

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Ермаков Денис Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЛЁСНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ПОДГОТОВКЕ ПОЧВЫ

Специальность

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Школьников Павел Николаевич
доктор технических наук, доцент

Благовещенск, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Современное состояние вопроса и задачи исследований	9
1.1 Краткая характеристика естественно-производственных особенностей Амурской области	9
1.2 Влияние региональных особенностей на процесс подготовки почвы в Амурской области	14
1.3 Наличие и состояние машинно-тракторного парка в АПК Амурской области	16
1.4 Назначение технологической операции боронование почвы и классификация дисковых борон	19
1.5 Общая характеристика и конструкция дисковых борон	23
1.6 Основные характеристики дискаторов	26
1.7 Известные аналитические разработки по обработке почвы дисковыми рабочими органами	31
1.8 Выводы по главе	40
2 Теоретические исследования по обоснованию повышения эффективности работы бороновального агрегата	41
2.1 Методологическое обоснование необходимости адаптации бороновального агрегата к естественно-производственным условиям региона	41
2.2 Повышение эффективности использования дисковых борон на предпосевной подготовке почвы	45
2.3 Определение нагрузок, приходящихся на опорные основания бороновального агрегата	50
2.4 Влияние использование предлагаемого технического решения на производительность бороновального агрегата	59
3 Программа и методика экспериментальных исследований	61

3.1 Задачи экспериментальных исследований	61
3.2 Общая методика проведения экспериментальных исследований	62
3.3 Объекты и условия проведения экспериментальных исследований	63
3.4 Средства измерений при проведении полевых испытаний	67
3.5 Определение физико-механических характеристик почвы	72
3.6 Методика статистической обработки данных полевых опытов	76
4 Результаты производственной проверки	79
4.1 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на изменение величины силовой нагрузки, приходящейся на колеса трактора и рабочие органы бороны	79
4.2 Результаты исследований по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на агротехнологические показатели бороновального агрегата	93
4.3 Результаты сравнительных хозяйственных испытаний	96
4.4 Регрессионно-дисперсионный анализ результатов исследований по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на колеса энергетического средства	97
5 Экономическая и топливно - энергетическая оценка выполненных исследований	123
Заключение	127
Список использованных источников	129
Приложения	148

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность производства любой сельскохозяйственной культуры во многом зависит от своевременного и качественного выполнения всех сельскохозяйственных работ, предусмотренных применяемой технологией.

Вместе с тем, выпускаемые в настоящее время промышленностью средства механизации не всегда способны в полном объёме выполнять возложенные на них функции в связи со специфическими особенностями региона, тогда как предприятия нуждаются в полной реализации возможностей имеющихся в наличии машин и механизмов, в связи с чем возникает необходимость их модернизации и адаптации к зональным почвенно-климатическим и производственным особенностям.

В связи с этими факторами подготовка почвы (в частности почв с тяжёлым механическим составом) происходит весной, когда сроки выполнения работ также ограничены наличием мерзлотного подстилающего слоя, который при повышении окружающей температуры воздуха начинает таять, в связи с чем снижается несущая способность слоя почвы. В этих условиях необходимо задействовать все имеющиеся средства механизации в максимально короткие сроки, особенно остро этот вопрос стоит в небольших крестьянско-фермерских хозяйствах (КФХ), где в качестве основного мобильного энергетического средства (МЭС) используются колёсные тракторы класса 1,4...2.

Наиболее отчётливо исследуемые факторы проявляются при использовании тракторов колёсной ходовой системы на бороновании, где в составе машинно-тракторного агрегата (МТА) используются дисковые бороны большой массы, с высоким тяговым сопротивлением.

Дисковая борона является наиболее универсальным орудием, применяемым практически на всех этапах технологии производства в сельском хозяйстве.

Качество почвенной обработки дисковой бороной и её глубина зависят от большого количества взаимодействующих факторов. В то же время глубина обработки зависит от вертикальной весовой нагрузки, передаваемой на рабочий

орган бороны - диск, отчего происходит заглубление дисков в почвенный слой, что при перекапывании бороны, вызывает перемешивание и разрыхление почвенных слоёв. При полном созревании почвы к проведению обработки и оптимальной влажности, наличии лёгких типов почв (песчаных и супесчаных) в обрабатываемых ландшафтах заглубление дисков бороны на максимальную глубину не вызывает особых трудностей, однако при применении на обработке суглинистых или глинистых почв заглубление рабочих органов происходит только на глубину в 15-18 см вследствие недостаточности веса.

