсивности износа протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия» (№2015614951)

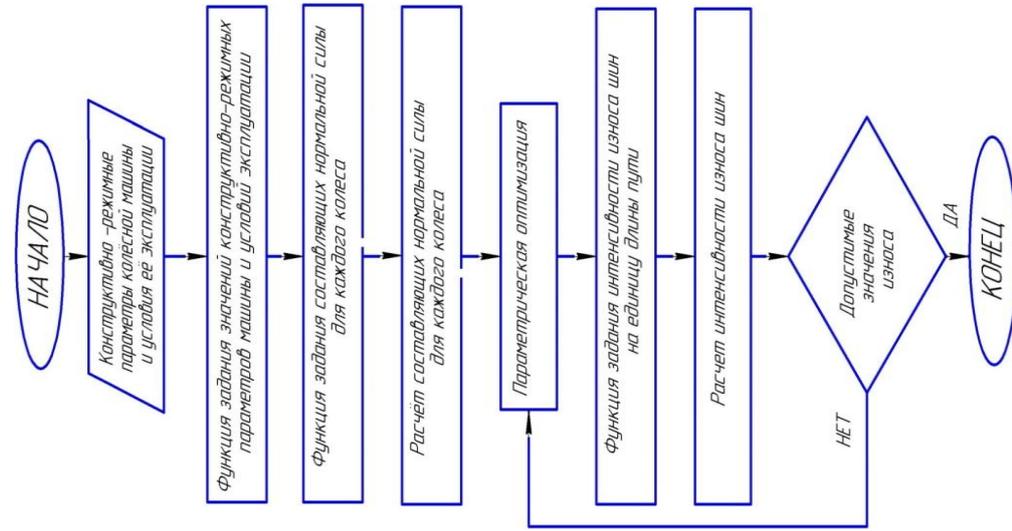


Рисунок 3.6 – Алгоритм работы программы «Определение интенсивности износа протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия»

Согласно утверждению В.П. Горячкина: «Чтобы добиться наиболее высоких показателей производительности труда, необходимо всесторонне знать условия, в которых должен осуществляться данный производственный процесс, и на основе закономерностей влияния отдельных факторов найти лучшее решение организации его выполнения». Необходимо реализовывать производственные эксперименты в условиях, близких к предлагаемым теоретическим исследованиям. Наиболее подходящие для осуществления метода реализации процесса стабильного движения в рамках технологического коридора являются природно-климатические и ландшафтные условия Кувандыкского района Оренбургской области. Данный район расположен в наиболее возвышенной низкогорно-высоко-равнинной части Оренбуржья, в связи с этим большинство полей представляют собой негоризонтальные поверхности.

Выводы:

1. Предложена функция интенсивности изнашивания протектора на единицу длины пути пневматического колеса, позволяющая определить дополнительный износ при варьировании углов увода шин относительно изменений углов наклона опорной поверхности.

2. Разработано программно-аналитическое обеспечение в виде алгоритма и программного средства, позволяющее проведение математического эксперимента по определению величин износа шин передних и задних колес эксплуатируемого трактора в технологических процессах в условиях склонного земледелия.

4 Методика экспериментальных исследований

4.1 Специфика алгоритмирования теоретических исследований метода курсовой стабилизации

Изначально в научных изысканиях предполагалась оптимизация эксплуатационных параметров мобильной системы с минимальным вмешательством в серийную конструкцию с целью повышения её курсовой устойчивости, играющую значительную роль во всех процессах производства полевых механизированных работ. В связи с этим, была создана и предложена во второй главе математическая модель, позволяющая на основании функциональных связей определять оптимальные величины углов увода, обеспечивающих прямолинейное движение трактора с сельскохозяйственным агрегатом на различных углах склона.

Сложность математических преобразований, принятия некоторых допущений и многообразие влияющих факторов на курсовую устойчивость трактора не дали возможности создать единый теоретический комплекс, позволяющий проведение адекватного анализа взаимосвязи конструктивно-режимных параметров эксплуатируемого тягового средства. В принципе, речь шла о том, что при внедрении и развитии инновационных технологий конкретные сопровождающие рекомендации должны были быть практически легко реализуемые, что при настоящей формализации теоретических исследований (2 глава) явилось затруднительным, поскольку аналитические зависимости, предлагаемые во второй главе, в основном связаны с использованием углов увода. Как известно, углы увода относятся к тем величинам, которые невозможно в определенный момент зафиксировать, в связи с этим измерить, поэтому не найдено необходимых измерительных и вычислительных приборов для определения их (рисунок 4.1). Таким образом, в настоящей работе основной акцент при реализации опытов делался на изменение внутришинного давления, от которых согласно формулам 2.3 и 2.4 зависят величины углов увода шин передних и задних колёс. Поскольку теоретические

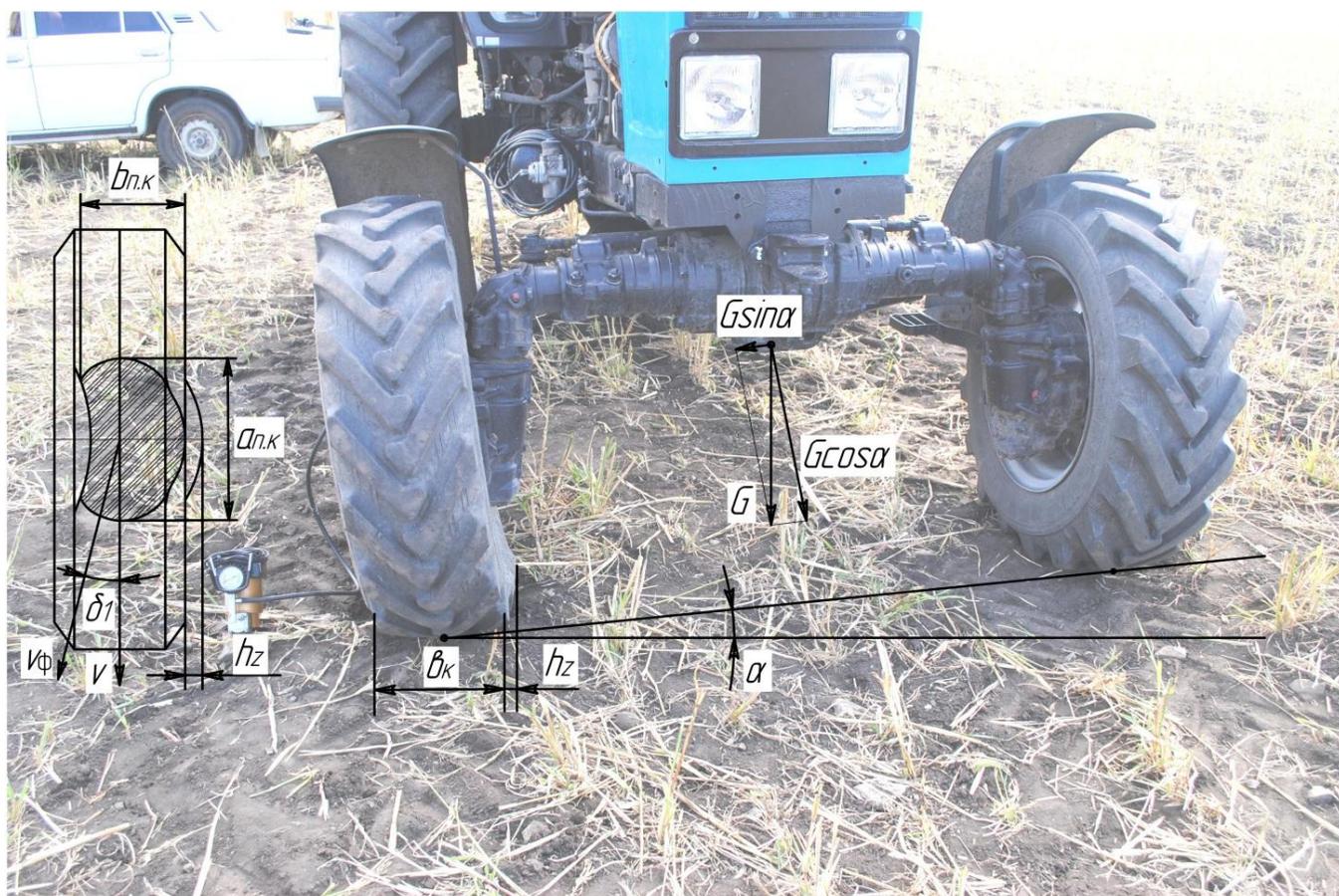


Рисунок 4.1 – Схема параметрических условий при расположении трактора в технологическом коридор

исследования второй главы включают в себя многообразие математических, аналитических выражений и уравнений пришли к выводу о необходимости создания алгоритма расчета компенсации смещения вниз за счет углов увода при движении трактора по склону (рисунок 4.2).

Для определения адекватных значений внутришинного давления, обеспечивающих необходимые углы увода передних и задних колёс с целью удержания машины на заданной траектории, необходимо было соблюдать следующие условия: угол склона опорной поверхности должен был находиться в пределах от 5 до 20°, а давление воздуха передних и задних колёс соответствовать допустимым значениям $p_{w1} = [0,08; 0,2\text{МПа}]$, $p_{w2} = [0,08; 0,18\text{МПа}]$.

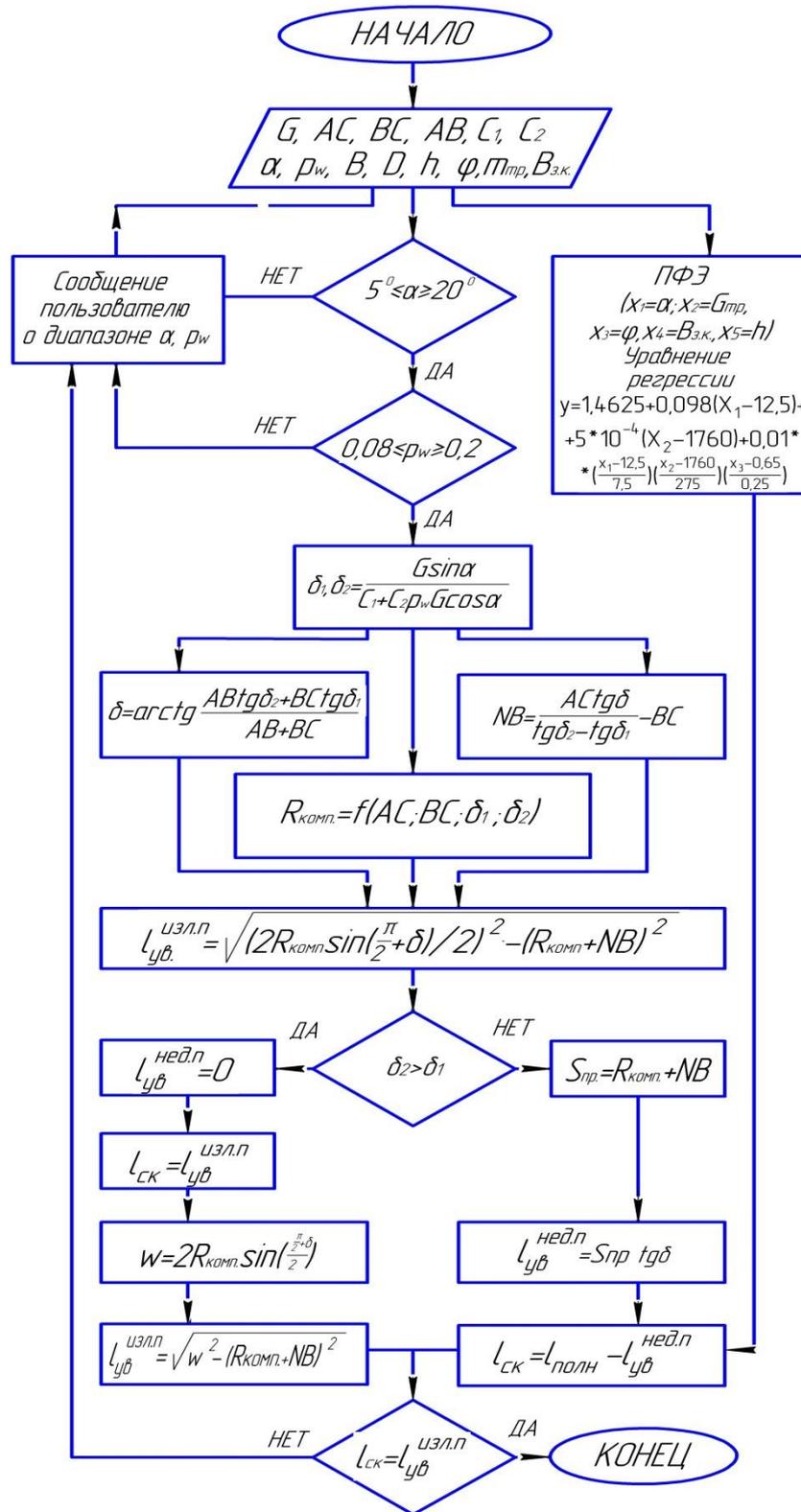


Рисунок 4.2 – Алгоритм оптимизации параметров устойчивости мобильной системы при движении по наклонной опорной поверхности

Согласно предлагаемому алгоритму в первую очередь, зная конструктивно-режимные характеристики трактора и условия его работы, определяются по выражениям 2.3, 2.4 углы увода от таких величин, как вес трактора, угол склона, внутришинное давление, и коэффициентов аппроксимации характеристик бокового увода шин. Данное выражение дает возможность определить углы увода колёсного движителя любой модели МЭС на различных склонах.

По сути, техническое решение научной работы заключается в создании поворота машины вверх без влияния оператора на рулевое колесо за счет изменения её вида поворачиваемости для компенсации смещения машины вниз от траектории. Таким образом, поворот трактора осуществляется с компенсационным радиусом, который выражается по формуле 2.20. Угол увода центра тяжести машины определяется за счет координат центра тяжести и углов увода колес по зависимости 2.24. Пройденный путь составляет сумму компенсационного радиуса и геометрического элемента $|NB|$. В связи с нахождением всех необходимых величин легко определяется по формуле 2.25 смещение трактора от траектории. Также необходимо отметить, что определение данного смещения от заданной траектории отличается в зависимости от вида поворачиваемости.

При избыточной поворачиваемости, как предложено в техническом решении во второй главе, полное смещение от траектории равно смещению от скольжения трактора по наклонной опорной поверхности и смещению, вызванному уводом при его излишней поворачиваемости ($l_{\text{полн.}} = l_{\text{ск}} = l_{\text{ув.}}^{\text{изл.п.}}$).

По сути, в данном способе прямолинейное движение создается за счет поворота, компенсирующего смещение по линейной величине. Смещение от увода при излишней поворачиваемости трактора определяется с помощью расчетных величин – длины хорды окружности поворота трактора вверх w , пройденного пути в коридоре движения $L_{\text{пр}}$, компенсационного радиуса $R_{\text{комп}}$, геометрического элемента $|NB|$, угла увода центра тяжести машины δ и углов увода передних и задних колёс δ_1 и δ_2 соответственно по формулам, приведенным во второй главе. Однако в данном варианте непонятно, на какую величину необходимо сместить

трактор вверх по склону при движении его по траектории на различных почвенных фонах.

При недостаточной поворачиваемости трактора, что является его обычным состоянием, общее смещение от траектории складывается из двух составляющих: смещения от увода и скольжения ($l_{\text{полн.}} = l_{\text{ск}} + l_{\text{ув.}}^{\text{нед.п.}}$). Если в указанном случае смещение от увода $l_{\text{ув.}}^{\text{нед.п.}}$ невозможно определить по аналитическим зависимостям приведенным во второй главе при условии недостаточной поворачиваемости $\delta_1 \geq \delta_2$, то, зная полное смещение трактора в составе сельскохозяйственного агрегата, можно определить смещение от скольжения на конкретных склонах и почвах ($l_{\text{ск}} = l_{\text{полн.}} - l_{\text{ув.}}^{\text{нед.п.}}$), которое, по сути, является величиной, равной смещению машины вверх по склону ($l_{\text{ск}} = l_{\text{ув.}}^{\text{изл.п.}}$).

