

На правах рукописи



Сурин Роман Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
КОЛЁСНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ПОЛЕВЫХ
РАБОТАХ**

Специальность

4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного
комплекса»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Благовещенск - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент
Бурмага Андрей Владимирович

Официальные оппоненты:

Борисенко Иван Борисович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», кафедра «Земледелие и агрохимия», заведующий

Бережнов Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный аграрный университет имени В.Н. Полецкого», кафедра «Агроинженерия», доцент

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет»

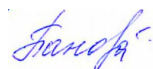
Защита состоится 24 июня 2025 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.013.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет», (ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ) по адресу: 675005, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86, телефон: +7(4162)99-51-79; E-mail: dis35201303@dalgau.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет» www.dalgau.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Панова Елена Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования и степень разработанности проблемы. В последние годы на территории Амурской области, в целях повышения эффективности использования колёсных энергетических средств на полевых работах в условиях переувлажнения несущего почвенного слоя, что характерно для региона в весенний период, всё чаще применяются многооперационные комбинированные почвообрабатывающие машины, имеющие высокую энерговооружённость и производительность. Учитывая, что в этот период возникает необходимость уменьшения влаги в плодородном слое, эффективным способом является применение машин (орудий), работа которых направлена на улучшение водопроницаемости в подпочвенные горизонты при одновременном снижении переуплотнения почв и разрушения плужной подошвы, что позволит повысить как тягово-сцепные свойства энергетических средств, так и сохранить плодородие, способствуя повышению урожайности и увеличению валовых сборов сельскохозяйственных культур.

В то же время применение современных высокоинтенсивных технологий растениеводства невозможно без использования энергетических средств раздельно-агрегатной компоновки тягового класса 5-8 тс с высокими тягово-сцепными свойствами в составе машинно-тракторных агрегатов (МТА). Обладая рядом преимуществ, эти колёсные энергетические средства имеют и ряд недостатков, в частности: из-за большого веса передней полурамы колёсного трактора и установленных на ней агрегатов, оказывают негативное влияние на физико-механические характеристики почвы, увеличивается глубина колеи и снижается качество проведения полевых работ. В то же время задние ведущие колёса полурамного трактора, проходя по следу движения переднего моста, в звене «двигатель-почва» под воздействием сниженных сил трения находятся в менее выгодных условиях по сцепным качествам, что также уменьшает их тягово-сцепные свойства, при этом задние ведущие двигатели не могут реализовать в полном объёме заложенные производителем эксплуатационные характеристики. Поэтому, исследования направленные на повышение эффективности использования колёсных энергетических средств на полевых работах, является актуальными.

На основе анализа работ авторов и степени проработанности темы установлено, что повышение эффективности использования колёсных энергетических средств на полевых работах можно добиться за счет установки на передней раме и силовом бампере трактора почвообрабатывающего устройства - фронтального прокальвателя-щелереза для перераспределения веса в ходовой системе агрегата, что позволит повысить тягово-сцепные свойства трактора и одновременного осуществления прокальвания верхнего почвенного слоя на необходимую глубину с целью улучшения водопроницаемости почвы.

Научная гипотеза: повысить эффективность использования колёсных энергетических средств на ранневесенних полевых работах возможно при их применении в составе многооперационных почвообрабатывающих агрегатов с одновременным снижением техногенного воздействия на почвы их ходовых систем.

Цель исследования – повышение эффективности использования колёсных энергетических средств в период проведения ранневесенних полевых работ.

Задачи исследования:

- проанализировать особенности природно-климатических условий и современное состояние машинно-тракторного парка региона и обосновать пути повышения эффективности колёсных энергетических средств в составе почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов;

- предложить методологическое обоснование для разработки конструкции фронтально-агрегируемого устройства, предназначенного для применения в составе многооперационных почвообрабатывающих агрегатов с целью снижения техногенного воздействия на почву;

- теоретически и экспериментально определить параметры влияния прокальвающего устройства предлагаемой конструкции на перераспределение сцепного веса между мостами

энергетического средства, технологические параметры агрегата и физико-механические свойства почвы;

- провести сравнительные хозяйственные испытания серийного и экспериментального МТА в условиях производственной эксплуатации, дать энергетическую и технико-экономическую оценку проведённых исследований.

Объект исследования – технологический процесс подготовки почвы к посевным работам.

Предмет исследования. - закономерности изменения тягово-сцепных свойств колёсных энергетических средств и физико-механических свойств почвы от перераспределения сцепного веса в ходовой системе трактора.

Научная новизна заключается в обосновании закономерностей процессов перераспределения сцепного веса, возникающих при агрегатировании колёсным энергетическим средством фронтального прокальвателя-щелереза. Получены аналитические выражения, определяющие воздействие прокальвателя-щелереза на перераспределение сцепного веса между мостами колёсного энергетического средства. Установлено влияние прокальвателя-щелереза на тягово-сцепные свойства колёсного энергетического средства, скоростные характеристики, производительность, показатели техногенного воздействия на почву и определены режимы рационального функционирования предлагаемого МТА.

Новизна, изобретательский уровень и промышленная применимость предложенных технических решений подтверждена патентами РФ на изобретения и полезные модели № 2769449, 2754595, 213798, 2797283, 2791619, новизна и оригинальность применённого математического формульного аппарата защищена свидетельствами РФ на программу для ЭВМ № 2022681520, 2022681522, 2024688686, 2024688338, 2024688337.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретически обоснованы и экспериментально проверены в реальных условиях производственной эксплуатации новые подходы, доказывающие эффективность применения способов перераспределения сцепного веса в составе МТА, позволяющие более рационально реализовывать тягово-сцепные свойства колёсных тракторов. Установлено, что использование МТА с предлагаемым устройством повышает тягово-сцепные свойства энергетического средства, снижает техногенное воздействие колёсной ходовой системы на почву за счёт уменьшения величины буксования движителей и снижения вертикальной нагрузки в пятне контакта. Полученные экспериментальные зависимости, предложенные технические решения и программные продукты позволяют сократить затраты времени и материальных средств при конструировании, изготовлении, внедрении, совершенствовании и доработке серийных тракторов, используемых в составе почвообрабатывающих агрегатов.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены и применяются в КФХ «Швецов С.Н.» (Благовещенского округа), КФХ «Лысенко А.П.» (Ивановского округа) Амурской области. Предложения по уточнению теории использования колёсного энергетического средства с изменяющимся сцепным весом используются в учебном процессе на кафедре транспортно-энергетических средств и механизации АПК факультета механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ.

Методология и методы исследования. Исследования по теме диссертации выполнены в ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ в соответствии с научно-технической программой:

- на 2016-2020 г.г. тема 15 - «Перспективная система технологий и машин для сельскохозяйственного производства Дальнего Востока» ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ, номер государственной регистрации 01200503571;
- на 2021-2025 г.г. тема 8 - «Мобильная энергетика» ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ, номер государственной регистрации № 121022000099-61.

Теоретические исследования по повышению эффективности использования колёсного энергетического средства на полевых работах проведены на основе использования методов теоретической и прикладной механики. В исследованиях использован математический аппарат линейного программирования, дифференциального и интегрального исчисления.

Экспериментальные исследования проведены в реальных условиях производственной эксплуатации.

Полученные экспериментальные данные обработаны в соответствии с современными методами теории вероятностей, математической статистики и планирования экспериментальных исследований с применением специализированных программ «Blender», «Sigma Plot 11.0», «Mathcad» и «Компас 3D V22».

Основные положения, выносимые на защиту:

- методологическая схема, отображающая взаимосвязи конструирования почвообрабатывающих орудий для щелевания почв и конструкция фронтального прокалывателя-щелереза, предназначенного для проведения пунктирного щелевания в составе МТА;
- аналитические зависимости, позволяющие определить нагрузку, приходящуюся на рабочий орган предлагаемого устройства и обосновывающие влияние устройства на перераспределение нагрузки между мостами колёсного трактора;
- результаты производственной проверки предлагаемой конструкции в реальных условиях эксплуатации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных данных подтверждается значительной степенью сходимости теоретических и экспериментальных исследований, результатами лабораторно-полевых испытаний, проведённых с достаточным количеством опытов и применением программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего требуемую точность измерений, обработкой опытных данных методами математической статистики с использованием специализированных математических программ на ПЭВМ, в соответствии с поставленными целью, задачами, выбором объекта, предмета, способностью воспроизводимости результатов в типичных условиях, высокими экономическими показателями внедрения предложенных методологических и технических решений, устройств и рекомендаций в производственных условиях, а также использованием результатов исследований конструкторскими, образовательными и другими организациями.

Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на тематических научных конференциях ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ (Благовещенск, 2020 - 2024 г.г.); всероссийских научно-практических конференциях «Теоретические и практические вопросы современной науки» (Москва, 2020 г.), «Актуальные вопросы энергетики в АПК» (Благовещенск, 2022 г.); «Актуальные вопросы аграрной науки» (Иркутск, 2022 г.); «Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития» (Красноярск, 2022 г.); «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования» (Новосибирск, 2022 г.); «Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК» (Минск, 2022 г.); «Развитие современной аграрной науки: «Обеспечение технологического суверенитета АПК: подходы, проблемы, решения» (Екатеринбург, 2023 г.); «Актуальные вопросы, достижения и инновации» (Нальчик, 2024 г.); в международных научно-практических конференциях E3S Web of Conferences (Volume 381, 431, 2023 г.); MIP: Engineering-IV. AIP Conference Proceedings (Volume 3021(1), 2024 г.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 2020-2024 г.г. в сборниках международных, национальных и региональных научно-практических конференций, научных трудов, в журналах: «Технический сервис машин», «Известия Оренбургского государственного аграрного университета»; «Вестник Брянской ГСХА», политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ, АгроЭкоИнфо: электронный научно-производственный журнал, «Дальневосточный аграрный вестник»; «Известия Международной академии аграрного образования»; научный журнал «Агронаука» ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои; Journal of Advanced Research in Technical Science.

В список основных работ, опубликованных по теме диссертации включены 33 публикации, в том числе статьи в изданиях, индексируемом в международных цитатно-аналитических базах, 3 статьи в данных Web of Science и Scopus, 10 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено 5 патентов на интеллектуальную собственность и 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы, состоящего из 206 наименований и приложений. Общий объём диссертации составляет 199 страниц, содержит 97 рисунков, 22 таблицы, 10 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложена степень её разработанности, представлены цель и задачи исследования, научная новизна, методология и методы проведённых исследований, теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов исследования.

В первой главе приведен обзор природно-климатических и почвенных условий региона, дан анализ результатов регионального сельскохозяйственного производства, наличия и качественного состояния средств механизации труда, проведена оценка направлений и способов повышения эффективности использования колёсных энергетических средств в процессе подготовки почвы к посевным работам, предложена методологическая схема использования перспективной конструкции для щелевания почвы в составе комбинированного МТА, способствующая повышению тягово-сцепных свойств колёсного энергетического средства за счет перераспределения части нагрузки с передних, управляемых колёс трактора на задние ведущие колёса, сделано обобщение результатов ранее проведённых исследований и предложены направления развития сельского хозяйства Амурской области. Установлено, что повышение эффективности использования колёсных энергетических средств в технологии возделывания сельскохозяйственных культур может быть достигнуто за счет повышения тягово-сцепных свойств трактора. Повышению эффективности использования энергетических средств на полевых работах при глубокой обработке почвы посвящены исследования В.Д. Блохина, А.М. Бурыкина, Д.Ю. Горшенина, А.Н. Зеленина, С.И. Кабулова, В.В. Кацыгина, А.Н. Куваева, А.А. Моисеенко и других учёных.

Вопросы повышения эффективности функционирования механизированных технологических комплексов при совершенствовании технологических показателей нашли отражение в трудах В.В. Герашенко, Д.А. Голованова, Д.В. Дроботова, В.В. Ильичева, Ю.А. Кима, П.С. Короткевича, И.С. Кочетова, Е.Е. Кузнецова, А.Н. Панасюка, С.В. Щитова и других авторов.

Анализ проведенных ранее исследований показал, что одним из перспективных способов повышения эффективности использования колёсных энергетических средств на предпосевных работах в условиях переувлажнения является их применение в составе многооперационных почвообрабатывающих агрегатов и установка устройств, предназначенных для снижения техногенного воздействия на почвы при проходе ходовых систем.

На основании патентного поиска были сформированы основные требования, поставлена техническая задача и предложено техническое решение в виде конструкции фронтального прокальвателя-щелереза, способного повысить тягово-сцепные свойства энергетического средства, снизить техногенное воздействие колёсной ходовой системы на почву за счёт уменьшения величины буксования движителя - «Фронтальный прокальватель-щелерез» по патенту РФ на изобретение № 2769449, рисунок 1.

Прокальватель-щелерез устанавливается на передней раме и силовом бампере трактора.

При въезде на обрабатываемое поле, оператор трактора 7 с помощью нагружающего гидроцилиндра 14 опускает пространственную раму 1 фронтального прокальвателя-щелереза на почвенную поверхность и производит заглубление лучеобразных прокальвающих рабочих органов 9, при этом происходит перераспределение части веса с передних колёс трактора на рабочие органы устройства 9 и задний мост трактора.

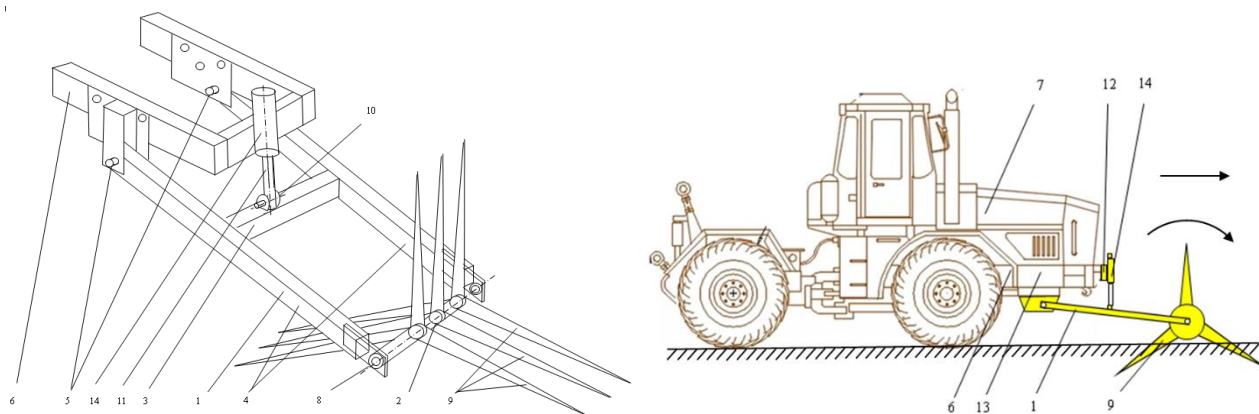


Рисунок 1 – Конструктивная и технологическая схемы фронтального прокальвателя-щелереза (1 - пространственная рама, 2 - передняя фронтальная поперечная трубчатая тяга, 3 - нагружающе-поддерживающая поперечная тяга, 4 - продольные трубчатые тяги, 5 - косыночные упоры, 6 - передняя боковая часть передней полурамы трактора, 7 – колёсный трактор (типа К-700А), 8 - подшипниковые узлы, 9 - лучеобразные прокальывающие рабочие органы, 10 – проушина, 11 - рабочий шток нагружающего гидроцилиндра, 12 - опорный кронштейн, 13 - передний силовой бампер трактора), 14 - нагружающий гидроцилиндр.

Далее, в движении, происходит кручение передней фронтальной поперечной трубчатой тяги 2 с лучеобразными прокальывающими рабочими органами 9 в подшипниковых узлах 8, пассивное заглупление органов 9 на глубину, соответствующую длине луча рабочего органа 9 и проворачивание в почвенном слое, что производит операцию прорезания почвенного слоя, его щелевания, разуплотнения и крошения.