Решить данную проблему возможно путём внедрения новых технических решений постановкой дополнительных устройств способных перераспределять нагрузку между опорными поверхностями энергетического средства и рабочими органами бороновального агрегата.

В связи с этим предложена научная гипотеза, заключающаяся в том, что перераспределение нагрузки между опорными поверхностями энергетического средства и рабочими органами бороновального агрегата даст возможность повысить тягово-сцепные свойства энергетического средства и величину вертикальной нагрузки на рабочие органы дисковой бороны.

Цель исследования – повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата на бороновании за счёт перераспределения нагрузки между опорными поверхностями энергетического средства и рабочими органами бороновального агрегата.

Для решения поставленной цели определены следующие задачи исследований:

1. Проанализировать естественно-производственные условия и состояние средств механизации, используемых на бороновании почвы в Амурской области;
2. Произвести анализ ранее проведенных исследований, посвящённых вопросу боронования почвы;
3. Разработать и предложить техническое решение (устройство) для повышения эффективности использования колёсных энергетических средств на бороновании;

4. Теоретически обосновать и экспериментально подтвердить эффективность работы предлагаемого технического решения на перераспределение нагрузки между опорными основаниями энергетического средства и рабочими органами бороны;

5. Дать топливно-энергетическую и экономическую оценку результатов исследований.

Объект исследования – процесс подготовки почвы под посев машинно-тракторным агрегатом в составе колесного трактора класса 1,4 и бороны БДТ-3.

Предмет исследований – изучение закономерностей влияния перераспределения нагрузки внутри бороновального агрегата на процесс подготовки почвы.

Научная новизна заключается в обосновании факторов и закономерностей, возникающих при перераспределении нагрузки внутри бороновального агрегата. Предложены математические зависимости позволяющие выявить влияние предложенного технического решения на величину силового воздействия приходящегося на опорные поверхности энергетического средства и рабочие органы дисковой бороны, глубину обработки почвы, эффективность использования колёсных тракторов класса 1,4 с дисковыми бороны. Изобретательский уровень и практическая применимость предложенных аналитических и технических решений подтверждены патентами РФ на объекты интеллектуальной собственности и свидетельством на программу для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность работы предлагаемого технического решения в реальных условиях эксплуатации. Установлено, что использование предлагаемого устройства для корректировки силовой нагрузки внутри МТА повышает тягово-сцепные свойства колёсного трактора класса 1,4, снижает техногенное воздействие движителей на почву при её обработке. Полученные экспериментальные зависимости позволяют сократить затраты времени и материальных средств при конструировании, изготовлении, внедрении,

совершенствовании и доработке серийных машинно-тракторных агрегатов, используемых при подготовке почвы под посев.

Материалы исследований внедрены и используются в ООО «Казанское», КФХ Махмудов Сами Адилшах Оглы, КФХ Усманов Машъал Муталибович и в ООО «АГРО-С.Е.В.».

Результаты исследований по повышению эффективности использования колёсного трактора класса 1,4 с бороной БДТ-3 используются в учебном процессе на кафедре транспортно-энергетических средств и механизации АПК ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ.

Методология и методы исследований. Теоретические исследования выполнялись с использованием основных положений, законов и методов классической механики, математики и аналитической геометрии. Экспериментальные исследования проводились в полевых условиях на основе общепринятых методик в соответствии с действующими ГОСТ. Основные расчеты и обработка результатов экспериментов выполнялись с использованием методов математической статистики, а также программ Microsoft Excel и Statistica 6.1.