Фактически, для дальнейших системных преобразований и комплексного решения задачи исследований необходимо было введение в алгоритм функции, определяющей полное поперечное смещение тягового средства с с.-х. агрегатом от заданной траектории. Реализация данной процедуры была выполнена посредством постановки полного факторного эксперимента 2^5 , который позволил получить уравнение регрессии, связывающее уровни факторов: эксплуатационную массу трактора; углы склонов; виды почв; величину ширины колеи задних колес; координаты центра масс. Это уравнение позволило определить величину полного смещения $l_{\text{полн.}}$ внутри исследованной области поверхности отклика.

4.2 Методика проведения полного факторного эксперимента

4.2.1 Инженерно-техническое обеспечение эксперимента

Производственные испытания проводились в ОАО «Дружба» Кувандыкского района Оренбургской области (приложение 5) на модели трактора МТЗ-82.1 с культиватором КРН-5,6В с целью экспериментального определения влияния ряда

факторов на величину полного поперечного смещения МТА от заданной траектории при движении его на склонах.

Комплектация трактора с учетом массы водителя и горючего соответствовала указанной в технической характеристике завода-изготовителя. Машина подбиралась для испытаний при условии, чтобы её наработка составляла не менее 150 моточасов, при этом износ почвозацепов движителей по высоте не превышал 15%.

Опыты проводились при температуре окружающего воздуха 20 ± 5 °С. Длина испытательного участка L_r (зачетная делянка) составляла 50 м. Углы опорной поверхности участка находились в пределах от 5 до 20^0 .

Для обеспечения чистоты проведения экспериментов необходимо было во время опыта сохранять действительную скорость движения постоянной ($V_d = \text{const}$). Причем проводились опыты при нормальных внутришинных давлениях в передних и задних колёсах ($p_{w1} = 0,14$ МПа, $p_{w2} = 0,16$ МПа), соответствующих условию недостаточной поворачиваемости (рисунок 4.3 и 4.4) [25;37;52;55;68;78;108].

Испытания проводились на следующих почвах: целина, плотная залежь с коэффициентом сцепления $\varphi=0,7-0,9$; стерня с $\varphi=0,6-0,8$; вспаханное поле с $\varphi =0,5-0,7$; поле, подготовленное под посев с $\varphi=0,4-0,6$. Данные условия позволили провести серии опытов на различных склонах и почвах с целью определения эмпирических значений полного поперечного смещения МТА от заданной траектории.

Порядок проведения исследований. На участке выбиралось направление движения и намечался коридор движения, от края которого определялось полное поперечное смещение. Опыты проводились по пять раз на склонах $5,10,15,20^0$ на каждом почвенном фоне. Во всех опытах требовалось установить полное поперечное смещение трактора от заданной траектории при его недостаточной поворачиваемости. В процессе прогона рулевое колесо фиксировалось с учётом люфта, и корректирующие воздействия оператора не проводились.

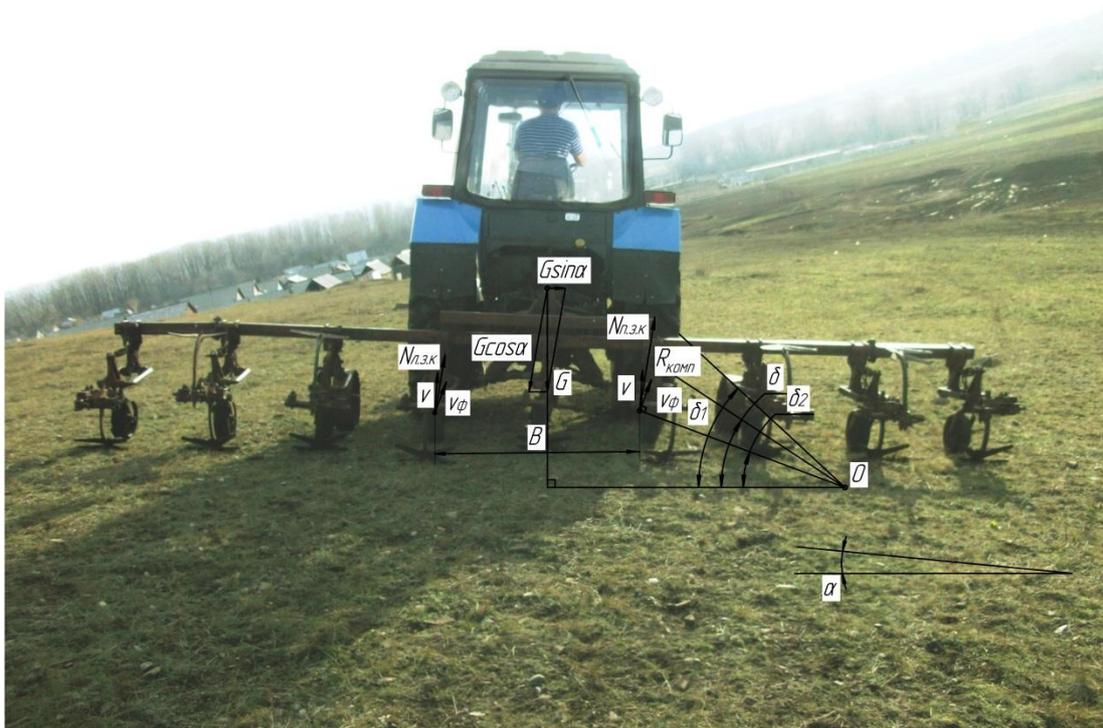


Рисунок 4.3 – Трактор МТЗ-82.1 с культиватором КРН-5,6В на склоне в процессе эксперимента



Рисунок 4.4 – Трактор МТ-82.1 с культиватором КРН-5,6В на склоне в процессе эксперимента

В соответствии с программой экспериментальных исследований использовались измерительные приборы линейного, углового, пневматического и оптического типов.

4.2.2 Разработка экспериментальной модели исследуемого процесса

Обработка результатов измерений производилась по общей методике экспериментального исследования с учетом рекомендаций [2;26;28;56;84]. Таким образом, методика экспериментальных исследований позволила определить полное смещение трактора с агрегатом от траектории в зависимости от заданных факторов. Эксперименты проводились с пятикратной повторностью, что обеспечило достаточно высокую надежность опытов.

Исследовали зависимость полного поперечного смещения трактора от траектории при его недостаточной поворачиваемости (y) от следующих факторов: углов склона (x_1); эксплуатационной массы трактора (x_2); видов почв (x_3); величины ширины колеи задних колес (x_4); высоты центра масс (x_5).

В качестве верхнего уровня для x_1 установлен угол склона, равный 20^0 ; в качестве нижнего уровня – 5^0 . Для x_2 выбрана эксплуатационная масса трактора, равная 3700 кг; в качестве нижнего уровня – 3150 кг. Для x_3 определен коэффициент сцепления почвы, равный 0,9; в качестве нижнего уровня – 0,4. Для x_4 выбрана ширина колеи задних колёс, равная 11,8 м; в качестве нижнего уровня – 1,55м; Для x_5 установлена высота центра масс, равная 1,1 м; в качестве нижнего уровня – 0,9 м.

Тогда для рассматриваемого случая полный факторный эксперимент включал в соответствии с планом 32 варианта (таблица 4.1).

На основании плана ПФЭ 2^5 в натуральных переменных получили с помощью системы STATISTICA 10 уравнение модели. В эксперименте по выявлению

Таблица 4.1 – План полного факторного эксперимента 2^5 в натуральных переменных

и	Натуральные переменные					Выход процесса (полное смещение), м
	X ₁ угол скло- на, град.	X ₂ экспл. масса трак- тора, кг	X ₃ к-т сцепле- ния почвы	X ₄ ширина колеи задних колёс, м	X ₅ высота центра масс, м	у
1	5	3150	0,4	1,55	0,9	1,47
2	20	3150	0,4	1,55	0,9	2,94
3	5	3700	0,4	1,55	0,9	1,63
4	20	3700	0,4	1,55	0,9	3,21
5	5	3150	0,9	1,55	0,9	1,37
6	20	3150	0,9	1,55	0,9	2,84
7	5	3700	0,9	1,55	0,9	1,62
8	20	3700	0,9	1,55	0,9	3,09
9	5	3150	0,4	1,80	0,9	1,45
10	20	3150	0,4	1,80	0,9	2,73
11	5	3700	0,4	1,80	0,9	1,53
12	20	3700	0,4	1,80	0,9	3,11
13	5	3150	0,9	1,80	0,9	1,28
14	20	3150	0,9	1,80	0,9	2,74
15	5	3700	0,9	1,80	0,9	1,52
16	20	3700	0,9	1,80	0,9	2,99
17	5	3150	0,4	1,55	1,1	1,47
18	20	3150	0,4	1,55	1,1	2,93
19	5	3700	0,4	1,55	1,1	1,63
20	20	3700	0,4	1,55	1,1	3,20
21	5	3150	0,9	1,55	1,1	1,36
22	20	3150	0,9	1,55	1,1	2,84
23	5	3700	0,9	1,55	1,1	1,62
24	20	3700	0,9	1,55	1,1	3,09
25	5	3150	0,4	1,80	1,1	1,46
26	20	3150	0,4	1,80	1,1	2,74
27	5	3700	0,4	1,80	1,1	1,54
28	20	3700	0,4	1,80	1,1	3,11
29	5	3150	0,9	1,80	1,1	1,28
30	20	3150	0,9	1,80	1,1	2,73
31	5	3700	0,9	1,80	1,1	1,61
32	20	3700	0,9	1,80	1,1	2,99

влияния пяти факторов на полное смещение трактора от траектории статически значимыми при 5%-ном уровне значимости оказались коэффициенты регрессии $b_0=1,4625$, $b_1=0,7375$, $b_2=0,1375$, $b_3=0,01$. Соответствующее уравнение модели с кодированными переменными для данного эксперимента имеет следующий вид:

$$y=1,4625+0,7375t_1+0,1375 t_2+0,01 t_1 t_2t_3 . \quad (4.1)$$

Проведя замену переменных

$$t_1 = \frac{x_1-12,5}{7,5}, \quad (4.2)$$

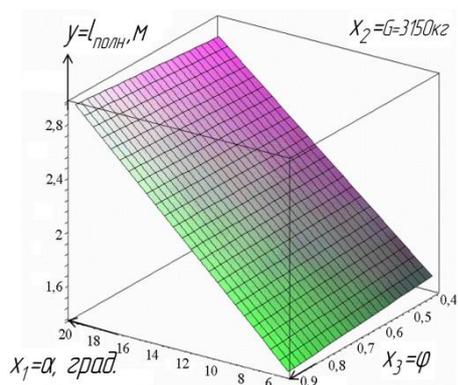
$$t_2 = \frac{x_2-1760}{275}, \quad (4.3)$$

$$t_3 = \frac{x_3-0,65}{0,25}, \quad (4.4)$$

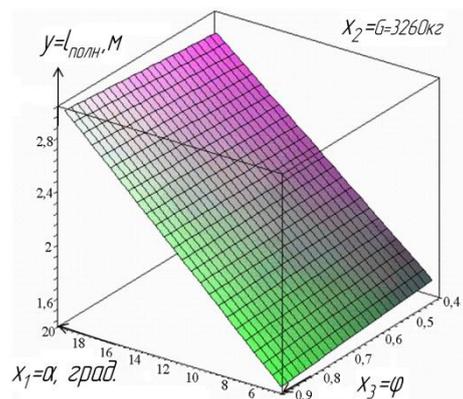
получили уравнение регрессии с нормальными переменными:

$$y=1,4625+0,098(X_1-12,5)+5 \cdot 10^{-4}(X_2-1760)+0,01 \left(\frac{X_1-12,5}{7,5} \right) \cdot \left(\frac{X_2-1760}{275} \right) \cdot \left(\frac{X_3-0,65}{0,25} \right) \quad (4.5)$$

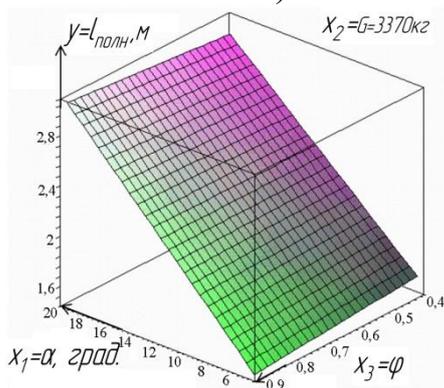
Уравнение регрессии позволяет провести дальнейшие аналитические процедуры по определению величины заброса трактора с агрегатом в различных агроландшафтных условиях и подтвердить экспериментальные исследования предлагаемого метода удержания тягового средства на заданной траектории (рисунок 4.5)[107].



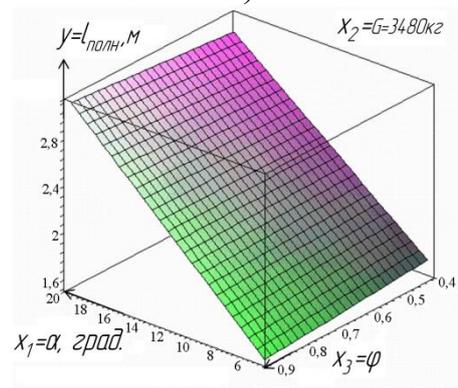
а)



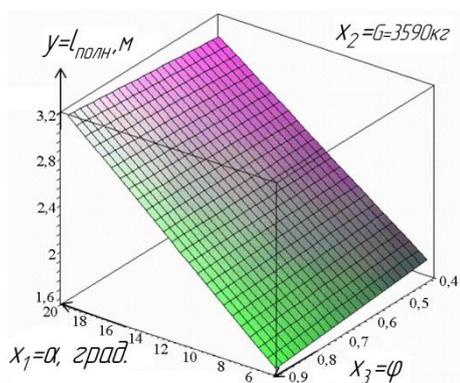
б)



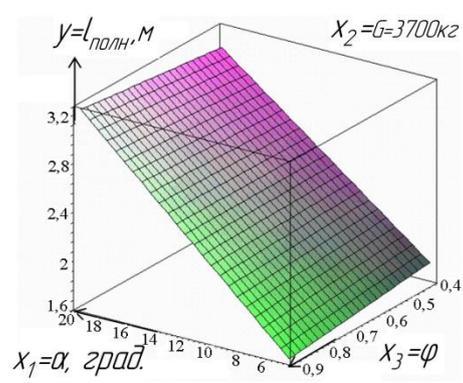
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4.5 – Поверхность отклика $y=l_{\text{полн}}=1,4625+0,098(X_1-12,5)+$
 $+5 \cdot 10^{-4}(X_2-1760)+0,01\left(\frac{X_1-12,5}{7,5}\right) \cdot \left(\frac{X_2-1760}{275}\right) \cdot \left(\frac{X_3-0,65}{0,25}\right)$ при постоянной нормальной
 переменной X_2 и изменяющихся переменных $X_1=[5^0;20^0]$, $X_3=[0,4;0,9]$ при:
 а) $X_2=3150$ кг; б) $X_2=3260$ кг; в) $X_2=3370$ кг; г) $X_2=3480$ кг; д) $X_2=3590$ кг;
 е) $X_2=3700$ кг.

4.3 Методика производственного эксперимента

4.3.1 Определение режимных параметров и условий проведения эксперимента

Для проверки правильности проведенных математических процедур с принятыми допущениями проведены экспериментальные исследования на тракторе МТЗ-82.1 с КРН-5,6В при движении его в заданных условиях. Они позволяют определить оптимальные значения давления воздуха в шинах передних и задних колёс, посредством которых было обеспечено прямолинейное движение тягового средства на различных почвах и углах склона.

Целью проводимых экспериментов было выявление сходимости научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы с результатами производственных исследований движения трактора с учетом применения способа стабилизации курсовой устойчивости в условиях склонного земледелия. Достижение поставленной цели экспериментальных исследований требовало проведения математического анализа по определению смещения, вызванного скольжением трактора, на различных почвенных фонах и склонах и измерения экспериментальной величины отклонения от заданного коридора движения при реализации излишней поворачиваемости для компенсации, смещения вызванного скольжением, а также установления оптимальных значений внутришинного давления воздуха.