Во второй главе изложены теоретические предпосылки проводимых исследований определено влияние прокальвателя-щелереза на распределение нормальных реакций почвы и нагрузки на движитель колёсного энергетического средства, обосновано воздействие динамических параметров фронтального прокальвателя-щелереза на конструкцию трактора в движении, проведён расчёт тягового усилия колёсного энергетического средства с установленным фронтальным прокальвателем-щелерезом в условиях движения по склону, рассмотрены показатели тракторной устойчивости колёсного энергетического средства с фронтально установленным прокальвателем-щелерезом.

В целях математического обоснования характеристик предлагаемого устройства и выявления параметров действующих величин рассмотрим процесс перераспределения веса между колёсами трактора для трёх прогнозируемых положений:

- в серийном варианте без установки фронтального прокальвателя-щелереза (рисунок 2);
- с установленным фронтальным прокальвателем-щелерезом в статичном состоянии (рисунок 3);
- с установленным фронтальным прокальвателем-щелерезом в рабочем положении (рисунок 4).

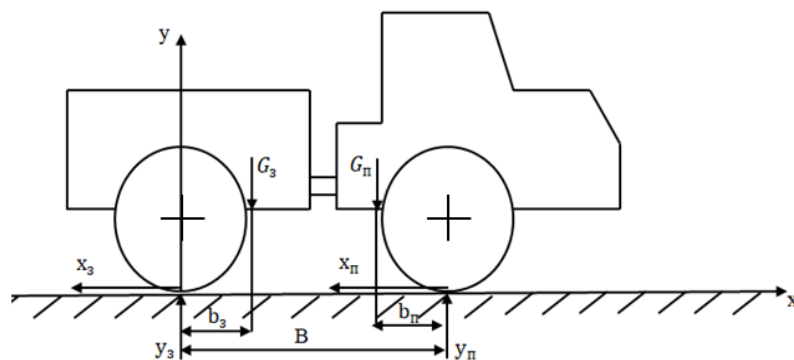


Рисунок 2 - Схема к определению реакций поверхности почвы на мосты колёсного трактора, где y_3, y_n - вертикальные реакции почвы на задний и передний мосты колёсного

трактора соответственно, Н; $x_3, x_{\text{п}}$ - горизонтальные реакции почвы на задний и передний мосты колёсного трактора соответственно, Н; $G_3, G_{\text{п}}$ - вес задней и передней полурамы трактора соответственно, Н; B - продольная база колёсного трактора, м; b_3 - расстояние от заднего моста до вертикальной проекции точки расположения центра тяжести задней полурамы трактора, м; $b_{\text{п}}$ - расстояние от переднего моста до вертикальной проекции точки расположения центра тяжести задней полурамы трактора, м.

Вертикальная составляющая силовой реакции поверхности почвы определится (рисунок 2):

- на передний мост трактора

$$y_{\text{п}} = \frac{G_3 b_3 + G_{\text{п}}(B - b_{\text{п}})}{B} \quad (1)$$

- на задний мост трактора

$$y_3 = \frac{G_{\text{п}} b_{\text{п}} + G_3(B - b_3)}{B} \quad (2)$$

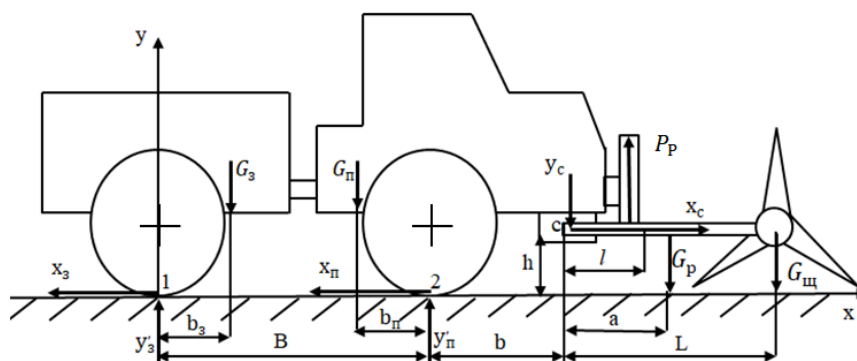


Рисунок 3- Схема к определению реакций поверхности почвы на колёсный трактор с установленным фронтальным прокальвателем- щелерезом в статичном состоянии (элемент-трактор), где $y_{\text{п}}, y_3$ - вертикальные реакции почвы на задний и передний мосты колёсного трактора соответственно, Н; $G_{\text{щ}}$ - вес лучеобразных прокальвающих рабочих органов, Н; $G_{\text{р}}$ - вес пространственной рамы, Н; l - расстояние от точки с до точки крепления нагружающего гидроцилиндра, м; a - расстояние от точки с до центра тяжести прокальвателя- щелереза, м; L - расстояние от точки с до вертикальной проекции центра тяжести рабочего органа прокальвателя- щелереза, м; b - расстояние от точки с до переднего моста трактора, м; h - расстояние от точки с до поверхности почвы, м.

Распределение вертикальных составляющих реакций поверхности почвы на колёсный трактор с установленным фронтальным прокальвателем-щелерезом в статичном состоянии представлено на рисунке 3.

Вертикальная составляющая силовой реакции поверхности почвы определится:

- на передний мост трактора

$$y_{\text{п}} = \frac{G_3 b_3 + G_{\text{п}}(B - b_{\text{п}})}{B} + \frac{G_{\text{п}}(a - l) + G_{\text{щ}}(L - l)}{l} \frac{B + b}{B} + \frac{G_{\text{п}} a + G_{\text{щ}} L}{l} \frac{h}{B} ct g \varphi \quad (3)$$

- на задний мост трактора

$$y_3 = \frac{G_{\text{п}} b_{\text{п}} + G_3(B - b_3)}{B} - \frac{G_{\text{п}}(a - l) + G_{\text{щ}}(L - l)}{l} \frac{b}{B} + \frac{G_{\text{п}} a + G_{\text{щ}} L}{l} \frac{h}{B} ct g \varphi \quad (4)$$

Проведя преобразования из выражений (3) и (4) получим выражения для определения величины изменения нагрузки на мосты трактора, где:

- передний мост трактора загружается на величину

$$\Delta y_{\text{п}} = \frac{G_{\text{п}}(a - l) + G_{\text{щ}}(L - l)}{l} \frac{B + b}{B} + \frac{G_{\text{п}} a + G_{\text{щ}} L}{l} \frac{h}{B} ct g \varphi. \quad (5)$$

- задний мост трактора разгружается на величину

$$\Delta y_3 = \frac{G_{\text{п}}(a - l) + G_{\text{щ}}(L - l)}{l} \frac{b}{B} + \frac{G_{\text{п}} a + G_{\text{щ}} L}{l} \frac{h}{B} ct g \varphi. \quad (6)$$

Определим вертикальные составляющие силовой реакции поверхности почвы на колёсный трактор с установленным фронтальным прокальвателем-щелерезом в рабочем состоянии (рисунок 4).