Основные положения, выносимые на защиту:

- новое техническое решение (устройство) для регулирования силовых нагрузок на движители колёсного энергетического средства и рабочие органы дисковой бороны;
- аналитические зависимости, позволяющие выявить влияние предлагаемого технического решения (устройства) на распределение силовых нагрузок, приходящихся на движители колёсного энергетического средства;
- аналитические зависимости, позволяющие выявить влияние предлагаемого технического решения (устройства) на изменение силовых нагрузок, приходящихся на рабочие органы дисковой бороны.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается сходимостью теоретических показателей и экспериментальных результатов, полученных в производственных условиях эксплуатации колесных тракторов класса 1,4 и дисковых борон БДТ-3.

Результаты диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на тематических научных конференциях ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ (2021 - 2026 гг.), национальных и международных научно-практических конференциях: Международной научно-практической конференции «Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов» (Москва, 2023 г.), XXX всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития естественных и технических наук» (Ставрополь, 2023 г.), XV международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова (Новосибирск, 2023), что дает право сделать обоснованный вывод о достаточной полноте отражения результатов исследования в научных публикациях и высокой степени апробации исследований.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в сборниках национальных и международных научно-практических конференций, научных трудов ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ, в научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки Российской Федерации: «Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета» (K2), «Известия Оренбургского государственного аграрного университета» (K2), «Вестник Курганской ГСХА» (K2), «АгроЭкоИнфо» (K2), «Вестник Алтайского государственного аграрного университета» (K2), «Нива Поволжья» (K2).

В перечень работ, опубликованных по теме диссертации, включено 26 публикации, в том числе 13 статей в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 3 патента на объекты интеллектуальной собственности.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, состоящего из 159 наименований и приложений. Общий объем работы составляет 156 с., содержит 84 рисунка, 22 таблицы.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Краткая характеристика естественно-производственных особенностей Амурской области

Территория Амурской области составляет 361,9 тыс. кв. км. (2,1% территории Российской Федерации). Располагается область на юго-востоке Российской Федерации в азиатской ее части, между Становым хребтом на севере и рекой Амур на юге. На юге проходит государственная граница с Китаем. На западе область граничит с Забайкальским краем, на севере - с Республикой Саха (Якутия) и на востоке - с Хабаровским краем и Еврейской автономной областью. Почти вся территория области расположена в бассейне реки Амур.

Область лежит в умеренном географическом поясе, климат континентальный с муссонными чертами. Средняя температура воздуха колеблется с юга на север от +20,7 до +17,6 градуса в июле и от -27,6 до -32,8 градуса в январе. Зима сухая и малоснежная. Примерно 90% влаги приходится на теплое время года. Общая протяженность рек Амурской области превышает 77 тыс. км. Больших рек, длина которых свыше 500 км, семь: Амур, Зея, Селемджа, Гилуй, Буряя, Олекма, Нюкжа.

Амурская область относится к числу малонаселенных территорий Российской Федерации. Размещение населения неравномерное. Наиболее густо заселена южная часть области. Средняя плотность населения области – 2,1 человека на 1 кв. километр. Основная масса населения - русские, украинцы, белорусы. В северных районах области в нескольких селениях проживают эвенки.

На 1 января 2025 года в состав Амурской области входили 9 городских округов, 15 муниципальных округов и 5 муниципальных районов. В их составе учтены населенные пункты: 8 городов областного подчинения, 2 города районного подчинения, 15 поселков городского типа, 57 сельских поселений, 601 сельский населенный пункт [153].

Приграничное положение, наличие значительного ресурсного потенциала, открывают для области большие возможности. Основные направления социально-

экономического развития региона сформированы в Стратегии социально-экономического развития Амурской области до 2035 года, утвержденного Постановлением Правительства Амурской области от 24.04.2023 № 381. В стратегии определены основные направления в различных сферах экономики [153].

Количество организаций по виду экономической деятельности в сфере растениеводства и животноводства, охоты и предоставления соответствующих услуг в этих областях за 2020-2025 гг. по данным государственной регистрации, представлены на рисунке 1.1 [154].