Производственные испытания по определению пригодности к эксплуатации разработанного способа повышения устойчивости движения колёсного трактора и выявления его недостатков проводились в аналогичных условиях ПФЭ. Перед экспериментом проведены расчеты по определению величины смещения от скольжения трактора $l_{ск}$ на различных склонах, используя зависимость:

$$l_{ск} = l_{полн} - l_{ув.}^{нед.п.} \quad (4.6)$$

Величина смещения, вызванная углами увода трактора при его недостаточной поворачиваемости $l_{ув.}^{нед.п.}$, является функцией, зависящей от угла склона, длины гона и угла увода центра тяжести машины. Угол склона и длина гона – величины, не зависящие от конструктивного исполнения трактора, а угол увода центра тяжести машины находится в прямой зависимости от углов увода колёс переднего и заднего мостов.

Согласно условию недостаточной поворачиваемости трактора $\delta_1 > \delta_2$ определили по зависимостям 2.3,2.4 углы увода передних и задних колёс δ_1, δ_2 на различных склонах (таблица 4.2). Причем проводились опыты при нормальных внутришинных давлениях в передних и задних колёсах ($p_{w1} = 0,14\text{МПа}$, $p_{w2} = 0,16\text{МПа}$), соответствующие условию недостаточной поворачиваемости.

Таблица 4.2 – Углы увода δ_1, δ_2 (град.) шин 11,2-20 модели Ф-35-1, 15,5R38 модели Ф-2А трактора МТЗ - 82.1 при реализации недостаточной поворачиваемости на различных склонах при давлении воздуха в шинах $p_{w1} = 0,14\text{МПа}$, $p_{w2} = 0,16\text{МПа}$ и массе трактора $m_{тр}=3150$ кг

Параметры		Углы склонов, град.			
		5°	10°	15°	20°
Переднее колесо с шиной 11,2-20 модели Ф-35-1	Угол увода δ_1 , град.	3,5	7,5	10,5	14
Заднее колесо с шиной 15,5R38 модели Ф-2А	Угол увода δ_2 , град.	1,8	4	5,5	7

По данным таблицы 4.2 были определены углы увода центра тяжести машины $\delta = f(\delta_1; \delta_2; \alpha)$ при реализации недостаточной поворачиваемости на различных склонах (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Углы увода центра тяжести δ (град.) трактора МТЗ - 82.1 при реализации недостаточной поворачиваемости от угла склона α и углов увода передних и задних колёс δ_1, δ_2 при массе трактора $m_{тр}=3150$ кг

Параметры		Углы склонов, град.					
		5 ⁰	10 ⁰	15 ⁰	20 ⁰		
Угол увода δ_1 переднего колеса 11,2-20 модели Ф-35-1, град.	3,5 ⁰	2,7	-	-	-	1,8 ⁰	Угол увода δ_2 заднего колеса 15,5R38 модели Ф-2А, град.
	7,5 ⁰	-	5,8	-	-	4 ⁰	
	10,5 ⁰	-	-	8	-	5,5 ⁰	
	14 ⁰	-	-	-	10,5	7	

Следующим этапом математического анализа было вычисление поперечного смещения трактора МТЗ-82.1 при реализации недостаточной поворачиваемости $l_{ув.}^{нед.п.}$ (м) на различных углах склона $\alpha = [5^0; 20^0]$ (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Смещение, вызванное углами увода трактора МТЗ-82.1 при его недостаточной поворачиваемости $l_{ув.}^{нед.п.}$ (м) на длине гона $L_{пр}=50$ м

Показатели	Угол склона, град			
	5 ⁰	10 ⁰	15 ⁰	20 ⁰
$l_{ув.}^{нед.п.}$, м	0,28	0,45	0,97	1,98

Полное поперечное смещение $l_{полн}$ (м) выражалось через полученное уравнение регрессии 4.5, с учетом массы трактора $m_{тр}= 3150$ кг, $p_{\omega 1} = 0,14$ МПа, $p_{\omega 2} = 0,16$ МПа, $L_{пр}=50$ м, $AB=1,225$ м, $BC=1,225$ м на исследуемых склонах и почвах (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Полное поперечное смещение трактора МТЗ-82.1 $l_{\text{полн}}$, м

№ п.п. Полное поперечное смещение трактора $l_{\text{полн}}$, м	Углы склонов, град.			
	5°	10°	15°	20°
	Вид почвы: плотная залежь с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,8$			
1.	0,88	1,13	1,68	2,70
	Вид почвы: стерня с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,7$			
2.	0,88	1,13	1,72	2,76
	Вид почвы: вспаханное поле с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,6$			
3.	0,88	1,15	1,73	2,77
	Вид почвы: поле, подготовленное под посев с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,5$			
4.	0,88	1,15	1,74	2,77

В связи с этим было определено выражение величины смещения от скольжения трактора МТЗ-82.1 по функции 4.6 на различных склонах (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Смещение, вызванное поперечным скольжением $l_{\text{ск}}$ (м) трактора МТЗ-82.1 при реализации недостаточной поворачиваемости на длине гона $L_{\text{пр}}=50$ м

№ п.п. Смещение, вызванное поперечным скольжением $l_{\text{ск}}$ трактора, м	Углы склонов, град.			
	5°	10°	15°	20°
	Вид почвы: плотная залежь с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,8$			
1.	0,6	0,68	0,71	0,72
	Вид почвы: стерня с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,7$			
2.	0,6	0,68	0,75	0,78
	Вид почвы: вспаханное поле с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,6$			
3.	0,6	0,7	0,75	0,79
	Вид почвы: поле, подготовленное под посев с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,5$			
4.	0,6	0,7	0,75	0,79

По методике научных исследований необходимо было смещение от скольжения компенсировать смещением вверх по склону, вызванным излишней поворачиваемостью $l_{ув.}^{изл.п.}$ (м) трактора МТЗ-82.1. В связи с этим определили углы увода переднего и заднего мостов δ_1, δ_2 согласно условию излишней поворачиваемости $\delta_2 > \delta_1$ и допустимым значениям внутришинного давления, учитывая, что для наибольшего диапазона варьирования углов увода необходимо было определять наименьшее значение угла увода переднего колеса δ_1 и наибольшее значение угла увода заднего колеса δ_2 . Однако на склонах с небольшими углами невозможно добиться наибольшего допустимого значения угла увода шин задних колёс ($\delta_2=15^0$) и, наоборот, на крутых склонах при высоком давлении углы увода не снижаются до 2^0 . Таким образом, углы увода δ_1, δ_2 шин 11,2-20 модели Ф-35-1, 15,5R38 модели Ф-2А трактора МТЗ-82.1 при реализации излишней поворачиваемости лежат в интервалах $[2^0; 3,8^0]$ для склона 5^0 , $[4,8^0; 7^0]$ для склона 10^0 , $[7,4^0; 11^0]$ для склона 15^0 , $[10^0; 14,6^0]$ для склона 20^0 .

Согласно значениям смещения, вызванным поперечным скольжением $l_{ск}$ (таблица 4.6) необходимо было установление давления в шинах таким образом, чтобы создать равенство:

$$l_{ск} = l_{ув.}^{изл.п.}, \quad (4.7)$$

используя значения углов увода колес, лежащих в расчетных интервалах.

Используя данные математического анализа, провели производственный эксперимент, который осуществили на склонах с углами $5, 10, 15, 20^0$ и на почвенном фоне – стерня ($\varphi = 0,7$) с пятикратной повторностью, данные условия являются достаточными для проверки адекватности теоретических исследований способа стабилизации курсового движения трактора в условиях склонного земледелия (рисунок 4.6). При проведении опытов за критерий оценки правильности выбора внутришинного давления в колёсах было принято отклонение движения трактора с агрегатом от технологического коридора.

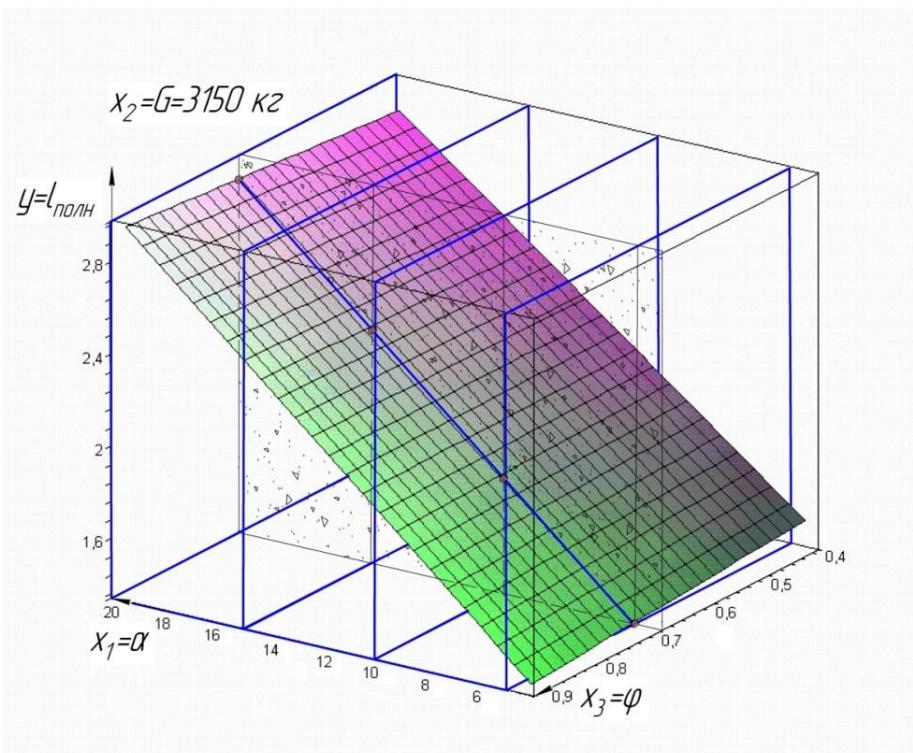


Рисунок 4.6 – Поверхность отклика $l_{\text{полн}} = y = 1,4625 + 0,098(X_1 - 12,5) + 5 \cdot 10^{-4}(X_2 - 1760) + 0,01 \left(\frac{X_1 - 12,5}{7,5} \right) \cdot \left(\frac{X_2 - 1760}{275} \right) \cdot \left(\frac{X_3 - 0,65}{0,25} \right)$ при постоянных нормальных переменных $G = X_2 = 3150$ кг, $\varphi = X_3 = 0,7$ и изменяющейся переменной $\alpha = X_1 = 5^0; 10^0; 15^0; 20^0$ для проверки адекватности теоретических исследований метода стабилизации курсового движения трактора в условиях склонного земледелия

Для обеспечения чистоты проведения экспериментов во время опытов сохраняли действительную скорость движения постоянной ($V_d = \text{const}$). Чтобы воспользоваться величиной отклонения от технологического коридора в качестве оценочного критерия правильности выбора оптимальных значений давлений воздуха в шинах, были проведены опыты при прочих равных условиях, то есть во время экспериментов изменяли только давление воздуха в шинах в зависимости от углов и фона опорной поверхности и следили за величиной отклонения. Допустимое отклонение принимали равным ширине защитной зоны $v_{3,3} = 0,3$ м. Такой подход к проведению экспериментальных исследований позволил получить данные для проверки адекватности теоретических исследований метода стабилизации курсового движения трактора в условиях склонного земледелия.

4.3.2 Проведение производственных испытаний

При проведении экспериментов осуществлялись замеры траекторий движения трактора МТЗ-82.1 с КРН-5,6В от технологического коридора (приложение 6).

При экспериментальных исследованиях трактора с агрегатом фиксировались отклонения от технологической траектории, действительная скорость движения трактора v_d и давление воздуха p_ω в шинах.

Во время проведения опытов действительная скорость движения трактора поддерживалась постоянной – 8 км/ч – и контролировалась по дисплею спидометра.

С помощью компрессора с манометром Tornado AC 580 контролировалось давление воздуха p_ω в шинах колес трактора. Погрешность манометра (по паспорту) составляла 0,5 %. В каждой серии опытов для определения отклонений от траектории давление воздуха в шинах задних колес устанавливалось на уровне наибольшего допустимого значения, а в шинах передних колес изменялось.

Трактор и контрольные участки технологического коридора готовились к испытаниям в соответствии с требованиями ГОСТов [37;38].

Длина технологического коридора составляла 50 м, ширина 2,45 м и ширина защитной зоны $b_{3,3}=0,3$ м и были определены посредством рулетки. Перед зачетным участком и после были расположены участки «въезд – выезд» [37]. При движении на участке «въезд – выезд» устанавливалась необходимая скорость ($v_d=8$ км/ч) движения трактора, которая контролировалась на протяжении всего опыта с помощью спидометра.

На передних колесах трактора с шины 11,2-20 модели Ф-35-1 давление устанавливалось 0,2 МПа (таблица 4.6) и при необходимости снижалось. В колесах более нагруженного заднего моста, оборудованного шинами 15,5R38 модели Ф-2А, устанавливалось наименьшее допустимое значение давления 0,08 МПа. Перед началом эксперимента в шинах переднего моста трактора давление воздуха сначала устанавливалось наибольшее допустимым (0,2 МПа), затем при необхо-

димости корректировки смещения снижалось на 0,02МПа. В последнем опыте каждой серии значения давления в шинах передних колес устанавливались с оптимальным значением. Результаты экспериментов обрабатывались по известным методикам [2;27;37].

Как показали испытания, трактор движется внутри заданного коридора ($КД+2\sigma_{3,3}=3,05\text{м}$) на склонах до 20^0 за счет использования технического решения стабилизации положения движущегося колёсного транспортного средства на наклонной опорной поверхности. Траектории движения трактора МТЗ-82.1 на различных склонах и на одном почвенном фоне (стерня с $\varphi = 0,7$) показаны на рисунках 4.7, 4.8, 4.9, 4.10. Посредством графоаналитических процедур были установлены диапазоны оптимальных значений давления воздуха в шинах в зависимости от факторов: угла опорной поверхности α и коэффициента сцепления с почвой φ . Согласно методике внутришинное давление задних колес 15,5R38 модели Ф-2А вне зависимости от угла склона и почв имеет наибольшее допустимое значение (0,08 МПа), внутришинное давление передних колес выбиралось с учетом наименьшего отклонения от технологического коридора. Анализ массива значений отклонений от скольжения показал, что их значения отличаются друг от друга относительно типа опорной поверхности на тысячную долю метров (таблица 4.5). В связи с этим давление воздуха в шинах передних колес при движении на почвах с коэффициентами сцепления, лежащих в интервале $[0,5;0,8]$ и на склоне 5^0 , составило одинаковое значение, равное 0,2 МПа, что является наибольшим допустимым значением. Также при движении трактора МТЗ-82.1 с КРН-5,6В на склоне 10^0 внутришинное давление воздуха в переднем мосту должно составлять 0,17 МПа. На опорной поверхности с углом наклона $\alpha=15^0$ и 20^0 давление воздуха в шине 11,2-20 модели Ф-35-1 устанавливается на значении 0,14МПа.

Углы увода передних и задних колес относительно оптимальных значений давления воздуха определены посредством программного обеспечения MathCAD 14 (таблица 4.7), которые показали выполнения условия излишней поворачиваемости.