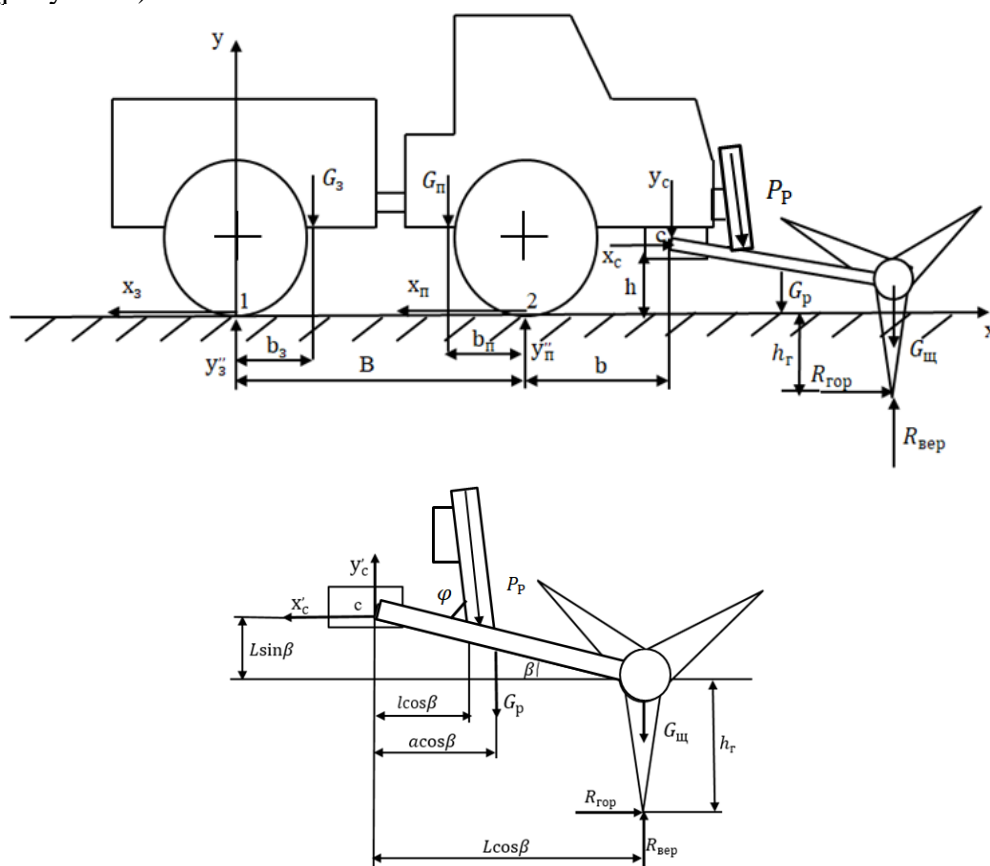


Рисунок 4 - Схема к определению реакций поверхности почвы на колёсный трактор с установленным фронтальным прокальвателем-щелерезом в рабочем состоянии (элемент-прокальватель-щелерез), где y_3'' , $y_{п}''$ - вертикальные реакции почвы на задний и передний мосты колёсного трактора соответственно, Н; h_r - расстояние от поверхности почвы до точки прокальвания почвенного пласта, м; P_p - усилие в нагружающем гидроцилиндре для удержания устройства в рабочем положении, м; $R_{гор}$ - горизонтальное сопротивление почвы, действующее на лучеобразный прокальвающий рабочий орган, Н; $R_{вер}$ - вертикальное силовое сопротивление почвы прокальванию, действующее на лучеобразный прокальвающий рабочий орган, Н; углы φ и β определяются конструктивно, зависят от заглубления рабочих органов вспомогательного устройства, град.

Определим силу, действующую в нагружающем гидроцилиндре на прокальватель-щелерез в рабочем положении (рисунок 4)

$$P_p = \frac{R_{гор}(h_r + L \sin \beta) + R_{вер} L \cos \beta - G_p a \cos \beta - G_{щ} L \cos \beta}{\sin(\beta + \varphi) l \cos \beta}. \quad (7)$$

Определим реакции действующие в точке С-установочном кронштейне прокальвателя.

$$y_c' = \frac{R_{гор}(h_r + L \sin \beta) + R_{вер} L \cos \beta - G_p a \cos \beta - G_{щ} L \cos \beta}{l \cos \beta} + G_p + G_{щ} - R_{вер}. \quad (8)$$

$$x_c' = \frac{R_{гор}(h_r + L \sin \beta) + R_{вер} L \cos \beta - G_p a \cos \beta - G_{щ} L \cos \beta}{l \cos \beta} \operatorname{ctg}(\beta + \varphi) + R_{гор}. \quad (9)$$

Рассчитаем вертикальную составляющую реакции почвы:

- на передний мост колёсного энергетического средства

$$y_{п}'' = \frac{G_3 b_3 + G_{п}(B - b_{п})}{B} - \left[\frac{R_{гор}(h_r + L \sin \beta) + R_{вер} L \cos \beta - G_p a \cos \beta - G_{щ} L \cos \beta}{l \cos \beta B} \cdot (\operatorname{ctg}(\beta + \varphi) h + B + b) + R_{гор} \frac{h}{B} + (G_{п} + G_{щ} - R_{вер}) \cdot \frac{(B+b)}{B} \right] \quad (10)$$

- на задний мост колёсного энергетического средства

$$y_3'' = \frac{G_{\Pi} b_{\Pi} + G_3 (B - b_3)}{B} + \left[\frac{R_{\text{гор}} (h_r + L \sin \beta) + R_{\text{вер}} L \cos \beta - G_{\text{р}} a \cos \beta - G_{\text{щ}} L \cos \beta}{l \cos \beta B} \cdot (\text{ctg}(\beta + \varphi) h + b) + R_{\text{гор}} \frac{h}{B} + (G_{\Pi} + G_{\text{щ}} - R_{\text{вер}}) \cdot \frac{b}{B} \right] \quad (11)$$

Исходя из анализа полученных выражений (10) и (11) можно сделать следующий вывод, что при работе предлагаемого устройства - фронтального прокальвателя-щелереза передний мост трактора разгружается, а задний мост трактора загружается.

Таким образом применение перспективного фронтального прокальвателя-щелереза позволит перераспределить вертикальную нагрузку с переднего моста колёсного энергетического средства на задний мост, что увеличит тягово-сцепные характеристики трактора, повысит его проходимость и снизит техногенное воздействие ходовой системы на обрабатываемый плодородный слой. Использование исследуемой конструкции в составе комбинированного сельскохозяйственного орудия, как в период подготовки почвы, так и во время посева, значительно сократит количество проходов МТА по полю. Одновременное применение в процессе основной обработки почвы методов щелевания, прокальвания и посева позволит уменьшить эксплуатационные расходы и расширить технологические показатели агрегата.

В третьей главе приводится методика и условия экспериментальных исследований. Для подтверждения полученных теоретических исследований были проведены экспериментальные исследования, для чего сформулированы следующие задачи экспериментальных исследований: 1. Экспериментально установить и проанализировать процесс перераспределения сцепного веса между мостами колёсного трактора при установке и работе предлагаемого устройства. 2. Выявить влияние конструктивно-технологических параметров предлагаемого устройства на глубину погружения рабочих органов, буксование и скорость движения. 3. Определить влияние прокальвателя-щелереза в составе почвообрабатывающего агрегата на изменение физико-механических свойств плодородного слоя почвы. 4. Провести сравнительные хозяйственные испытания трактора К-700А с установленным прокальвателем-щелерезом и бороной БДМ-6х4п. Исследования проводились по общим и частным методикам с использованием математического моделирования эксперимента и методов регрессионного анализа. С целью выявления и определения параметров зависимостей, возникающих при воздействии фронтального прокальвателя-щелереза на колёсный трактор К-700А, его тяговые и скоростные характеристики, процессы перераспределения сцепного веса между мостами колёсного трактора и рабочими элементами предлагаемого устройства. При этом замерялись следующие параметры: влажность, плотность и твердость почвы; глубина прокальвания почвенного слоя; нагрузка на рабочие органы устройства, передний и задний мосты трактора; тяговое усилие МТА; частота вращения ведущих колёс трактора; время опыта; пройденный путь (для определения рабочей скорости); рабочая скорость агрегата; расход топлива. Для определения численных значений вышеперечисленных параметров использовалась измерительная аппаратура. Сравнительные хозяйственные испытания проводились методом хронометражного наблюдения. Обработка данных, полученных в ходе эксперимента, проводилась известными методами математической статистики с использованием ЭВМ.

В четвёртой главе приводятся результаты экспериментальных исследований. Для выявления и определения параметров зависимостей, возникающих при воздействии фронтального прокальвателя-щелереза на колёсный трактор К-700А, его тяговые и скоростные характеристики, процессы перераспределения сцепного веса между мостами колёсного трактора и рабочими элементами предлагаемого устройства, общую эффективность предлагаемого агрегата, в весенне-летний период, были проведены экспериментальные исследования в реальных условиях эксплуатации, рисунок 5.



Рисунок 5 - Фрагмент испытаний экспериментального трактора с фронтальным прокальвателем-щелерезом

Эксперименты проводились в полевых условиях, почвенный фон которых по своим характеристикам соответствовал предъявляемым агротехническим требованиям. Почвенный слой по своим свойствам (механическому составу) представлял собой луговые лесные и черноземовидные почвы с содержанием суглинков средней тяжести, все замеры проводились в пятикратной повторности.