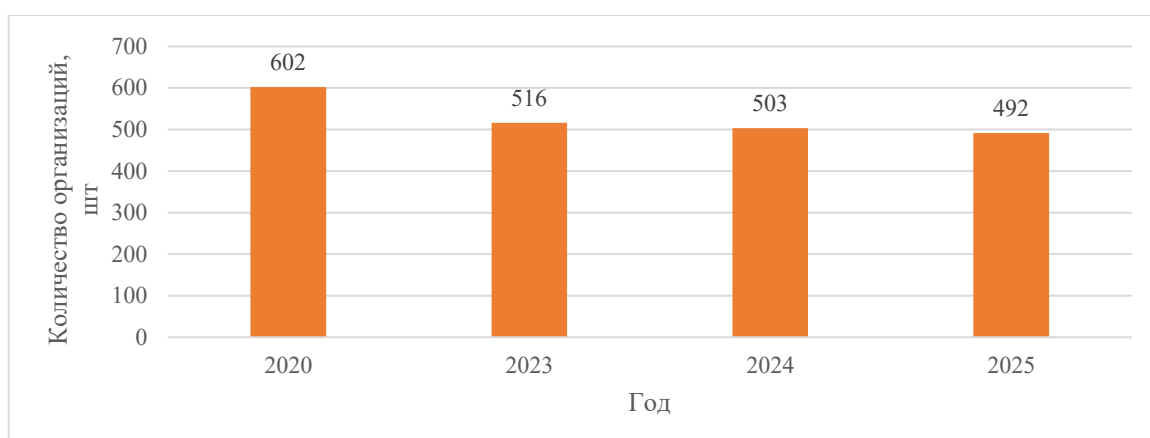


Рисунок 1.1 - Количество организаций по виду экономической деятельности в сфере растениеводства и животноводства, охоты и предоставления соответствующих услуг в этих областях за 2020-2025 гг.

Согласно рисунка 1.1, по состоянию на 2025 год в процентном соотношении к показателю конца 2024 года, количество организаций показало понижение на 2,2%. Данная тенденция сохраняется на всем отслеживаемом в рамках графика промежутке времени, но во многом это касается смежных с сельским хозяйством видов экономической деятельности.

Если рассматривать продукцию сельского хозяйства по категориям хозяйствующих субъектов, то рационально провести сравнение можно при помощи сопоставления эквивалентов фактически действовавших цен. Для визуализации статистических данных по состоянию на конец каждого года представлена диаграмма на рисунке 1.2 [154].