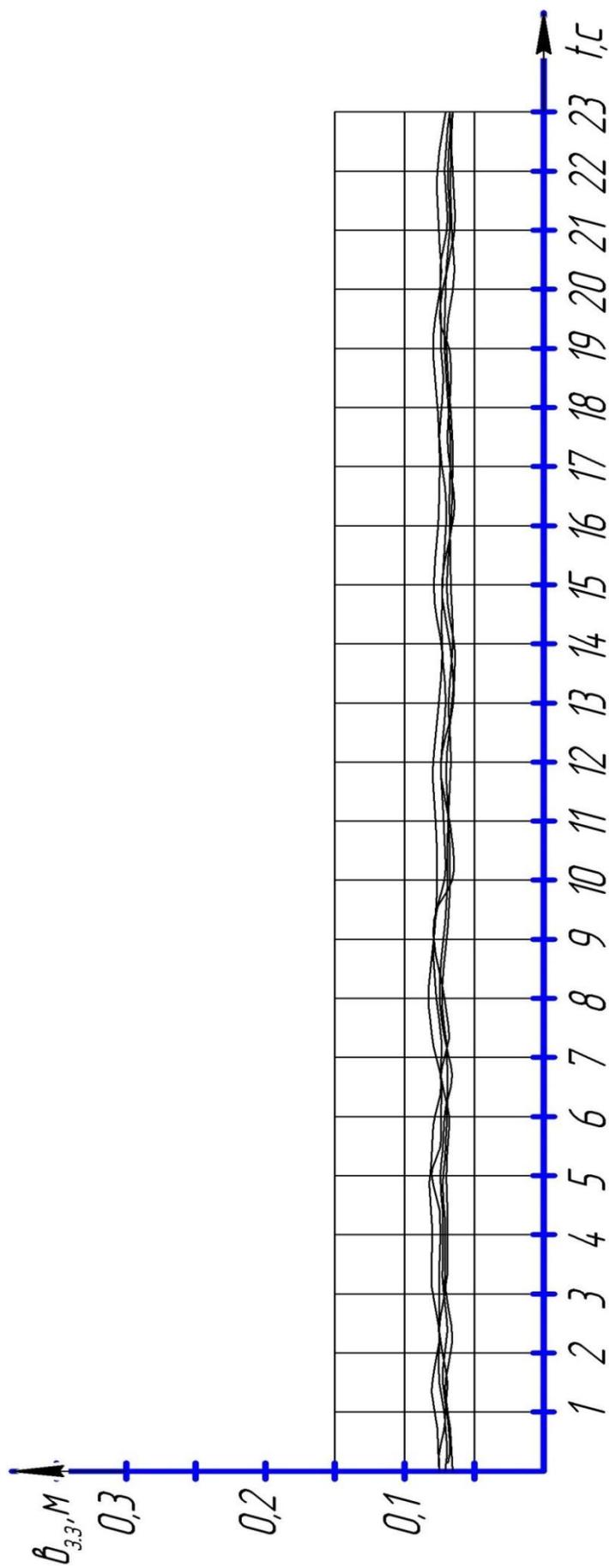


Рисунок 4.7 – Траектории движения трактора МТЗ-82.1 с КРН-5,6В укомплектованного шинами 11,2-20 модели Ф-35-1 и 15,5R38 модели Ф-2А на угле склона $\alpha = 5^\circ$ при постоянном значении внутреннего давления задних колес $p_{\omega 2} = 0,08$ МПа и внутренних давлениях передних колёс

$p_{\omega 1} = 0,2$ МПа-————

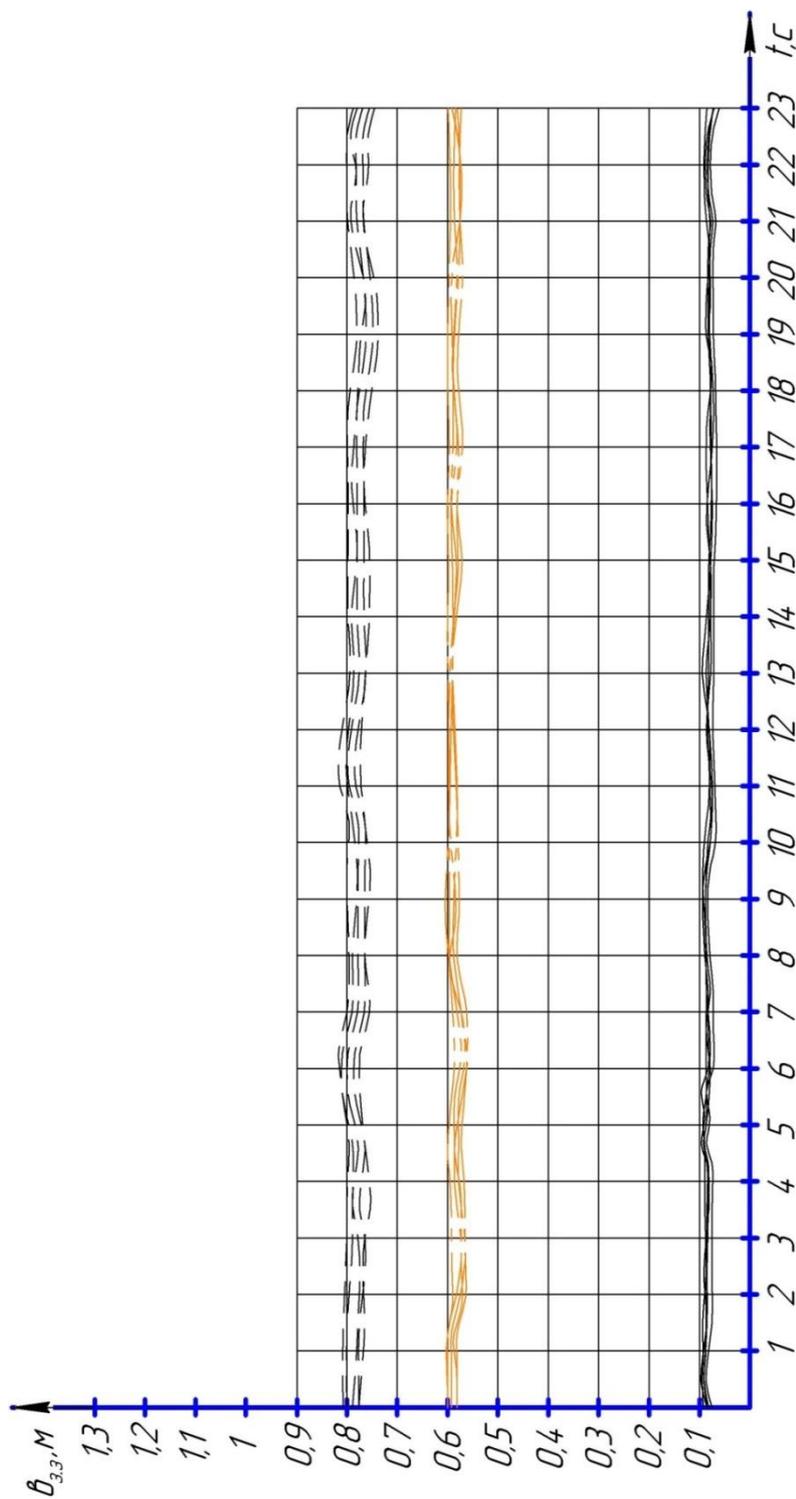


Рисунок 4.8 – Траектории движения трактора МТЗ-82.1 с КРН-5,6В укомплектованного шинами 11,2-20 модели Ф-35-1 и 15,5R38 модели Ф-2А на угле склона $\alpha = 10^{\circ}$ при постоянном значении внутреннего давления задних колес $p_{\omega 2} = 0,08$ МПа :и внутренних давлений передних колёс:

— $p_{\omega 1} = 0,17$ МПа;

- - - $p_{\omega 1} = 0,18$ МПа;

- · - $p_{\omega 1} = 0,2$ МПа.

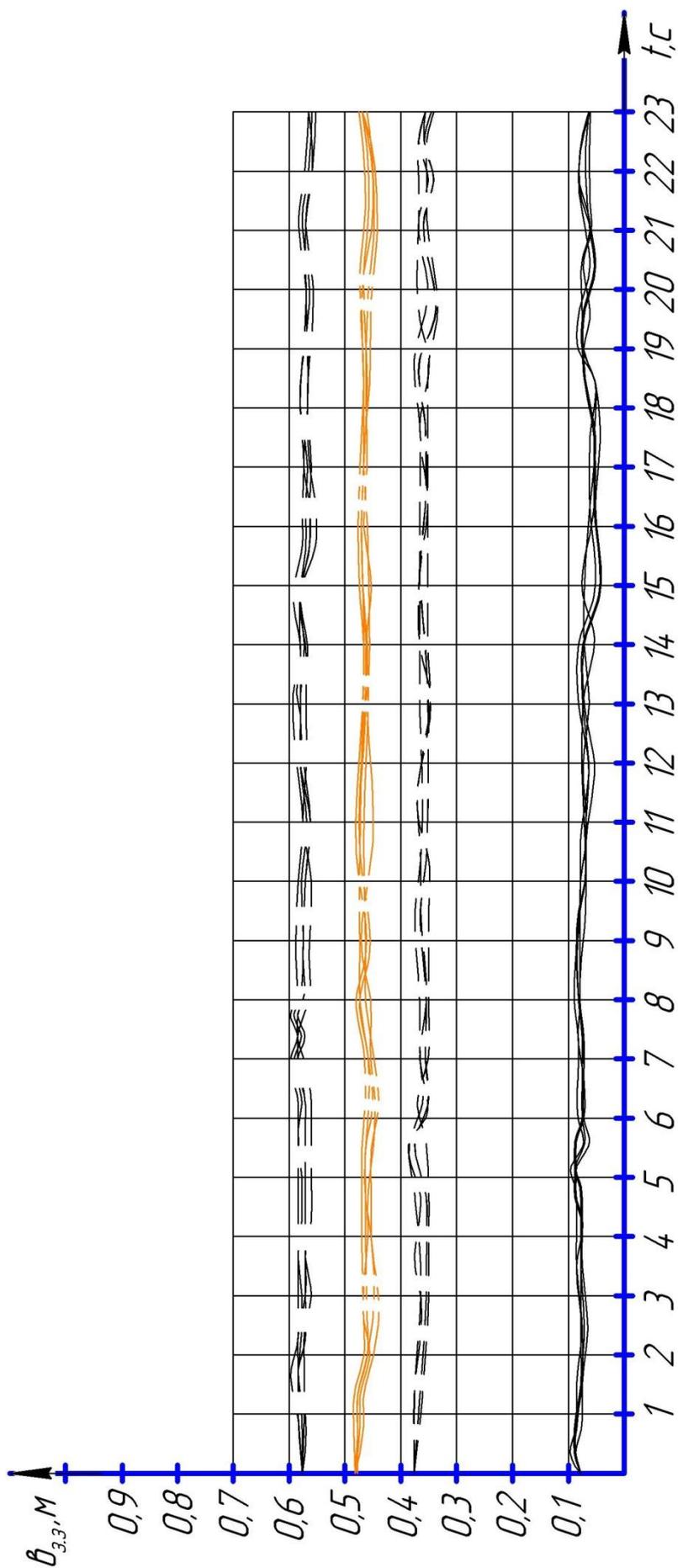


Рисунок 4.9 – Траектории движения трактора МТЗ-82.1 с КРН-5,6В укомплектованного шинами 11,2-20 модели Ф-35-1 и 15,5R38 модели Ф-2А на угле склона $\alpha = 15^\circ$ при постоянном значении внутреннего давления задних колес $p_{\omega 2} = 0,08$ МПа и внутренних давлениях передних колёс:

— $p_{\omega 1} = 0,14$ МПа;

- - - $p_{\omega 1} = 0,16$ МПа;

- · - $p_{\omega 1} = 0,18$ МПа;

— $p_{\omega 1} = 0,2$ МПа.

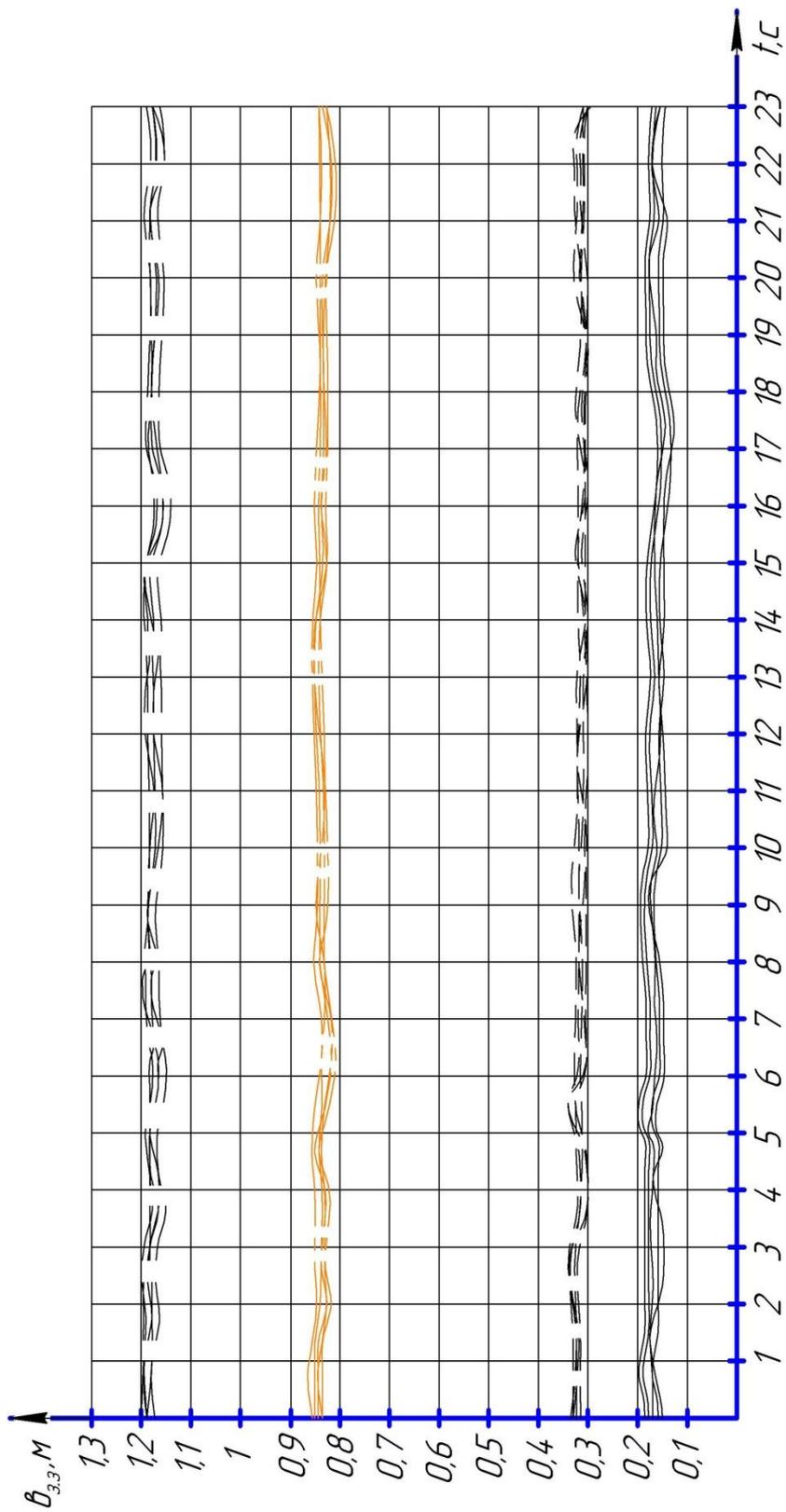


Рисунок 4.10 – Траектории движения трактора МТЗ-82.1 с КРН-5,6В укомплектованного шинами 11,2-20 модели Ф-35-1 и 15,5R38 модели Ф-2А на угле склона $\alpha = 20^\circ$ при постоянном значении внутреннего давления задних колес $p_{\omega 2} = 0,08$ МПа и внутренних давлениях передних колёс

— $p_{\omega 1} = 0,14$ МПа;

- - - $p_{\omega 1} = 0,16$ МПа;

- · - $p_{\omega 1} = 0,18$ МПа;

— $p_{\omega 1} = 0,2$ МПа.