В результате проведенных экспериментальных исследований физико-механические свойства почвы были получены следующие значения:

- влажность почвы составила от 10,3 – 44,1 % при глубине измерения от 0,05 до 0,45 м. При этом наиболее влажный слой (влажность 26,1 %) наблюдалась на глубине 0,25 м.

- средняя плотность почвы составила после прохода серийного трактора 1,25 г/см³, а после прохода экспериментального трактора 1,24 г/см³.

- средняя твердость почвы после прохода экспериментального агрегата составила 59,8 Мпа, а после прохода серийного 63,66 Мпа.

Для подтверждения ранее полученных теоретических исследований были проведены экспериментальные исследования перераспределения нагрузки между мостами колёсного трактора приведенные на рисунках 6 и 7.

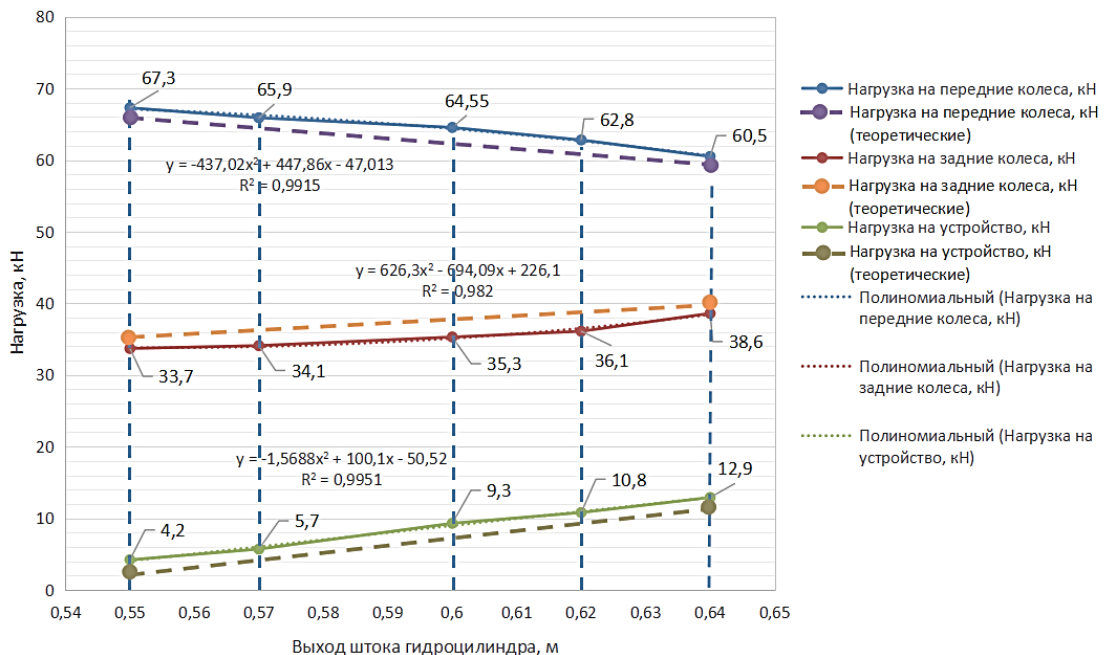


Рисунок 6 - Влияние длины выхода штока гидроцилиндра на перераспределение нагрузки между мостами трактора

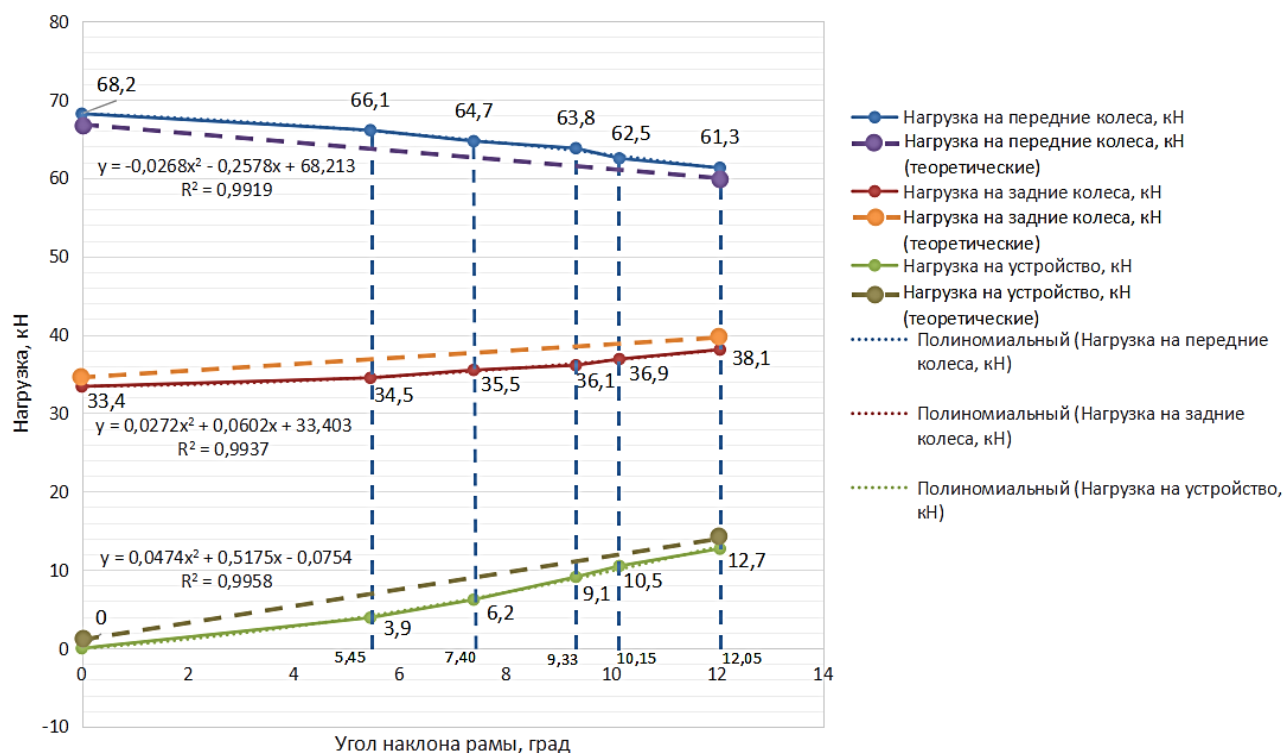


Рисунок 7 - Влияние угла наклона рамы устройства на перераспределение нагрузки между мостами трактора

В результате проведенных исследований было установлено, что при изменении угла наклона рамы устройства произошло перераспределение нагрузки:

- передний мост трактора - снижение нагрузки составило с 66,1 кН до 61,3 кН;
- задний мост трактора - повышение нагрузки составило с 34,5 кН до 38,1 кН.

При этом нагрузка на прокалывающее устройство при максимальном силовом нагружении составила 12,7 кН.

Перераспределение нагрузки между мостами трактора в зависимости от угла наклона рамы устройства нагрузки можно описать уравнением регрессии:

- для переднего моста трактора $y = -0,0268x^2 - 0,2578x + 68,213$; (12)

- для заднего моста трактора $y = 0,0272x^2 + 0,0602x + 33,403$; (13)

- для устройства $y = 0,0474x^2 + 0,5175x - 0,0754$. (14)

Полученные данные показывают, что при увеличении нагрузки на прокалывающие органы устройства происходит перераспределение сцепного веса трактора в пределах и параметрах, согласно полученных ранее результатов теоретических исследований.

Как показали проведенные исследования, результаты теоретических и экспериментальных данных находятся в пределах доверительного интервала 3,5-5 %, что говорит о достоверности проведенных теоретических исследований.

Для обработки результатов экспериментальных исследований использовалась методика многофакторного эксперимента. Для определения влияния конструктивно-технологических параметров фронтального прокалывателя-щелереза на глубину обработки почвы определены основные факторы, влияющие на критерии оптимизации изучаемого процесса, а также уровни их варьирования. Основными независимыми факторами были выбраны $x_1 - l$, м - выход рабочего штока гидроцилиндра; $x_2 - \alpha$, град - угол наклона рамы прокалывателя-щелереза и $x_3 - v$, км/ч - скорость движения экспериментального колёсного трактора К-700А. Результирующей функцией выбрана $Y_1 - h$, м - глубина прокалывания почвы прокалывающим органом перспективного устройства. При построении поверхностей откликов (использовалась программа SigmaPlot v.11.0) варьировались два фактора (рисунки 8-10).