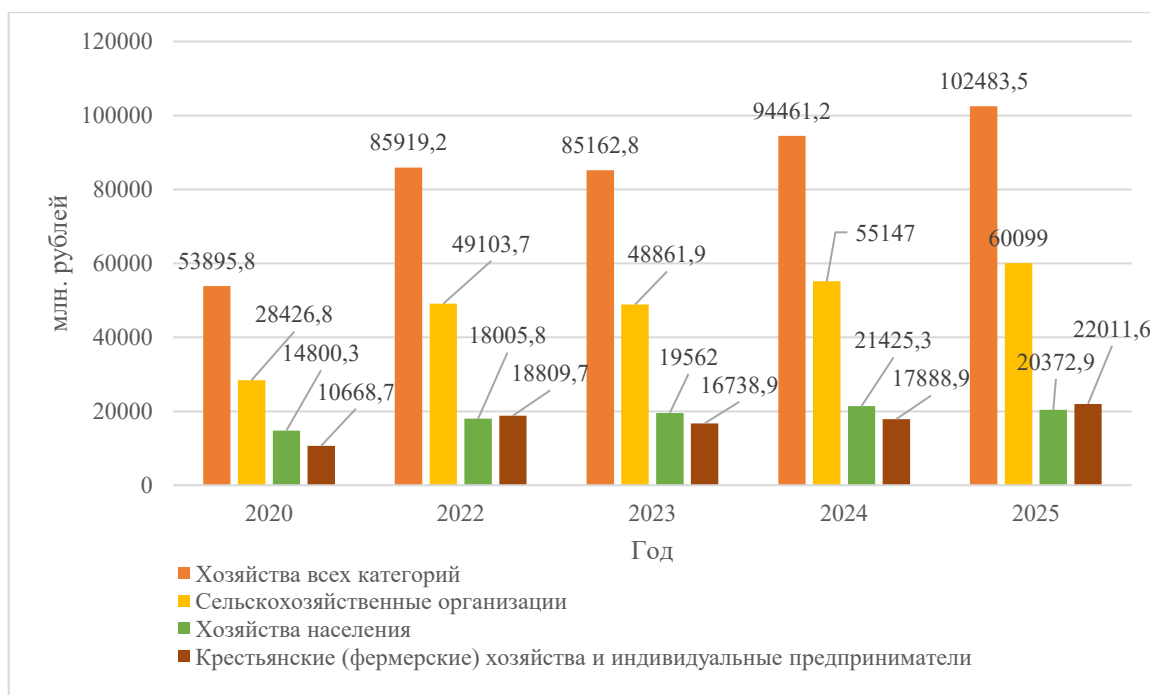


Рисунок 1.2 - Продукция сельского хозяйства по категориям хозяйств в фактически действовавших ценах

Также, для понимания задействования различных организации в долевом распределении количества выпускаемой продукции целесообразно представить данные в виде процентного соотношения (рисунок 1.3).

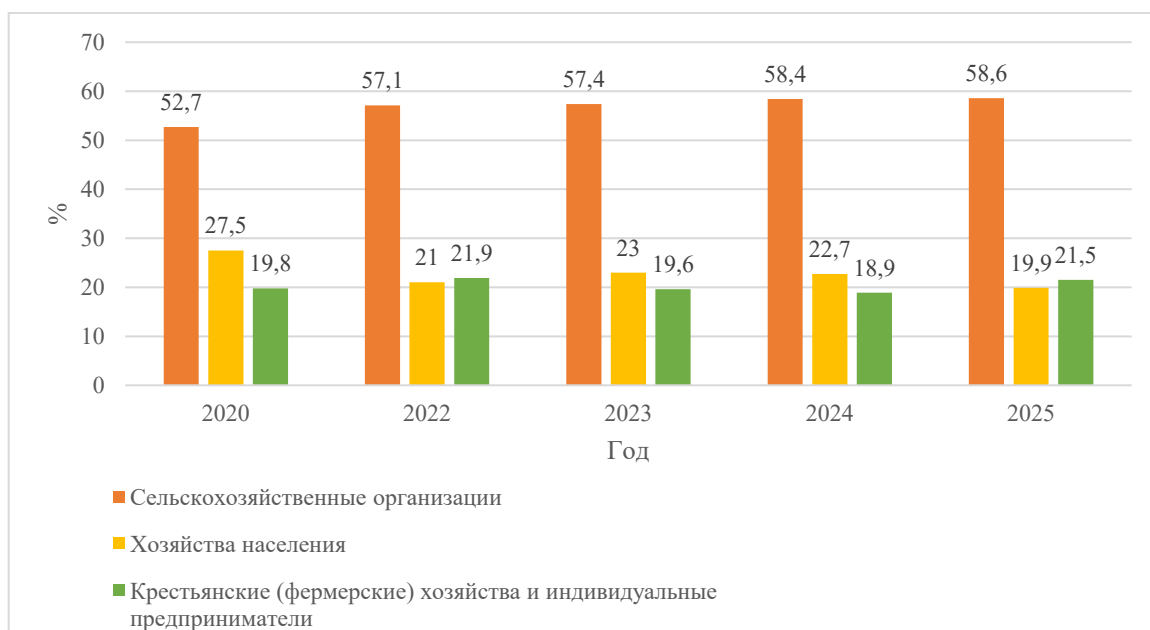


Рисунок 1.3 - Структура распределения сельскохозяйственных угодий по категориям хозяйств

Для сравнения физического объема продукции выпускаемого сферой сельского хозяйства по отношению к предыдущим годам была составлена диаграмма (рисунок 1.4), которая показывает, насколько в процентном соотношении к предыдущему году происходил спад или прирост объемов. Исходя из статистических данных, представленных в диаграмме, можно сделать вывод о наблюдающемся приросте физических объемов продукции сельского хозяйства с 2020 по 2022 года в крестьянских (фермерских) хозяйствах и индивидуальных предпринимателей. Последующие уровни показывают, что с 2023 года и по настоящий момент стабильно поддерживаются объемы производства, что говорит о стабильном интересе к поддержанию экономики региона сельскохозяйственной сферой, при учете всех внешних факторов, оказывающих как прямое, так и косвенное воздействие на данную сферу экономики [154].