Таблица 4.7 – Интервалы углов увода δ_1 , δ_2 шин 11,2-20 модели Ф-35-1, 15,5R38 модели Ф-2А трактора МТЗ- 82.1 при реализации излишней поворачиваемости на различных склонах и почвах с коэффициентом сцепления $\varphi=[0,5;0,8]$

Углы увода передних и задних колес, град.	Углы склонов, град.			
	5 ⁰	10 ⁰	15 ⁰	20 ⁰
δ_1	2,2	6,3	10,65	14,4
δ_2	3,8	7	11	15

По данным таблицы 4.7 возможно определение угла увода центра тяжести машины $\delta = f(\delta_1; \delta_2; \alpha)$ на различных склонах (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Углы увода центра тяжести δ трактора МТЗ- 82.1 при его излишней поворачиваемости от угла склона α и углов увода передних и задних колёс δ_1 , δ_2

Параметры							
	Углы склонов, град.						
	5	10	15	20			
Угол увода δ_1 переднего колеса 11,2-20 модели Ф-35-1, град.	2,2	3	-	-	-	3,8	Угол увода δ_2 заднего колеса 15,5R38 модели Ф-2А, град.
	6,3	-	6,65	-	-	7	
	10,65	-	-	10,8	-	11	
	14,4	-	-	-	14,7	15	

В результате экспериментального перемещения трактора по технологическому коридору установлено соответствие эмпирических данных величин отклонений от заданной траектории, полученных расчетным путем по разработанной методике со степенью адекватностью 90%. При внедрении метода стабилизации курсового движения тягового средства при реализации сельскохозяйственных технологических операций в условиях склонного земледелия, разработанного в

диссертации, коэффициент K составляет 0,65-0,70, что отражает уменьшение количества энергетических затрат на выравнивание траектории движения. Это является отдельным направлением исследования и при технико-экономическом анализе учитываться не будет. Изменение вида поворачиваемости в данном способе достигалось посредством варьирования значений внутришинного давления, которые находились в рамках значений, соответствующих эксплуатационным требованиям, предъявляемых к пневматическим шинам. В связи с этим величина предполагаемого нормального износа рабочих элементов шин не превышала допустимых значений износа при эксплуатации серийных образцов без использования предлагаемого способа.

Выводы:

1. Получено управление регрессии посредством постановки полного факторного эксперимента 2^5 , что позволило определить величину полного поперечного смещения вниз колесного трактора от технологического коридора при проведении сельскохозяйственных операций на наклонных опорных поверхностях для компенсации данной величины с помощью предложенного способа в диссертационной работе.

2. Экспериментально подтверждена эффективность функционирования колесных тракторов на наклонных опорных поверхностях до 20^0 за счет изменения вида поворачиваемости колесного движителя посредством варьирования внутришинного давления.

5 Оценка экономической эффективности внедрения способа курсовой стабилизации колесного трактора при движении по наклонной опорной поверхности

При обосновании целесообразности внедрения предлагаемого способа принимался во внимание тот факт, что при движении по прямолинейной траектории происходит снижение расхода топлива $Q_{\text{топ}}$ и увеличение производительности W технологического агрегата (при прочих равных условиях) [64;113;119].

Экономические показатели хозяйственной деятельности ОАО «Дружба» Кувандыкского района Оренбургской области показали, что фактическая ка $T_{\text{ф}}$ трактора МТЗ-82.1 на склонах во время выполнения сельскохозяйственных работ в течение 2014 года составила 700 часов при средней скорости движения $v=8$ км/ч. Следовательно, общий путь движения по фактической траектории трактора за год составил $L_{\text{ф}}^{\text{год}} = 5600$ км. В случае использования метода стабилизации движения, с учетом коэффициента оценки эффективности внедрения технического решения $K=0,3$ (2.40), общий путь движения трактора за год сократится на величину $\Delta L = 1680$ км. Фактически, при средней скорости движения 8 км/ч производственная деятельность оператора является неэффективной, то есть $t_{\text{ф}}^{\text{год}}=210$ часов в год или при 7 часовом рабочем дне – 30 дней в году.

Годовой экономический эффект зависит от многих факторов [113;119]. В нашем случае определяющими факторами стали количество сэкономленного топлива при движении трактора по прямолинейной траектории, сэкономленные денежные средства на заработную плату оператора и снижение амортизационных отчислений. Таким образом, годовой экономический эффект $\mathcal{E}_{\text{г}}$ равен, руб.:

$$\mathcal{E}_{\text{г}} = \mathcal{E}_{\text{т}} + \mathcal{E}_{\text{з}} + \mathcal{E}_{\text{а}}, \quad (5.1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{т}}$ – годовая экономия от снижения расхода топлива, руб./г.;

\mathcal{E}_3 – годовая экономия от снижения заработной платы, руб./г.;

\mathcal{E}_a – годовая экономия от снижения расходов на амортизационные отчисления, руб./г.

Затраты на топливо определялись по формуле:

$$\mathcal{E}_T = G_{\text{топ.}} \cdot \mathcal{C} \cdot t_{\text{пред.}}^{\text{год}}, \quad (5.2)$$

где $G_{\text{топ.}}$ – часовой расход топлива трактора, использованного в эксперименте, $G_{\text{топ.}}=185$ г/л.с.ч.;

\mathcal{C} – комплексная цена топлива, $\mathcal{C}=37$ руб/кг;

$t_{\text{ф}}^{\text{год}}$ – время, потраченное трактористом неэффективно в году (ч) $t_{\text{ф}}^{\text{год}}=210$ часов.

Годовая экономия от снижения расхода топлива при использовании предлагаемого способа составила $\mathcal{E}_{\text{топ.}}=116433,45$ руб.

Часовая ставка тракториста согласно экономическим показателям хозяйства равна 60 руб. Таким образом, годовая экономия от снижения заработной платы составила $\mathcal{E}_3=60 \cdot 210=12600$ руб./г.

Амортизационные отчисления за час работы трактора определялись, руб/ч.:

$$\mathcal{E}_a = \frac{B_{\text{тр.}} \cdot N_{a \text{ тр.}}}{100 \cdot T_{\text{ф}}}, \quad (5.3)$$

где $B_{\text{тр.}}$ – балансовая стоимость трактора, $B_{\text{тр.}}=700000$ руб.;

$N_{a \text{ тр.}}$ – норма амортизационных отчислений, $N_{a \text{ тр.}}=18,5\%$ [21];

$T_{\text{ф}}$ – годовая фактическая загрузка трактора на склонах, $T_{\text{ф}}=700$ ч.

Уменьшение затрат на амортизационные отчисления с учетом уменьшения времени работы на склонах ($t_{\text{ф}}^{\text{год}}=210$ часов) составило 616,6 рублей.

Годовой экономический эффект равен $\mathcal{E}_r = 116433,45 + 12600 + 616,6 = 126650,05$ руб (рисунок 5.1).

При использовании способа стабилизации движения трактора на склонах необходимо учесть возможное увеличение интенсивности износа пневматических шин, а также уменьшение износа деталей рулевого механизма трактора.

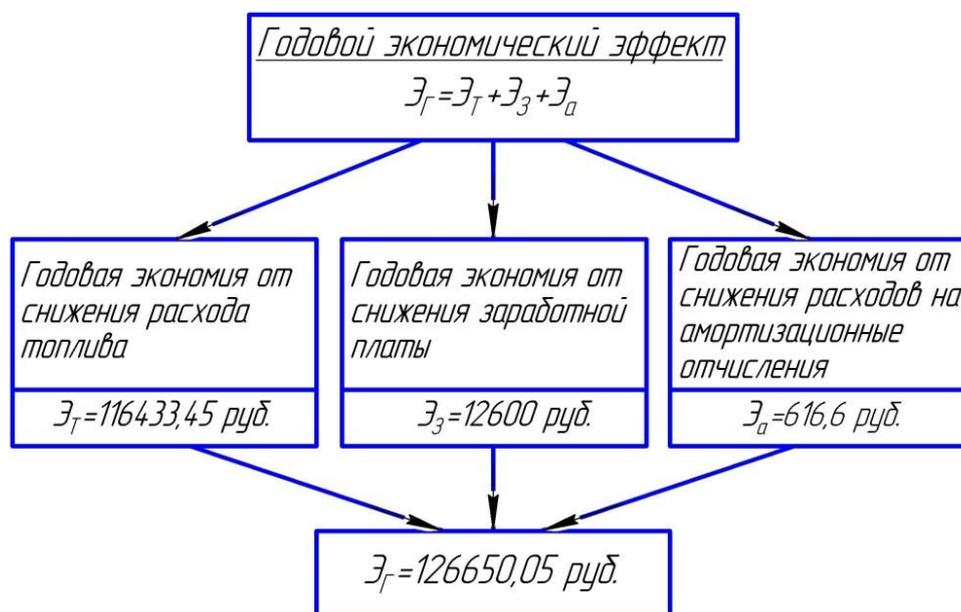


Рисунок 5.1 – Годовой экономический эффект от внедрения способа курсовой стабилизации колесного трактора при движении по наклонной опорной поверхности

Согласно руководству по ремонту и эксплуатации трактора МТЗ-82.1 техническое обслуживание рулевого механизма проводится через 960, часов или через 137 рабочих дней. Действительный годовой фонд времени рулевого механизма Φ_r является функцией, зависящей от числа календарных, выходных, праздничных, предпраздничных и предвыходных дней в году, продолжительности времени смены, коэффициента загрузки рулевого механизма ($\eta_{рул.м.} = 0,96$), который равен $\Phi_r = 1637,5$ ч [21]. В связи с тем, что при использовании технического решения межремонтный срок рулевого механизма увеличивается на 210 часов и составит 1170 часов, период проведения ТО в году увеличится на 18 % (рисунок 5.2).

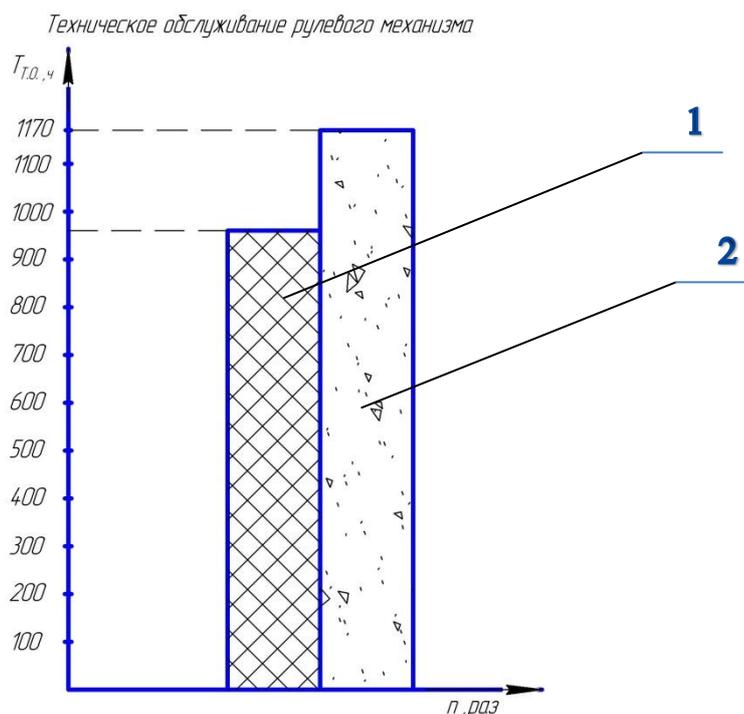


Рисунок 5.2 – Межремонтная наработка рулевого механизма: 1 – серийный образец; 2 – экспериментальный образец

В экономических расчетах целесообразно рассмотреть только максимальный возможный износ шины, который согласно научным исследованиям главы 3 (рисунок 3.3) будет достигаться на шинах передних колёс за счёт варьирования внутришинного давления и в колесах, расположенных ниже по склону. Согласно предыдущим расчётам величина прямолинейного пути в год во время выполнения сельскохозяйственных операций на склонах составит 5040 км, следовательно, износ шины переднего колеса равен:

$$I_{\text{год}} = I \cdot L_{\text{пр}}^{\text{год}} = 5040 \cdot 2 \cdot 10^{-10} = 1 \text{ мм.} \quad (5.4)$$

С учетом того, что высота протектора шины передних колёс 11,2-20 мод. Ф-35-1 равна 34 мм, можно утверждать, что использование метода повышения курсовой устойчивости трактора при движении его на склоне оказывает влияние в пределах допустимых эксплуатационных значений для данной модели шин в установленных экспериментальных условиях (рисунок 5.3).

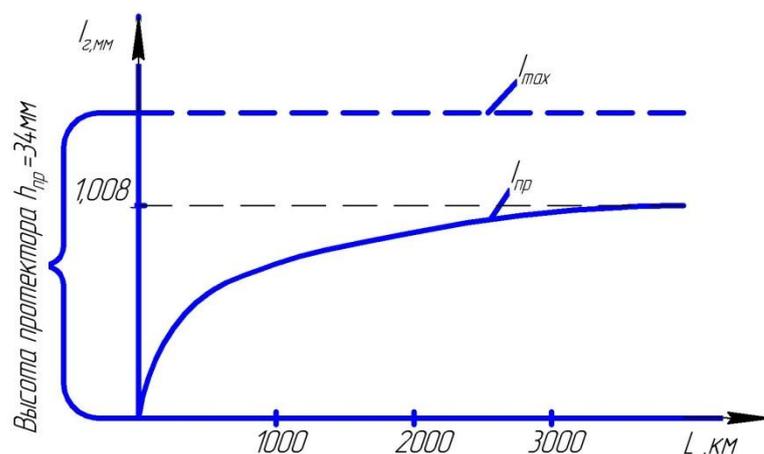


Рисунок 5.3 – Функция износа шины переднего колёса 11,2-20 мод. Ф-35-1

Результаты теоретических и эмпирических исследований свидетельствуют о том, что рациональная установка углов увода колёс в шинах, полученные на основе предложенной математической модели с помощью соответствующих значений внутришинного давления, позволяют улучшить технико-экономические показатели колесной машины при её движении по наклонной опорной поверхности.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ современных тенденции развития технологичности колесных тракторов и специфика их работы в условиях склонного земледелия предполагает исследование функциональных зависимостей между характеристиками опорной поверхности и режимными параметрами колесного трактора.

2. В результате теоретических исследований установлено влияние углов бокового увода пневматических колёс на курсовую стабилизацию колёсного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на склонах при условии, что углы увода передних и задних колёс меньше 15° ($\delta_1, \delta_2 \leq 15^{\circ}$), а углы наклона опорной поверхности лежат в диапазоне от 5 до 20° .

3. Определена закономерность смещения, вызванная углами увода шин при реализации излишней поворачиваемости трактора, обеспечивающая компенсацию величины смещения вниз МТА от скольжения на наклонной опорной поверхности.

4. Для оценки энергетической составляющей процесса стабилизации курсового движения трактора на склоне предложен коэффициент эффективности внедрения способа (K), который составляет для предлагаемого способа $0,65 - 0,7$, что говорит о возможности реализации его во время выполнения технологических операций в реальных производственных условиях для заданных параметров коридора движения.

5. С помощью программно-аналитического обеспечения установлены значения интенсивности изнашивания на единицу длины пути до $2 \cdot 10^{-10}$ для шины модели Ф-35-1 и до $4 \cdot 10^{-11}$ для шины модели Ф-2А при увеличении угла склона от 5 до 20° и внутришинного давления от $0,08$ до $0,2$ МПа, которые показали незначительное влияние на характеристики надежности рабочих элементов протектора во время реализации способа курсовой стабилизации колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на наклонной опорной поверхности.

6. В результате проведения полного факторного эксперимента по схеме 2^5 получено уравнение регрессии, позволяющее определить полное поперечное

смещение колесного трактора с различной эксплуатационной массой и в различных агроландшафтных условиях ($y=l_{\text{полн.}}=f(G;\alpha;\varphi)$) от заданной траектории для создания адекватного компенсирующего смещения вверх посредством способа курсовой стабилизации колесного трактора при выполнении сельскохозяйственных операций на наклонной опорной поверхности.