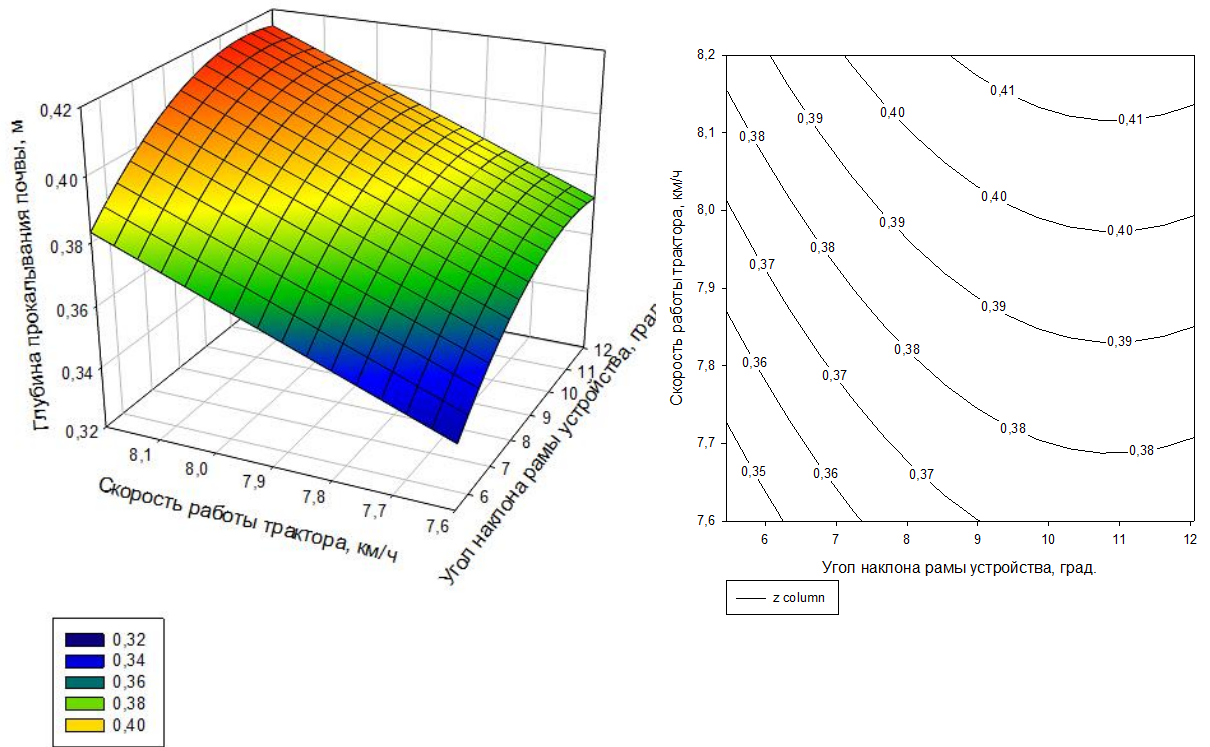


Рисунок 8 – Поверхность и сечение поверхности отклика h в зависимости от X_2 (α) и X_3 (v) (при зафиксированном на нулевом уровне X_1 ($l = 0,595$ м)).

$$h = -0,289 + 0,024\alpha + 0,07v - 0,0011\alpha^2 \quad (15)$$

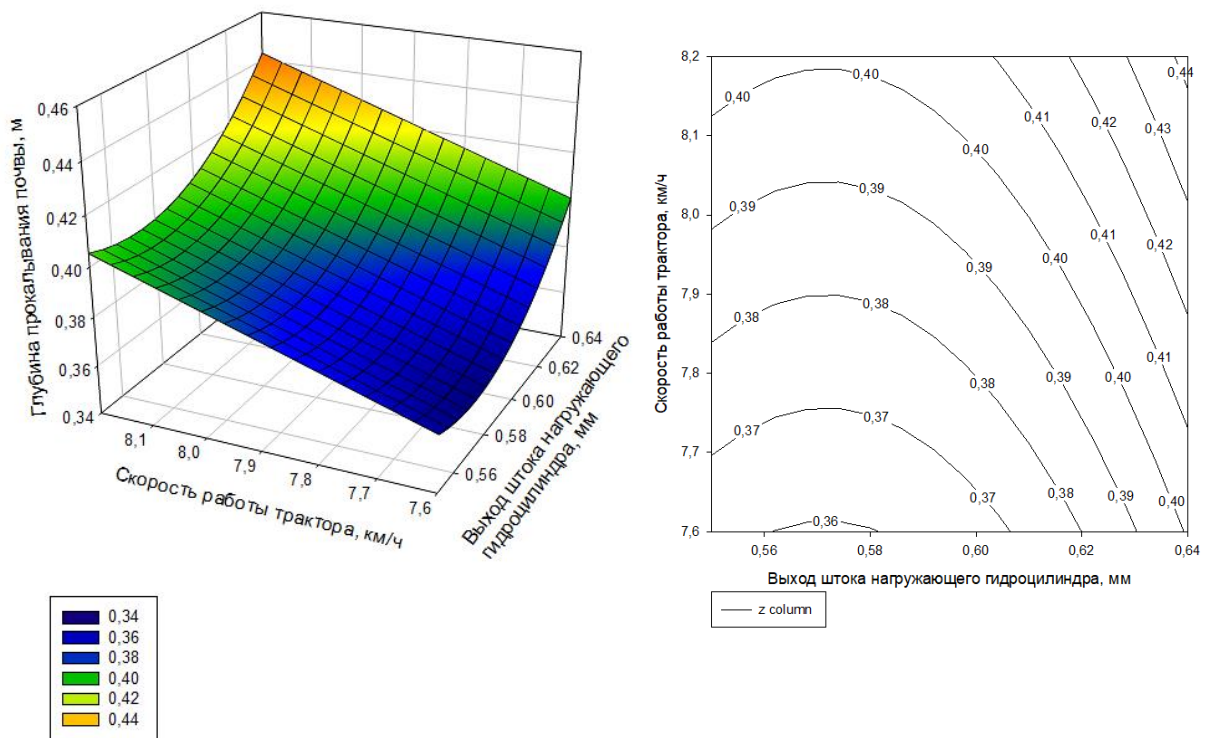


Рисунок 9 – Поверхность и сечение поверхности отклика h в зависимости от X_1 (l) и X_3 (v) (при зафиксированном на нулевом уровне X_2 ($\alpha = 3,57$ град.)).