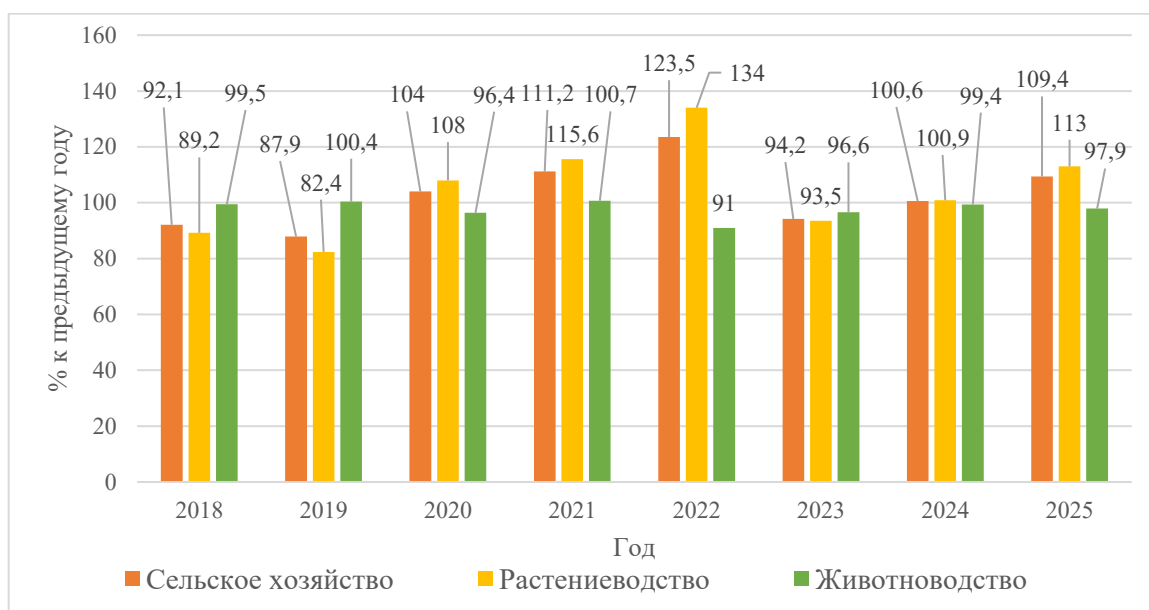


Рисунок 1.4 - Индексы физического объема продукции сельского хозяйства во всех категориях хозяйств в сопоставимой оценке

Для визуализации объемов производства основных сельскохозяйственных продуктов в сельхозорганизациях в разрезе с 2020 по 2024 год по состоянию на конец года согласно статистическим данным построена соответствующая диаграмма, представленная на рисунке 1.5. Аналогично, подобные диаграммы

также представлены для хозяйств населения (рисунок 1.6) и для крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей (рисунок 1.7).