7. В результате производственных испытаний трактора МТЗ-82.1 на почвах с коэффициентом сцепления $\varphi = [0,5; 0,8]$ установлены углы увода шин передних колес 11,2-20 модели Ф-35-1 и задних колес 15,5R38 модели Ф-2А для склона с $\alpha = 5^\circ$ соответственно равными: $\delta_1 = 2,2^\circ, \delta_2 = 3,8^\circ$; для склона с $\alpha = 10^\circ$ – $\delta_1 = 6,3^\circ, \delta_2 = 7^\circ$; для склона с $\alpha = 15^\circ$ – $\delta_1 = 10,65^\circ, \delta_2 = 11^\circ$ и для склона с $\alpha = 20^\circ$ – $\delta_1 = 14,4^\circ, \delta_2 = 15^\circ$, что дает возможность компенсировать полное поперечное смещение колесного трактора от технологической траектории на различных склонах.

8. Производственные испытания показали, что для удержания трактора МТЗ-82.1, укомплектованного шинами моделей 11,2-20 Ф-35-1 и 15,5R38 Ф-2А на технологической траектории, необходимо устанавливать давления воздуха в шинах передних колес 0,2; 0,17; 0,14; 0,14 МПа соответственно на склонах с углами 5, 10, 15, 20⁰ при постоянных значениях внутришинного давления в задних колесах, равных 0,08 МПа.

9. В результате экономического анализа внедрения инновационного способа получен годовой экономический эффект равный 126650,05 руб. (при расчете использовалась фактическая загрузка трактора МТЗ-82.1 на склонах во время выполнения сельскохозяйственных операций в течение 2014 года, равная 700 часам) от снижения амортизационных отчислений, количества сэкономленного топлива и денежных средств на заработную плату оператора. При использовании данного способа межремонтный срок рулевого механизма увеличивается на 210 часов, в связи с чем период проведения ТО в году увеличится на 18 %. Износ шины переднего колеса в год составил $I_{\text{год.}} = 1,008 \text{ мм} / 1 \text{ мм}$, что не превышает требований, предъявляемых к пневматическим шинам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапьев, Б.Д. Обработка экспериментальных данных: учеб. пособие / Б.Д. Агапьев [и др.]. – Санкт-Петербург : СПбГТУ, 2001.

2. Амельченко, П.Н. Колесные тракторы для работы на склонах / П.Н. Амельченко, И.П. Ксенович, В.В. Гуськов, А.И. Якубович. – Москва : Машиностроение, 1978. – 248 с.

3. Андреев, А.Ф. Влияние кинематической связи ведущих колес на устойчивость прямолинейного движения колесного трактора: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / А.Ф. Андреев. – Минск, 1972. – 185 с.

4. Антонов, Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей. – Москва : Машиностроение, 1978. – 216 с.

5. Асманкин, Е.М. Аспект на проблему устойчивости движения колесных машин / Е.М. Асманкин, С.В. Юмакаева, А.Ж. Нуритдинова, И.В. Яковлев // Материалы всероссийской заочной научно-практической конференции «Инновационные научные решения – основа модернизации аграрной экономики». – Пермь, 2011. – ч. 2. С. 5 – 10.

6. Асманкин, Е.М. К вопросу определения компенсационного радиуса траектории движения тягового средства на наклонной поверхности / Е.М. Асманкин, С.В. Тарасова // Материалы международной научно-практической конференции «Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК». – Оренбург, 2014. – С. 50 – 54.

7. Асманкин, Е.М. К вопросу развития энергосберегающих технологий в АПК / Е.М. Асманкин, С.В. Юмакаева, М.Б. Фомин, А.Ж. Балмугамбетова // Известия ОГАУ. – 2012. – №2. – С. 77 – 79.

8. Асманкин, Е.М. Методика определения моментов увода колесного трактора / Е.М. Асманкин, А.А. Аверкиев, И.А. Рахимжанова, С.В. Юмакаева // Известия ОГАУ. – 2012. – №2. – С. 74 – 77.

9. Асманкин, Е.М. Обоснование способа теоретического исследования тракториальной устойчивости мобильных энергетических средств в условиях склонного земледелия / Е.М. Асманкин, С.В. Тарасова, В.А. Шахов // Известия ОГАУ. – 2013. – №5. – С. 81 – 83.

10. Асманкин, Е.М. Специфика концептуального развития технического обеспечения курсовой устойчивости колёсных машин / Е.М. Асманкин, С.В. Юмакаева, В.В. Реймер, В.С. Стеновский // Известия ОГАУ. – 2010. – №4(28). – С. 73 – 76.

11. Асманкин, Е.М. Теоретическое исследования влияния углов бокового увода колес на поперечное смещение машины при ее движении по наклонной опорной поверхности / Е.М. Асманкин, С.В. Тарасова, В.А. Шахов, В.В. Реймер // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – №5. – С. 50 – 53.

12. А.с. 1792584 СССР, МПК4 А 01 В 69/04, В 60 К 17/354. Способ стабилизации направления движения машинно-тракторного агрегата и устройство для его осуществления [Текст] / Л.Н. Петров. – №4789398/11 ; заявл. 08.02.90; опубл. 07.02.93, Бюл. № 5. – 8с. : ил.

13. А.с. 1360614 СССР, МПК4 А 01 В 69/04. Способ обеспечения прямолинейности движения тракторного агрегата / В.Н. Лаптев, С.Д. Стрекалов. – №4096421/30-15 ; заявл. 16.07.86; опубл. 23.12.87, Бюл. № 47.

14. А.с. 604710 СССР, МПК4 В 60G 19/10, В 62 D 49/08. Колесный трактор для работы на крутых склонах [Текст] / П.А.Амельченко, А.В. Войтиков, А.Г.Мюллер, Б.А. Дикуть, В.Я. Шнейсер. – №2312738/11 ; заявл. 12.01.76; опубл. 30.04.78, Бюл. № 16. – 4с. : ил.

15. А.с. 1391519 СССР, МПК4 А 01В 69/04. Система автоматического вождения тракторного агрегата на склонах / К.Д. Кудзиев, С.С. Калаев, М.С. Льянов. – №3963806/30-15 ; заявл. 11.10.85; опубл. 30.04.88, Бюл. № 16.

16. А.с. 1404005 СССР, МПК4 А 01В 69/04. Устройства для вождения машинно-тракторного агрегата / А.Т. Калюжный, В.В. Лазовский, В.А. Днепровский. – №4102481/30–15 ; заявл. 28.06.86; опубл. 23.06.88, Бюл. № 23.

17. А.с. 1414338 СССР, МПК4 А 01 В 69/04. Устройство для автоматического вождения тракторного агрегата на виноградниках [Текст] / М.Л. Шит. – №4099960/30–15; заявл. 25.07.86; опубл. 07.08.88, Бюл. № 29. – 2с. : ил.

18. А.с. 1605952 СССР, МПК4 А 01В 69/04. Способ защиты тракторного агрегата от потери базовой траектории / Е.В. Саркисян, Г.В. Новиков, К.К. Циханков. – №4453354/30–15; заявл. 01.07.88; опубл. 15.11.90, Бюл. № 42.

19. А.с. 1796086 СССР, МПК4 А 01 В 69/04, 69/00. Устройство для предотвращения сползания транспортного агрегата на склоне / В.И. Курсин, И.И. Гуреев, А.Е. Федорченко. – №641899.кл.01 В 15/20 ; заявл. 09.11.82; опубл. 23.02.93, Бюл. № 7. – 7с. : ил.

20. А.с. 682879 СССР, МПК2 G 01D 1/00. Устройство для регулирования направления движения автоматического транспортного средства / Е.В. Авотин, В.Н. Каширин, А.Л. Кемурджиан, П.С. Сологуб. – №2485284/18–24; заявл. 12.05.77; опубл. 30.08.79, Бюл. № 32.

21. Бабусенко, С.М. Проектирование ремонтно-обслуживающих предприятий / С.М. Бабусенко. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 352 с.

22. Бельков, Г.И. Система устойчивого ведения сельского хозяйства Оренбургской области / Департамент сельского хозяйства администрации Оренбургской области, Оренбургский научно-исследовательский институт сельского хозяйства Россельхозакадемии и др.; редкол.: Г.И. Бельков (отв. ред.), В.К. Еременко, А.Г. Крючков, В.Е. Тихонов, Н.П. Часовских – Оренбург : Кн. изд-во «Южный Урал», 1999. – 336 с.

23. Богданов, А.В. Обоснование рационального давления воздуха в пневматических движителях колесных машин с заблокированным приводом ведущих мостов на транспортных работах в сельском хозяйстве: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01: защищена 18.12.03 / Богданов Андрей Владимирович. – Челябинск, 2003. – 127 с.

24. Бойков, В.П. Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин / В.П. Бойков, В.Н. Белковский. – Москва: Агропромиздат, 1988.

25. Болотов, А.К. Эксплуатация сельскохозяйственных тракторов: справочник / А.К. Болотов, А.М. Гуревич, В.И. Фортуна. – Москва : Колос, 1994. – 495 с.
26. Веденяпин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г.В. Веденяпин. – Москва : Колос, 1967. – 168 с.
27. Войтиков, А.В. Исследование курсовой устойчивости колесного трактора класса 14 кН на склоне: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Войтиков Александр Викторович. – Минск, 1979. – 188 с.
28. Воцкий, З. И. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы оценки энергетических, эксплуатационно-технологических, экономических показателей и безопасности труда: учебное пособие / З. И. Воцкий. – Челябинск : ЧГАУ, 2007.
29. Горшков, Ю. Г. Нормативы потребности в пневматических шинах тракторов, комбайнов, сельскохозяйственных и мелиоративных машин в сельском хозяйстве: научно-технический отчет ЧОМС-УралНИИВХ / Ю.Г. Горшков, А.В.Богданов. – Челябинск, 1986. – 33 с.
30. Горшков, Ю. Г. Повышение эффективности функционирования системы «дифференциал пневматический колесный движитель – несущая поверхность» мобильных машин сельскохозяйственного назначения: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / Горшков Юрий Германович. – Челябинск, 1999. – 340 с.
31. Горшков, Ю.Г. Догружатель ведущих колес трактора / Ю.Г. Горшков, Ю.Б.Четыркин, А.А. Калугин, Е.А. Лещенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – №7.
32. Горшков, Ю.Г. Исследование характера износа пневматических шин в условиях сельского хозяйства / Ю.Г. Горшков // Отчет НИР/ЧИМЭСХ. – №11486. – № ГР 01860022322 [и др.]. – Челябинск, 1987. – 34 с.
33. Горшков, Ю.Г. Определение рационального давления воздуха в шинах колесного трактора / Ю.Г. Горшков, А.В. Богданов, Ю.Б. Четыркин, Е.А. Лещенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – №11. – С. 25–26.
34. Горшков, Ю.Г. Определение рационального давления воздуха в шинах колесных машин (тракторов) при выполнении транспортных работ / Ю.Г. Горш-

ков, А.В. Богданов, Ю.Б. Четыркин, Е.А. Лещенко // Вестник ЧГАА. – 2012. –Т. 61. – С. 26 – 30.

35. Горшков, Ю.Г. Устройство для регулирования давления воздуха в шинах колесных машин / Ю.Г. Горшков, А.В. Богданов, Ю.Б. Четыркин, Е.А. Лещенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 10. – с. 17 – 19.

36. Горшков, Ю.Г. Оптимальное давление воздуха в шинах колесных тракторов / Ю.Г. Горшков, А.В. Богданов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – №9. – С. 15 – 18.

37. ГОСТ Р 7057-1991. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. – Москва: Государственный комитет по стандартам, 1973. – 61 с.

38. ГОСТ 20915-2011. Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний.

39. Гуревич, А.М. Результаты полевых опытов по влиянию тракторов на уплотнение почвы / А.М. Гуревич, В.П. Ашихмин, А.А. Лопарев // Совершенствование конструкции и повышение эффективности тракторов и автомобилей: сб. ст. – Пермь, 1981.

40. Гуськов, В.В. Взаимодействие стабилизируемого колеса с наклонной поверхностью / В.В. Гуськов, И.П. Ксенович, А.И. Якубович, П.А. Амельченко // Тракторы и сельхозмашины. – 1974. – №5.

41. Гуськов, В.В. Качение колеса поперек склона / В.В. Гуськов, И.П. Ксенович // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1976. – №10.

42. Гуськов, В.В. О влиянии ряда факторов на курсовую устойчивость колесного трактора, работающего на склоне / В.В. Гуськов, А.В. Войтиков // Тракторы и сельхозмашины. – 1981. – №2.

43. Гуськов, В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В.В. Гуськов. – Москва: Машиностроение, 1966.

44. Гуськов, В.В. Технические концепции создания горно-равнинных мобильных средств механизации сельскохозяйственного производства / В.В. Гусь-

ков, П.А. Амельченко, П.В. Зеленый, В.П. Зарецкий // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. – №3.

45. Гячев, Л.В. Динамика машинно-тракторных и автомобильных агрегатов / Л.В. Гячев. – Ростов-на-Дону: РГУ, 1976. – 192 с.

46. Двали, Р.Р. Механическая тяга в горной местности / Р.Р. Двали, В.В. Махатдиани. – Москва: Наука, 1970. – 235 с.

47. Двали, Р.Р. К вопросу механизации горного земледелия / Р.Р. Двали. – Тбилиси: АН ГрузССР, 1964. – С.7 – 34.

48. Евграфов, А.И. Расчет нормальной жесткости шин для определения их эксплуатационных показателей / А.И. Евграфов, В.А. Петрушов // Автомобильная промышленность. – 1977. – №3. – С. 20 – 22.

49. Жариков, Н.А. Исследование оптимальных эксплуатационных параметров машинно-тракторных агрегатов (на примере пахотных и посевных агрегатов с тракторами Т-4 и ДТ-75 в условиях Оренбургской области): дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Жариков Николай Александрович – Оренбург, 1970. – 218 с.

50. Житенко, И.С. Повышение эффективности мобильных машин согласованием основных параметров функционирования с условиями внешней среды в сельскохозяйственном производстве: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 : защищена 16.06.11 / Житенко Иван Сергеевич. – Челябинск, 2011. – 131 с.

51. Загородний, Н.А. Повышение эффективности эксплуатации автомобилей обеспечением рациональных значений эксплуатационных параметров их шин: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 : защищена 21.05.10 / Загородний Николай Александрович. – Белгород, 2010.

52. Зангиев, А.А. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка / А.А. Зангиев, Г.П. Лышко, А.Н. Скороходов. – Москва : Колос, 1996. – 320 с.

53. Зарук, А.В. Стратегия инвестиционно-инновационного развития с.-х. организаций Российской федерации: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05: защищена 06.04.11 / Зарук Артем Владимирович. – Москва, 2011. – 180 с.

54. Зеленый, П.В. Трактор «Беларусь» горно-равнинный / П.В. Зеленый, В.П. Зарецкий // Сельский механизатор. – 1988. – №1.
55. Каптюшин, Г.К. Конструкция, основы теории, расчет и испытание тракторов / Г.К.Каптюшин, С.П.Баженов. –Москва: Агропромиздат, 1990. – 511 с.
56. Кассандрова, А.Н. Обработка результатов наблюдений / А.Н. Кассандрова [и др.]. – Москва : Наука, 1970. – 104 с.
57. Ким, В.А. Исследование курсового движения тракторного поезда в составе колесного трактора класса 14 кН, одноосного и двухосного прицепов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Ким В.А. – Минск, 1977. – 21 с.
58. Кнороз, В.И. Экспериментальные данные о боковой эластичности шин легковых автомобилей / В.И. Кнороз, В.М. Кленников // Конструирование и исследование автомобилей: сб. – Москва : Машгиз. – 1955. – С. 15 – 21.
59. Коцарь, Ю.А. Повышение эффективности использования трактора с заблокированным приводом / Ю.А. Коцарь, Г.А. Головащенко. – Самара : Самар. гос. с.-х. академия, 2000.
60. Красильников, В.Е. Качения колеса по деформируемой поверхности с боковым уводом / В.Е. Красильников // Тракторы и сельхозмашины. – 1966.–№ 6. – С. 21 – 23.
61. Кудинов, П.А. Исследование влияния отклоняющего момента на тяговые свойства колесного трактора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Кудинов П.А. – Киев. – 1965. – 17 с.
62. Кутьков, Г.М. Теория трактора и автомобиля / Г.М. Кутьков. – Москва: Колос, 1996. – 287 с.
63. Лаптаев, В.Н. Определение оптимальной высоты грунтозацепов шин ведущих колес сельскохозяйственных тракторов / В.Н. Лаптаев, В.Н. Антонов // Производство шин, резинотехнических и асбестотехнических изделий.– 1983. – №12.
64. Лебедев, В.В. Экономическая оценка эффективности мероприятий по совершенствованию ремонтно-обслуживающего производства в аг-

ропромышленном комплексе / В.В. Лебединцев. – Оренбург : Издательский центр ОГАУ, 2002. – 34 с.