$$h = 2,75 - 10,226l + 0,07v + 8,944l^2 \quad (16)$$

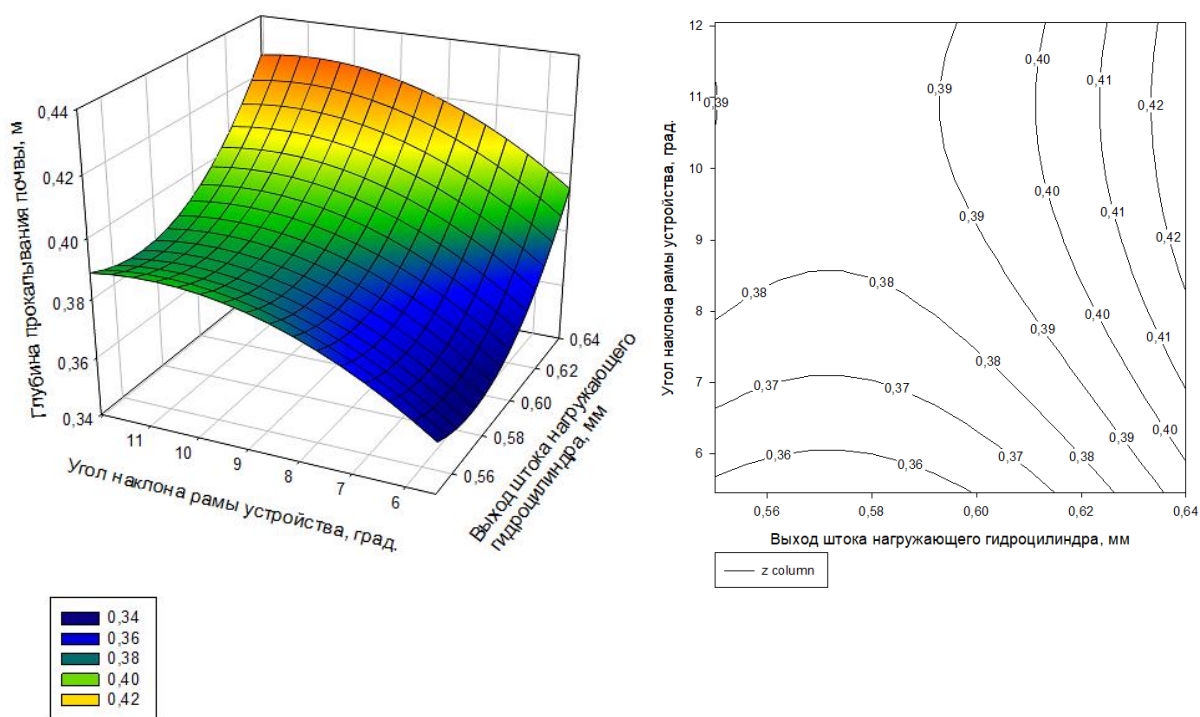


Рисунок 10 – Поверхность и сечение поверхности отклика h в зависимости от X_1 (l) и X_2 (α) (при зафиксированном на нулевом уровне X_3 ($v = 7,9$ км/час)).

$$h = 3,178 - 10,226l + 0,024\alpha + 8,944l^2 - 0,0011\alpha^2 \quad (17)$$

Полученные визуальные отображения действующих процессов (рисунки 9...11) позволяют определить оптимальные параметры взаимодействующих факторов, а также показывают приемлемые значения их уровней для экспериментального энергетического средства с фронтальным прокальвателем-щелерезом. Так при глубине прокальвания 0,34-0,38 м наиболее оптимальными являются рабочая скорость агрегата в диапазоне от 7,9 до 8,1 км/ч при угле наклона рамы устройства от 8° до 12° . Причём максимальная глубина прокальвания 0,42 м достигается при выходе штока нагружающего гидроцилиндра от 0,62 до 0,64 м при этом же угле наклона рамы устройства от 8° до 12° .

Таким образом наиболее значимым фактором, ответственным за технологические показатели агрегата является выход штока нагружающего цилиндра предлагаемого устройства.

В пятой главе. В результате проведённых исследований установлено, что использование МТА с фронтальным прокальвателем-щелерезом позволит получить экономию энергозатрат на полевых работах в размере 1841,53 МДЖ/га или 418,43 руб/га в ценах дизельного топлива на период 30.10.2024 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам исследований, проведенных в диссертационной работе, получены результаты, позволяющие сформулировать следующие обоснованные выводы:

1. Изучены и проанализированы характерные особенности природно-климатических и производственных условий региона, установлено их влияние на эффективность использования колёсных энергетических средств в составе почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов. Обоснованы возможности повышения эффективности при эксплуатации колёсных тракторов в агропромышленном комплексе региона при их использовании в составе многооперационных агрегатов.

2. Предложено методологическое обоснование и сформирована конструкция фронтально агрегируемого устройства, предназначенного для проведения пунктирного щелевания в составе МТА, способствующая перераспределению нагрузки между мостами

энергетического средства, повышению тягово-цепных свойства трактора и снижению техногенного воздействия его ходовой системы на обрабатываемые почвы.

3. Теоретически аргументировано и экспериментально подтверждено влияние перераспределения веса между мостами колёсного трактора тягового класса 5 на эффективность использования МТА. В результате использования предложенного устройства, нагрузка на движители переднего моста колёсного энергетического средства снизилась с 67,3 кН до 60,5 кН, а на заднем мосту - увеличилась с 33,1 кН до 38,6 кН, нагрузка на прокалывающее устройство при максимальном силовом нагружении зафиксирована на уровне 12,7 кН.

Таким образом полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что при увеличении нагрузки на прокалывающие органы устройства происходит перераспределение сцепного веса трактора в пределах и параметрах, согласно полученных ранее результатов теоретических исследований.

4. В результате экспериментальных испытаний получена зависимость глубины прокалывания почвенного слоя. Установлено, что при увеличении выхода штока гидроцилиндра от 0,55 м до 0,64 м и изменения угла положения рамы экспериментального устройства с $5,45^{\circ}$ до $12,05^{\circ}$ глубина прокалывания почвы возрастает от 0,33 м до 0,42 м, что позволяет провести щелевание почвы на различной глубине. При этом показатели плотности и твёрдости почвы у экспериментального трактора меньше, чем у серийного. Так плотность почвы у экспериментального трактора в обрабатываемом горизонте 0,15 м уменьшилась на 7 %, при чём зафиксированная твёрдость почвы после прохода экспериментального агрегата на 6,07 % ниже по сравнению с проходом ходовой системы серийного трактора.

5. Проведённые тяговые испытания показали, что при тяговом усилии 48,78 кН изменение величины буксования и скорости движения серийного МТА (трактор+дискактор) соответственно составило с 13 % до 15,1 % и с 9 км/ч до 7,4 км/ч. При этом установка на трактор прокалывателя-щелереза повысила величину буксования с 13,4 % до 15,3 % и снизила скорость движения с 8,4 км/ч до 7,2 км/ч.

6. Сравнительными хозяйственными испытаниями установлено, что произошло снижение производительности экспериментального МТА по сравнению с серийным в час времени движения и в час основного рабочего времени соответственно с 3,96 га/ч до 3,91 га/ч и с 3,37 га/ч до 3,33 га/ч при одновременном увеличении расхода топлива на единицу обработанной площади с 22,7 л/ч до 23,6 л/ч. Выполненная экономическая и топливно-энергетическая оценка показала, что общая экономия полных энергозатрат при использовании колёсного энергетического средства с агрегатированным фронтально прокалывателем-щелерезом при подготовке полей под посев составила 1841,53 МДж/га, что в пересчёте на рублёвый эквивалент (в стоимости дизельного топлива летнего в Амурской области на 30.10.2024 года) составляет 418,43 руб/га.

Рекомендации производству. Программные продукты и конструктивные схемы предлагаемых технических решений, в зависимости от почвенной структуры, наличия количества влаги в верхних слоях и глубины залегания уплотнительной плужной подошвы, а также состава и комплектности МТА позволяют провести прогнозирование технологических характеристик колёсных энергетических средств на полевых работах в условиях повышенной почвенной влажности и обеспечить выполнение полевых операций с максимальной производительностью.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшее развитие применения фронтальных агрегируемых прокалывающих устройств в составе комбинированного МТА в зональных условиях эксплуатации Амурского региона может быть направлено на их использование с тракторами моноблочной компоновки при проведении посева в составе посевных комплексов и при проведении ухода за посевами, когда выпадает большое количество осадков.

**Список основных работ, опубликованных по теме диссертации:
в изданиях, входящих в международную базу цитирования
Scopus:**

1. Surin, R.O. Raising the efficiency of using tillage machines based on a semi-frame tractor / R.O. Surin [and others] // Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP: Engineering-IV) AIP Conf. Proc. 3021, 010001 (2024). Volume 3021, Issue 1 (29 March 2024).p.7 <https://doi.org/10.1063/5.0196715https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/3021/1>
2. Surin, R.O. Application of multi-criteria in the selection of running systems for regional use of tractors in agriculture / R.O. Surin [and others] // E3S Web of Conf. Volume 381, 01032 (2023). International Scientific and Practical Conference «Development and Modern Problems of Aquaculture» (AQUACULTURE 2022). - 1,72 Мб doi.org/10.1051/e3sconf/202338101032.
3. Surin, R.O. Comparative characteristics of undercarriage systems as criteria for selecting a power tool for risky farming zones / R.O. Surin [and others] // E3S Web of Conferences. Volume 431 (2023). XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023). - 2023. - 2,198 Мб. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343101002>. <https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/68/contents/contents.html>.