65. Лещенко, Е.А. Обоснование устройства для регулирования и автоматического поддержания рационального давления воздуха в шинах колесных тракторов на транспортных работах // Сборник матер. ЛП междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2012

66. Лещенко, Е.А. Снижение расхода топлива на транспортных работах установкой рациональных давлений воздуха в шинах колесных тракторов (на примере трактора МТЗ-82): дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01: защищена 02.07.14 / Лещенко Евгения Анатольевна. – Челябинск, 2014.

67. Лещенко, Е.А. Повышение экономичности и устойчивости движения колесных тракторов с заблокированным приводом ведущих мостов // Сборник матер. ЛП междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2012.

68. Лихачев, В.С. Испытание тракторов / В.С. Лихачев. – Москва : Машиностроение, 1974. – 268 с.

69. Лутаев, И.М. Исследование тяговых свойств колесного трактора с навесными машинами на склоне: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Лутаев И.М. – Киев, 1960. – 19 с.

70. Любимов, Б.А. Проблема автоматизации вождения сельскохозяйственных тракторных агрегатов / Б.А. Любимов, В.М. Шабанов, А.И. Драновский // В сб. Автоматическое вождение сельскохозяйственных тракторов. – Москва : ОНТИ-НАТИ Вып. 219. – 1972.

71. Ляско, М.И. Влияние ходовых систем сельскохозяйственных тракторов на уплотнение почвы и урожайность ячменя / М.И. Ляско [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1979. – №12.

72. Макаров, В.Р. Исследование взаимодействия колесного трактора с почвой на склонах в условиях Ставропольского края с помощью изотопов: дис. ... канд. техн. наук / Макаров В.Р. – Ленинград, 1961.

73. Малиновский, Е.Ю. Динамика самоходных машин с шарнирной рамой / Е.Ю.Малиновский, М.М. Гайцгори. – Москва : Машиностроение, 1974. – 175 с.
74. Малкин, И. Г. Теория устойчивости движения / И. Г. Малкин. – Москва : Наука, 1966.
75. Мамити, Г.И. Формирование оптимальной устойчивости колесной машины на стадии проектирования / Г.И. Мамити, С.Х. Плиев // Вестник машиностроения. – 2009. – №2.
76. Маргвелашвили, О.В. Исследование явления бокового увода эластичных тракторных колес: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.В. Маргвелашвили – Тбилиси, 1959. – 15 с.
77. Мельников, Д.И. К определению устойчивости направления движения трактора [Текст] // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1964. – № 2. – С. 49 – 50.
78. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников [и др.] – Ленинград : Колос, 1981. – 150 с.
79. Мещеряков, В.А. Исследование некоторых факторов, определяющих устойчивость движения и управляемость широкозахватных жатвенных агрегатов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Мещеряков В.А. – зерноград, 1964. – 21 с.
80. Михайлов, А.В. Обоснование методики повышения эффективности эксплуатации колесных тракторов класса 1,4: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01, 05.20.03: защищена 24.09.04 / Михайлов Александр Васильевич. – Оренбург, 2004. – 233 с.
81. Министерство сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности Оренбургской области [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mcx.orb.ru> (дата обращения: 05.08.2014).
82. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mcx.ru> (дата обращения: 05.08.2014).
83. Неймарк, Ю.И. Динамика неголономных систем / Ю.И. Неймарк, Н.А.Фуфаев. – Москва : Наука, 1967. – 519 с.

84. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В.Новицкий, И.А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
85. Новоженин, И.А. Земельные отношения в Российской Федерации на рубеже XX и XXI веков / Н.И. Прихожай, Е.Г. Вербова. – Москва : кн. изд-во «Агентство «Пресса», 2004. – 259 с.
86. Певзнер, Я.М. Терминология по вопросам управляемости устойчивости движения автомобиля / Я.М. Певзнер, Л.Л. Гинцбург // Труды семинара по управляемости и устойчивости автомобиля – Москва : Труды НИМИ, 1966.
87. Петрушов, В.А. Зависимость нормального прогиба пневматической шины от нормальной нагрузки и внутреннего давления воздуха / В.А. Петрушов. – Москва: Труды НАМИ. – Вып. 158, 1976. – С. 3 – 11.
88. Погорелов, С.В. Повышение устойчивости прямолинейного движения тракторных поездов посредством использования тягово-сцепного устройства с регулятором курсового угла: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: защищена 27.01.06 / Погорелов Сергей Владимирович. – Саратов, 2006. – 192 с.
89. Поддубный, В.И. Повышение эффективности использования колесных мобильных машин в АПК на основе улучшения их устойчивости и управляемости: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01: защищена 23.06.11 / Поддубный Владимир Иванович. – Барнаул, 2011. – 34 с.
90. Путин, В.А. Автомобильные колеса с регулируемым давлением воздуха в шинах / В.А. Путин. – Челябинск, 1974. – 98 с.
91. Пчелинин, И.К. Применение уравнений кинематических связей для исследования устойчивости движения и управляемости автомобиля с помощью аналоговых математических машин / И.К. Пчелинин, А.А. Хачатуров // Автомобильная промышленность. –1966. – №5. – С.19 – 25.
92. Пчелинин, И.К. Уравнение кинематических связей колеса с эластичной шиной и исследование его качения при переменном угле увода / И.К. Пчелинин, А.А. Хачатуров // Автомобильная промышленность. – 1964. –№12. – С.12 – 15.

93. Реймер, В.В. Обоснование методики повышения эффективности эксплуатации колёсных тракторов класса 1,4 при работе на наклонной опорной поверхности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Реймер Вадим Валерьевич – Оренбург, 2011. – 21 с.

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

95. Способ курсового управления машиной при движении по траектории произвольной формы и устройство для его осуществления : пат. 2298216 Российская Федерация : МПК7 G 60B D1/02 / А.С. Павлюк, С.А. Павлюк, Д.В. Ашихмин. – №2005121827/28 ; заявл. 11.07.05; опубл. 27.04.07, Бюл. № 22.

96. Способ стабилизации положения колёсного транспортного средства: пат. 2399538 Российская Федерация : МПК4 В 62 D37/04 / В.В. Реймер, Е.М. Асманкин, В.С. Стеновский, А.А. Сорокин. – №2008146172/11 ; заявл. 21.11.08; опубл. 27.05.10, Бюл. № 15.

97. Сорокин, А.А. Повышение эффективности работы универсально-пропашных тракторов в растениеводстве: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 : защищена 28.12.09 / Сорокин Александр Алексеевич – Оренбург, 2009. – 221 с.

98. Стеновский, В.С. Стабилизация транспортного средства на наклонной поверхности / В.С. Стеновский, В.В. Реймер, С.В. Юмакаева // Сельский механизатор. – 2011. – №5. – С. 12.

99. Стеновский В.С. Обоснование параметров движителя колесного трактора для эксплуатации на негоризонтальной опорной поверхности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01, 05.20.03 / Стеновский Вячеслав Сергеевич. – Оренбург, 2014. – 20 с.

100. Стеновский, В.С. Методика формализации дестабилизирующего момента колесного движителя / С.В. Юмакаева, И.А. Рахимжанова, В.В. Реймер // материалы международного научно-технического семинара В.В. Михайлова «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники». – Саратов, 2012. – С.297 – 302.

101. Стеновский, В.С. Методы повышения тягово-сцепных и динамических свойств колесных тракторов / В.С. Стеновский, Н.В. Маловская, А.А. Сорокин // Материалы региональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Оренбургской области. Часть 1. – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2005. – С. 129 – 131.

102. Стеновский, В.С. Проблемы технического инновационирования при разработке современных технологий и средств механизации сельского хозяйства / В.С. Стеновский, С.В. Юмакаева, И.В. Яковлев // Материалы международной конференции «Аграрная наука и образование в условиях становления инновационной экономики». – Оренбург, 2011. – С. 123 – 125.

103. Тарасова, С.В. Интерпретация результатов теоретических и экспериментальных исследований курсовой стабилизации колёсного трактора при работе на склоне / С.В. Тарасова, Ю.А. Ушаков // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке и образовании». – Москва, 2015. – С.77 – 85.

104. Тарасова, С.В. К вопросу повышения технологичности мобильных энергетических средств в условиях склонного земледелия / С.В. Тарасова, Н.Г. Егорова, Ю.С. Рябова // Сборник научных трудов научно-практического форума «Актуальные проблемы аграрной науки и пути их решений». – Кинель, 2015. – С. 99 – 102.

105. Тарасова, С.В. Методика и исследование результатов взаимодействия протектора с наклонной опорной поверхностью в режиме варьирования углами увода пневматических шин / С.В. Тарасова // Известия ОГАУ. – 2015. – №2. – С.84 – 87.

106. Тарасова, С.В. Современные тенденции развития технологичности мобильных энергетических средств в АПК / С.В. Тарасова, А.Ж. Балмугамбетова, Ю.С. Рябова // Материалы IV международной научно-практической конференции «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса». – Новокузнецк, 2014. – С.95 – 102.

107. Тарасова, С.В. Экспериментальная модель определения величины полного поперечного смещения колёсного трактора от технологической траектории на склоне / С.В. Тарасова, Ю.А. Ушаков // Материалы IV международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития сельского хозяйства и сельских территорий». – Саратов, 2015. – С.136 – 141.

108. Трепененков, И.И. Эксплуатационные показатели сельскохозяйственных тракторов / И.И. Трепененков. – Москва: Машгиз, 1963. – 271 с.

109. Устройство для управления колёсным транспортным средством: пат. 2192033 Российская Федерация : МПК7 G 05 D1/02 / А.С. Павлюк, С.А. Павлюк. – № 2001110385/28 ; заявл. 16.04.01; опубл. 27.10.02, Бюл. № 21.

110. Фортуна, В.И. Исследование устойчивости движения и некоторые вопросы динамики трактора МТЗ-52 / В.И. Фортуна, Т. Отаев // Труды Волгоградского СХИ. XXXIX: сб. тр. – Волгоград, 1971. – С. 208 – 217.

111. ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vniiesh.ru> (дата обращения: 05.08.2014).

112. Фролова, Г.Н. Исследование тягово-сцепных свойств трактора МТЗ-82 со сдвоенными колесами при криволинейном движении в условиях Дальнего Востока: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01: защищена 22.12.04 / Фролова Галина Николаевна. – Благовещенск, 2004.

113. Хижняк, А.А. Экономическая эффективность новой сельскохозяйственной техники / А.А. Хижняк, А.С. Зинякин, Е.В. Шеврина. – Оренбург : Издательских центр ОГАУ, 1997. – 38 с.

114. Хухуни, Т.В. Влияние бокового крена на устойчивость движения колесного трактора, // Чай. Культура и производство А I. – Тбилиси, 1963. С. 148 – 162.

115. Чудаков, Д.А. Основы теории и расчета тракторов и автомобилей / Д.А. Чудаков. – Москва: Колос, 1972. – 364 с.

116. Шарара, А.С. Исследование бокового увода и влияние его на кинематические и силовые параметры качения тракторных колес: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Шарара А.С. – Киев, 1971. – 20 с.

117. Шипилевский, Г.Б. Состояние и перспективы автоматизации тракторов / Г.Б. Шипилевский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – №5.

118. Щитов, С.В. Пути повышения агротехнической проходимости колесных тракторов в технологии возделывания сельскохозяйственных культур Дальнего Востока: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01: 20.05.09 / Щитов Сергей Васильевич. – Благовещенск, 2009.

119. Эффективность капитальных вложений: сб. метод. рекомендаций. – Москва : Экономика, 1999. – 128 с.

120. Яковенко, В.И. Метод повышения износостойкости пневматических шин: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03: защищена 28.10.04 / Яковенко Владимир Иванович. – Москва, 2004.

121. Яровой, В.Г. Исследование бокового увода тракторных шин и его влияния на некоторые показатели криволинейного движения агрегата: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Яровой. – Харьков, 1970. – 21 с.

122. Blumenthal R. Traktoren: Technisches Handbuch. / R. Blumenthal – Berlin: VEB Verlag Technik, 1981. – 376 s.

123. Krombholz K. Fahrmechanische Betrachtungen zum Feldhacksl ereinsatz am Hang. / K. Krombholz – Dtsch, Agrartechn, M Bd 14, 1964. – №7, – s.310–314.

124. Macmillan R.H. The Mechanics of Tractor. / R.H. Macmillan – University of Melboure: Implement Performance, 2002.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ВЫДЕРЖКА ИЗ ЗАЯВКИ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

«Способ стабилизации положения движущегося колёсного транспортного средства на наклонной опорной поверхности»

Формула изобретения

Способ стабилизации положения движущегося колёсного транспортного средства на наклонной опорной поверхности, при котором осуществляют поворот транспортного средства вверх по склону пропорционально углу наклона, отличающийся тем что, с целью компенсации отклонения от траектории движения вниз по склону, реализуют излишнюю поворачиваемость за счёт изменения величины углов увода пневматических колёс посредством автоматического регулирования внутришинного давления адекватно величине отклонения от траектории движения.

Реферат

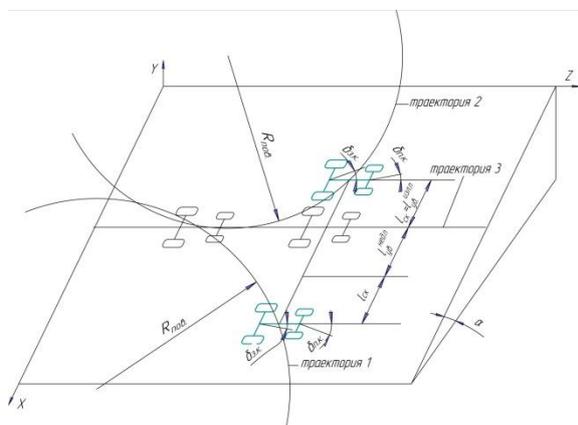
Способ стабилизации положения движущегося колёсного транспортного средства на наклонной опорной поверхности

Изобретение относится к транспортному машиностроению, в частности к способу стабилизации положения движущегося колёсного транспортного средства на наклонной опорной поверхности.

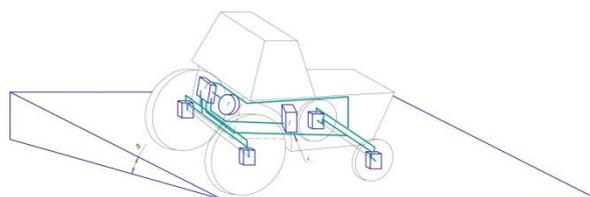
Задачей предложенного способа является повышение эксплуатационной технологичности колёсного транспортного средства.

Способ стабилизации положения движущегося колёсного транспортного средства на наклонной опорной поверхности, при котором осуществляют поворот транспортного средства вверх по склону пропорционально углу наклона, отличающийся тем что, с целью компенсации отклонения от траектории движения вниз по склону, реализуют излишнюю поворачиваемость за счёт изменения величины углов увода пневматических колёс посредством автоматического регулирования внутришинного давления адекватно величине отклонения от траектории движения.

Достигают повышения эксплуатационной технологичности транспортного средства вследствие компенсации отклонения от технологической траектории вниз по склону, при этом улучшается его курсовая устойчивость. Заявляемый способ позволяет работать на склонах с различной крутизной опорной поверхности, обеспечивая удовлетворительную курсовую устойчивость, при этом снижается утомляемость оператора, что позволяет в свою очередь, не только повысить производительность, но и значительно снизить количество несчастных случаев на производстве, связанных с опрокидыванием машин.



Фиг. 1



Фиг.2



ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА ШИНЫ.

Переднее левое колесо.

Константы.

$$B_1 := 0.28$$

$$C_1 := 24.8$$

$$C_2 := 10.3$$

$$h := 0.65$$

$$G := 3150$$

$$l_1 := 1.55$$

$$K_1 := 0.001$$

$$r_1 := 0.46$$

$$\mu := 0.07$$

$$\alpha_1 := \frac{3.14}{9} \quad \alpha_0 := \frac{3.14}{180} \quad \alpha_2 := \frac{3.14}{180}$$

$$P_0 := 80000 \quad P_1 := 20000 \quad P_2 := 20000$$

$$i := \frac{P_1 - P_0}{P_2} \quad k := \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha_2} \quad i := 0..k \quad j := 0..1$$

$$P_j := P_0 + j \cdot P_2 \quad \alpha_i := \alpha_0 + i \cdot \alpha_2 \quad M_{i,j} := f(\alpha_i, P_j)$$

Составляющая нормальной силы на ось переднего левого колеса.

$$N := 0.4G \left(0.5 \cos(\alpha) - \frac{h \cdot \sin(\alpha)}{l_1} \right)$$

Интенсивность износа переднего левого колеса

$$f(\alpha, P) := \frac{K_1 \cdot N \cdot \mu \cdot G \cdot 2 \cdot \sin(\alpha)}{(3.14^2) \cdot r_1 \cdot B_1 \cdot (C_1 + C_2 \cdot P \cdot G \cdot \cos(\alpha))}$$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА ШИНЫ.

Заднее левое колесо.

Константы.

$$B_2 := 0.39$$

$$C_1 := 25.4$$

$$C_2 := 17.4$$

$$h := 0.65$$

$$G := 3150$$

$$l_2 := 1.67$$

$$K_2 := 0.00$$

$$r_2 := 0.73$$

$$\mu := 0.07$$

$$D_2 := 1.55$$

$$\alpha_0 := \frac{3.14}{180} \quad \alpha_1 := \frac{3.14}{9} \quad \alpha_2 := \frac{3.14}{180}$$

$$P_0 := 8000 \quad P_1 := 18000 \quad P_2 := 2000$$

$$i := \frac{P_1 - P_0}{P_2} \quad k := \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha_2} \quad i := 0..k \quad j := 0..l$$

$$P_j := P_0 + j \cdot P_2 \quad \alpha_i := \alpha_0 + i \cdot \alpha_2 \quad M_{i,j} := f(\alpha_i, P_j)$$

Составляющая нормальной силы на ось заднего левого колеса.

$$N := 0.6G \left(0.5 \cos(\alpha) - \frac{h \cdot \sin(\alpha)}{l_2} \right)$$

Интенсивность износа заднего левого колеса

$$f(\alpha, P) := \frac{K_2 \cdot N \cdot \mu \cdot G \cdot 2 \cdot \sin(\alpha)}{(3.14^2) \cdot r_2 \cdot B_2 \cdot (C_1 + C_2 \cdot P \cdot G \cdot \cos(\alpha))}$$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА ШИН.

Переднее правое колесо.

Константы.

$$B_1 := 0.28$$

$$C_1 := 24.8$$

$$C_2 := 10.5$$

$$h := 0.65$$

$$G := 3150$$

$$l_1 := 1.55$$

$$K_1 := 0.001$$

$$r_1 := 0.46$$

$$\mu := 0.07$$

$$\alpha_0 := \frac{3.14}{180} \quad \alpha_1 := \frac{3.14}{9} \quad \alpha_2 := \frac{3.14}{180}$$

$$P_0 := 8000$$

$$P_1 := 20000 \quad P_2 := 20000$$

$$l := \frac{P_1 - P_0}{P_2} \quad k := \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha_2} \quad i := 0..k \quad j := 0..l$$

$$P_j := P_0 + j \cdot P_2 \quad \alpha_i := \alpha_0 + i \cdot \alpha_2 \quad M_{i,j} := f(\alpha_i, P_j)$$

Составляющая нормальной силы на ось
переднего правого колеса.

$$N := 0.4G \left(0.5 \cos(\alpha) + \frac{h \cdot \sin(\alpha)}{l_1} \right)$$

Интенсивность износа переднего правого колеса.

$$f(\alpha, P) := \frac{K_1 \cdot N \cdot \mu \cdot G \cdot 2 \cdot \sin(\alpha)}{(3.14^2) \cdot r_1 \cdot B_1 \cdot (C_1 + C_2 \cdot P \cdot G \cdot \cos(\alpha))}$$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНОСА ШИНЫ.

Заднее правое колесо.

Константы.

$$B_2 := 0.39$$

$$C_1 := 25$$

$$C_2 := 17$$

$$h := 0.65$$

$$G := 3150$$

$$l_2 := 1.67$$

$$K_2 := 0.00$$

$$r_2 := 0.73$$

$$\mu := 0.07$$

$$\alpha_0 := \frac{3.14}{180} \quad \alpha_1 := \frac{3.14}{9} \quad \alpha_2 := \frac{3.14}{180}$$

$$P_0 := 8000 \quad P_1 := 18000 \quad P_2 := 20000$$

$$l := \frac{P_1 - P_0}{P_2} \quad k := \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha_2} \quad j := 0..l \quad i := 0..k$$

$$P_j := P_0 + j \cdot P_2 \quad \alpha_i := \alpha_0 + i \cdot \alpha_2 \quad M_{i,j} := f(\alpha_i, P_j)$$

Составляющая нормальной силы на ось заднего правого колеса.

$$N := 0.6G \left(0.5 \cos(\alpha) + \frac{h \cdot \sin(\alpha)}{l_2} \right)$$

Интенсивность износа заднего правого колеса.

$$f(\alpha, P) := \frac{K_2 \cdot N \cdot \mu \cdot G \cdot 2 \cdot \sin(\alpha)}{(3.14^2) \cdot r_2 \cdot B_2 \cdot (C_1 + C_2 \cdot P \cdot G \cdot \cos(\alpha))}$$

Программа определения интенсивности изнашивания протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия (№2015614951)

Файл CalculIntensity.pas

```
unit CalculIntensity;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Math;
type
  TForm1 = class(TForm)
    lb_Ki: TLabel;
    lb_Ntr: TLabel;
    lb_G: TLabel;
    lb_A: TLabel;
    lb_h: TLabel;
    Button1: TButton;
    cb_Ki: TComboBox;
    cb_Ntr: TComboBox;
    cb_G: TComboBox;
    cb_A: TComboBox;
    cb_h: TComboBox;
    Memo1: TMemo;
    GroupBox1: TGroupBox;
    lb_Rk0: TLabel;
    cb_Rk0: TComboBox;
    lb_Bk0: TLabel;
    cb_Bk0: TComboBox;
    lb_C2_0: TLabel;
    cb_C1_0: TComboBox;
    cb_C2_0: TComboBox;
    lb_C1_0: TLabel;
    lb_Pw0: TLabel;
    cb_Pw0: TComboBox;
    lb_B0: TLabel;
    cb_B0: TComboBox;
    GroupBox2: TGroupBox;
```

```

lb_Rk1: TLabel;
  cb_Rk1: TComboBox;
  cb_Bk1: TComboBox;
  lb_Bk1: TLabel;
lb_Pw1: TLabel;
  cb_Pw1: TComboBox;
  cb_B1: TComboBox;
  lb_B1: TLabel;
  lb_C1_1: TLabel;
  cb_C1_1: TComboBox;
  cb_C2_1: TComboBox;
  lb_C2_1: TLabel;
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
  procedure FormCreate(Sender: TObject);
private
  procedure AddComboBox(f, n, p: Extended; r:integer; Combo: TComboBox);
  function GetN(k: single; j: integer; B: Extended): Extended;
  function GetI(k: single; j, i: integer): Extended;
  var Ki, Ntr, h, Rk0, Rk1, Bk0, Bk1: Extended;
      B0, B1, C1_0, C1_1, C2_0, C2_1: Extended;
      A, G, Pw0, Pw1: Extended;
public
  { Public declarations }
end;
var
  Form1: TForm1;
implementation
{$R *.dfm}
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var i: integer;
begin
  //Задание исходных интервалов значений параметров
  AddComboBox(0.0001, 10, 0.0001, -4, cb_Ki);
  AddComboBox(0.001, 0.1, 0.0001, -4, cb_Ntr);
  AddComboBox(1500, 12000, 5, 0, cb_G);
  AddComboBox(1, 45, 1, 0, cb_A);
  AddComboBox(0.2, 5, 0.0001, -4, cb_Rk0);
  AddComboBox(0.1, 1, 0.0001, -4, cb_Bk0);

```

```

AddComboBox(0.2, 5, 0.0001, -4, cb_Rk1);
AddComboBox(0.1, 1, 0.0001, -4, cb_Bk1);
AddComboBox(5, 50, 0.01, -2, cb_C1_0);
AddComboBox(5, 50, 0.01, -2, cb_C2_0);
AddComboBox(5, 50, 0.01, -2, cb_C1_1);
AddComboBox(5, 50, 0.01, -2, cb_C2_1);
AddComboBox(50000, 300000, 1000, 0, cb_Pw0);
AddComboBox(50000, 300000, 1000, 0, cb_Pw1);
AddComboBox(0.2, 2, 0.0001, -4, cb_h);
AddComboBox(1, 3, 0.0001, -4, cb_B0);
AddComboBox(1, 3, 0.0001, -4, cb_B1);
for i :=0 to Form1.ComponentCount -1 do
  if (Form1.Components[i] is TComboBox) then
    TComboBox(Form1.Components[i]).ItemIndex := 0;
end;
//Функция задания значений параметра:
procedure TForm1.AddComboBox(f, n, p: Extended; r:integer; Combo: TComboBox);
var i : Extended;
begin
  i := f;
  while (i >= f) and (i <= n) do
  begin
    Combo.Items.Add(FloatToStr(RoundTo(i, r)));
    i := i + p;
  end;
end;
//Определение интенсивности износа протектора шины:
function TForm1.GetI(k: single; j, i: integer): Extended;
var Rk, Bk, Pw, B, C1, C2: Extended;
begin
  //i=1 задние колеса, i=0 передние колеса
  if i = 1 then
  begin
    Rk := Rk1;
    Bk := Bk1;
    Pw := Pw1;

```

```

B := B1;
C1 := C1_1;
C2 := C2_1;
end
else
begin
Rk := Rk0;
Bk := Bk0;
Pw := Pw0;
B := B0;
C1 := C1_0;
C2 := C2_0;
end;
Result:=RoundTo(((2*Ki*GetN(k,j,
B)*Ntr*G*sin((PI*A)/180))/(Rk*Bk*(C1+C2*Pw*G*cos((PI*A)/180))*Sqr(Pi))), -10);
end;
//Определение составляющих нормальной силы на колёса:
function TForm1.GetN(k: single; j: integer; B: Extended): Extended;
begin
Result := k*G*((cos((PI*A)/180)/2) + (j*(h/B)*sin((PI*A)/180)));
end;
//Расчет интенсивности износа протектора шин:
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var I1, I2, I3, I4: Extended;
begin
//Сбор параметров
Ki := StrToFloat(cb_Ki.Items.Strings[cb_Ki.ItemIndex]);
Ntr := StrToFloat(cb_Ntr.Items.Strings[cb_Ntr.ItemIndex]);
A := StrToFloat(cb_A.Items.Strings[cb_A.ItemIndex]);
G := StrToFloat(cb_G.Items.Strings[cb_G.ItemIndex]);
Rk0 := StrToFloat(cb_Rk0.Items.Strings[cb_Rk0.ItemIndex]);
Bk0 := StrToFloat(cb_Bk0.Items.Strings[cb_Bk0.ItemIndex]);
Rk1 := StrToFloat(cb_Rk1.Items.Strings[cb_Rk1.ItemIndex]);
Bk1 := StrToFloat(cb_Bk1.Items.Strings[cb_Bk1.ItemIndex]);
C1_0 := StrToFloat(cb_C1_0.Items.Strings[cb_C1_0.ItemIndex]);
C2_0 := StrToFloat(cb_C2_0.Items.Strings[cb_C2_0.ItemIndex]);

```

```
C1_1 := StrToFloat(cb_C1_1.Items.Strings[cb_C1_1.ItemIndex]);
C2_1 := StrToFloat(cb_C2_1.Items.Strings[cb_C2_1.ItemIndex]);
Pw0 := StrToFloat(cb_Pw0.Items.Strings[cb_Pw0.ItemIndex]);
B0 := StrToFloat(cb_B0.Items.Strings[cb_B0.ItemIndex]);
Pw1 := StrToFloat(cb_Pw1.Items.Strings[cb_Pw1.ItemIndex]);
B1 := StrToFloat(cb_B1.Items.Strings[cb_B1.ItemIndex]);
h := StrToFloat(cb_h.Items.Strings[cb_h.ItemIndex]);
//Результат расчета
I1 := GetI(0.4, 1, 0);
I2 := GetI(0.6, 1, 1);
I3 := GetI(0.4, -1, 0);
I4 := GetI(0.6, -1, 1);
//Вывод результата на экран
Memo1.Text := 'Интенсивность износа шин:';
Memo1.Lines.Add('нижнего переднего колеса = ' + FormatFloat('0.0000000000',
I1));
Memo1.Lines.Add('нижнего заднего колеса = ' + FormatFloat('0.0000000000',
I2));
Memo1.Lines.Add('верхнего переднего колеса = ' + FormatFloat('0.0000000000',
I3));
Memo1.Lines.Add('верхнего заднего колеса = ' + FormatFloat('0.0000000000', I4));
end;
end.
```

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ,
ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Настоящим актом подтверждается, что: в период с 5.05.14 г. по 07.06.2014 г. в ОАО «Дружба» Кувандыкского района, Оренбургской области в рамках программы научных исследований «Разработка высокоэффективных зональных машинных технологий и оборудования нового поколения для производства конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции растениеводства» проводились исследования курсовой стабилизации колёсного трактора МТЗ-82.1 с культиватором КРН 5,6В при движении по наклонной опорной поверхности

Вид внедренных результатов: технология

Форма внедрения: методика сравнительных испытаний

Характеристика масштаба внедрения: единичное

Объем внедрения: 18 % от объема внедрения, положенного в основу расчета гарантированного экономического эффекта

Социальный и научно-технический эффект: повышение уровня эксплуатационной технологичности колесных тракторов сельскохозяйственного назначения

Состав комиссии:

Генеральный директор ОАО «Дружба»

Главный бухгалтер ОАО «Дружба»

Главный инженер ОАО «Дружба»



Клютов С.З.

Бикбаев Р.Р.

Казиев А.Б.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ,
ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Настоящим актом подтверждается, что: в период с 12.09.14 г. по 19.09.2014 г. в ОАО «Дружба» Кувандыкского района, Оренбургской области в рамках программы научных исследований «Разработка высокоэффективных зональных машинных технологий и оборудования нового поколения для производства конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции растениеводства» проводились исследования динамики отклонения трактора колёсного трактора МТЗ-82.1 с культиватором КРН-5,6В от технологической траектории в условиях ландшафтной нестабильности

Вид внедренных результатов: технология

Форма внедрения: методика сравнительных испытаний

Характеристика масштаба внедрения: единичное

Объем внедрения: 12 % от объема внедрения, положенного в основу расчета гарантированного экономического эффекта

Социальный и научно-технический эффект: повышение уровня эксплуатационной технологичности колесных тракторов сельскохозяйственного назначения

Состав комиссии:

Генеральный директор ОАО «Дружба»

Клютов С.З.

Главный бухгалтер ОАО «Дружба»

Бикбаев Р.Р.

Главный инженер ОАО «Дружба»

Казиев А.Б.