в изданиях из перечня научных изданий, рекомендованного ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

4. Сурин, Р.О. Влияние установки прокальвателя-щелевателя на распределение нормальных реакций почвы и нагрузки на движители полурамного трактора / Р.О. Сурин [и др.] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – № 2 (44). - 0,68 п.л. (0,44 Мб.) Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/2/st_217.pdf.
5. Сурин, Р.О. Расчёт реакций конструкции фронтального прокальвателя-щелереза при работе на склонах / Р.О. Сурин [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2022. - № 2 (94). - С. 155–160 https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_94.pdf
6. Сурин, Р.О. Перспективы развития колёсных полурамных энергетических средств в современном мире / Р.О. Сурин [и др.] // Технический сервис машин. 2022. - Т. 60. - № 2 (147). - С.179-186. <http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2022/07/%E2%84%962-147-2022.pdf> DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-179-186
7. Сурин, Р.О. Определение тягового усилия колёсного полурамного энергетического средства с установленным фронтальным прокальвателем-щелерезом на уклоне / Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2022. - № 4 (96). - С. 117–122 <https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia96.pdf>.
8. Сурин, Р.О. К вопросу обеспечения тракторной устойчивости агрегата с фронтально установленным прокальвателем-щелерезом / Р.О. Сурин [и др.] // Дальневосточный аграрный вестник. – Благовещенск: Дальневосточный ГАУ. - 2022. - Т. 16. - № 3. - С. 123–129. [doi: 10.22450/199996837_2022_3_123](https://doi.org/10.22450/199996837_2022_3_123).
9. Сурин, Р.О. Анализ современного состояния и направления модернизации сельскохозяйственного производства (на примере Амурской области) / Известия Оренбургского государственного аграрного университета.- 2023. - № 1 (99). - С. 173–179 [doi: 10.37670/2073-0853](https://doi.org/10.37670/2073-0853).
10. Сурин, Р.О. Повышение тягового усилия, развиваемого колёсным энергетическим средством на почвах с высокой степенью липкости / Р.О. Сурин [и др.] // Известия Международной академии аграрного образования. 2023. - № 64 (2023). - С.48-52. <https://maaorus.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-64.pdf>.
11. Сурин, Р.О. Результаты исследований по влиянию прокальвателя-щелереза на перераспределение нагрузки между мостами трактора / Р.О. Сурин [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) – 2024. - 203 (09). – 9 с. 1,Мб <http://ej.kubagro.ru/2024/09/pdf/01.pdf>.

12. Сурин, Р.О. Результаты экспериментальных исследований по определению влияния прокальвателя-щелереза на величину буксования и скорость движения трактора / Р.О. Сурин [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2024. - № 6 (110). - С. 110-116.

13. Сурин, Р.О. Повышение эффективности использования тракторов класса 5 при подготовке почвы под посев / Р.О. Сурин [и др.] // Вестник Брянской ГСХА. - 2024. - № 6 (106). - С. 60-63.

патенты на изобретение и полезную модель:

14. Сурин Р.О. Пунктирный прокальватель-щелеватель. Патент на изобретение: пат. № 2754595 Российская Федерация. 2021. Бюл. № 25.

15. Сурин Р.О. Фронтальный прокальватель-щелерез. Патент на изобретение: пат. № 2769449 Российская Федерация. 2022. Бюл. № 10.

16. Сурин Р.О. Фронтальный прокальватель-щелерез со стабилизатором колебаний. Патент на полезную модель: пат. № 213798 Российская Федерация. 2022. Бюл. № 28.

17. Сурин Р.О. Автоматический регулятор глубины почвенной обработки для сельскохозяйственной техники. Патент на изобретение: пат. № 2791619 Российская Федерация. 2023. Бюл. № 8.

18. Сурин, Р.О. Почвообрабатывающий фронтальный комбинированный прокальывающе-прикатывающий агрегат. Патент на изобретение: пат. № 2797283 Российская Федерация. 2023. Бюл. № 18.

свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

19. Сурин Р.О. Программа определения технологических параметров машинно-тракторного агрегата с фронтальным прокальывающим сельскохозяйственным орудием при движении по склоновым поверхностям. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022681520: заявка № 2022681058 Российская Федерация. 2022.

20. Сурин Р.О. Программа расчета динамических параметров машинно-тракторного агрегата с фронтальным прокальывателем-щелерезом. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022681522: заявка № 2022681056 Российская Федерация. 2022.

21. Сурин Р.О. Программа для определения нагрузки на передний мост трактора с установленным прокальывателем-щелерезом. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024688686: заявка № 2024687978 Российская Федерация. 2024.

22. Сурин Р.О. Программа для определения нагрузки на задний мост трактора с установленным прокальывателем-щелерезом. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024688338: заявка № 2024688022 Российская Федерация. 2024.

23. Сурин Р.О. Программа для расчёта нагрузки, действующей на рабочий орган прокальывателя-щелереза. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024688337: заявка № 2024688018 Российская Федерация. 2024.

в прочих научных изданиях:

24. Сурин, Р.О. Перспективные конструктивные схемы сельскохозяйственных машин для проведения полевой обработки почвы / Р.О. Сурин, А.В. Бурмага // 65-я Международная научная конференция Евразийского Научного Объединения ISSN 2411-1899 Теоретические и практические вопросы современной науки / Сборник научных работ 65-й Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения (г. Москва, июль 2020). - № 7 2 (65). - М: ЕНО, 2020. - С.132-135 <https://esa-conference.ru/wp-content/uploads/2020/08/esa-july-2020-part2.pdf>.

25. Сурин, Р.О. Применение фронтального комбинированного сельскохозяйственного агрегата в условиях зон рискованного земледелия / Р.О. Сурин [и др.] // Обеспечение технологического суверенитета АПК: подходы, проблемы, решения. Сборник статей

Международной научно-практической конференции. Уральский ГАУ, Екатеринбург, 2023. -С. 204-206.

26. Сурин, Р.О. Расчетная эффективность перспективного машинно-тракторного агрегата / Р.О. Сурин [и др.] // Актуальные вопросы энергетики в АПК. Материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции. - Благовещенск: Дальневосточный ГАУ, 2022. – С. 162–168.

27. Сурин Р.О. Обоснование выбора формы рабочих органов для фронтального прокальвателя-щелереза / Актуальные вопросы аграрной науки. - Иркутск: Иркутский ГАУ, - 2022. - № 44. - С.29-36.

28. Сурин, Р.О. Комбинированный посевно- почвообрабатывающий агрегат для зон рискованного земледелия / Р.О. Сурин [и др.] // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию. – Красноярск: ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ, 2022. - С. 123-126.

29. Сурин, Р.О. Фронтальный прокальватель-щелерез со стабилизатором колебаний / Р.О. Сурин [и др.] // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования. Материалы XIV международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Новосибирский ГАУ, 2022. - С. 177-180.

30. Сурин, Р.О. К вопросу снижения энергетических затрат при использовании комбинированной сельскохозяйственной машины на полевых работах / Р.О. Сурин [и др.] // Современные проблемы и пути развития технического сервиса в АПК. Материалы международной научно-практической конференции. - Минск: БГАТУ, 2022. – С.268-274.

31. Сурин, Р.О. Региональные особенности проведения обработки почвы в Амурской области / Р.О. Сурин [и др.] // Развитие современной аграрной науки: Актуальные вопросы, достижения и инновации. Материалы международной научно-практической конференции посвященной памяти заслуженного деятеля науки РСФСР, доктора сельскохозяйственных наук, профессора П. Г. Лучкова. - Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2024. - С. 278-282 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65634809>.

32. Сурин, Р.О. Определение твёрдости почвы при использовании перспективного прокальвателя-щелереза в сельскохозяйственном производстве региона / Р.О. Сурин [и др.] // Агронаука, 2024. Том 2. № 3. - С. 52–58. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-2024-2-3-52-58>.

33. Surin, R.O. The use of a combined agricultural unit on slitting and rolling in the conditions of the Amur region / R.O. Surin [and others] // Journal of Advanced Research in Technical Science. ISSN 2474-5901, SRC MS, Seattle: USA № 35, 2023. - С.88-92. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-35-88-92>.