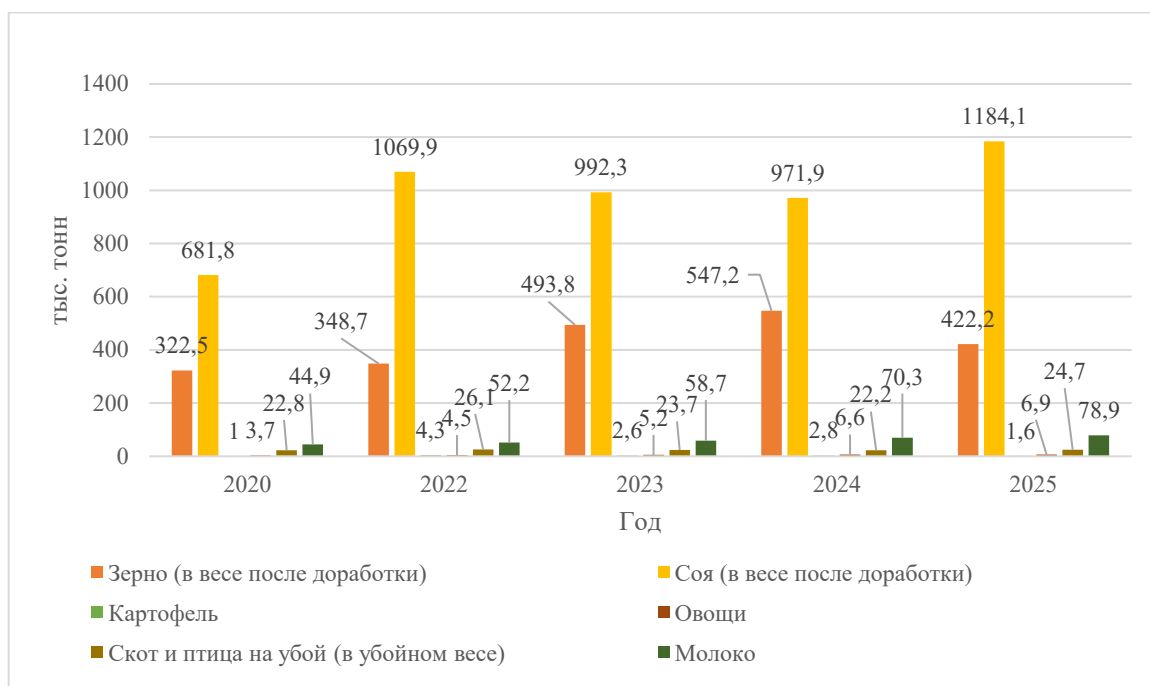


Рисунок 1.5 - Производство основных сельскохозяйственных продуктов в сельхозорганизациях

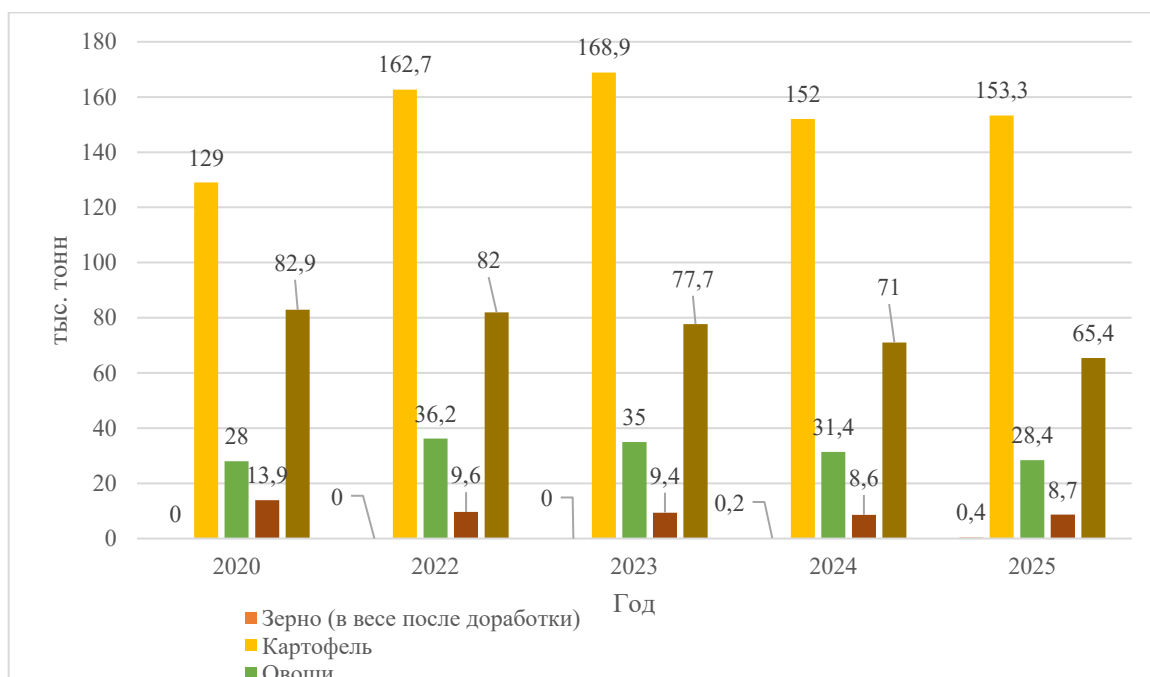


Рисунок 1.6 - Производство основных сельскохозяйственных продуктов в хозяйствах населения

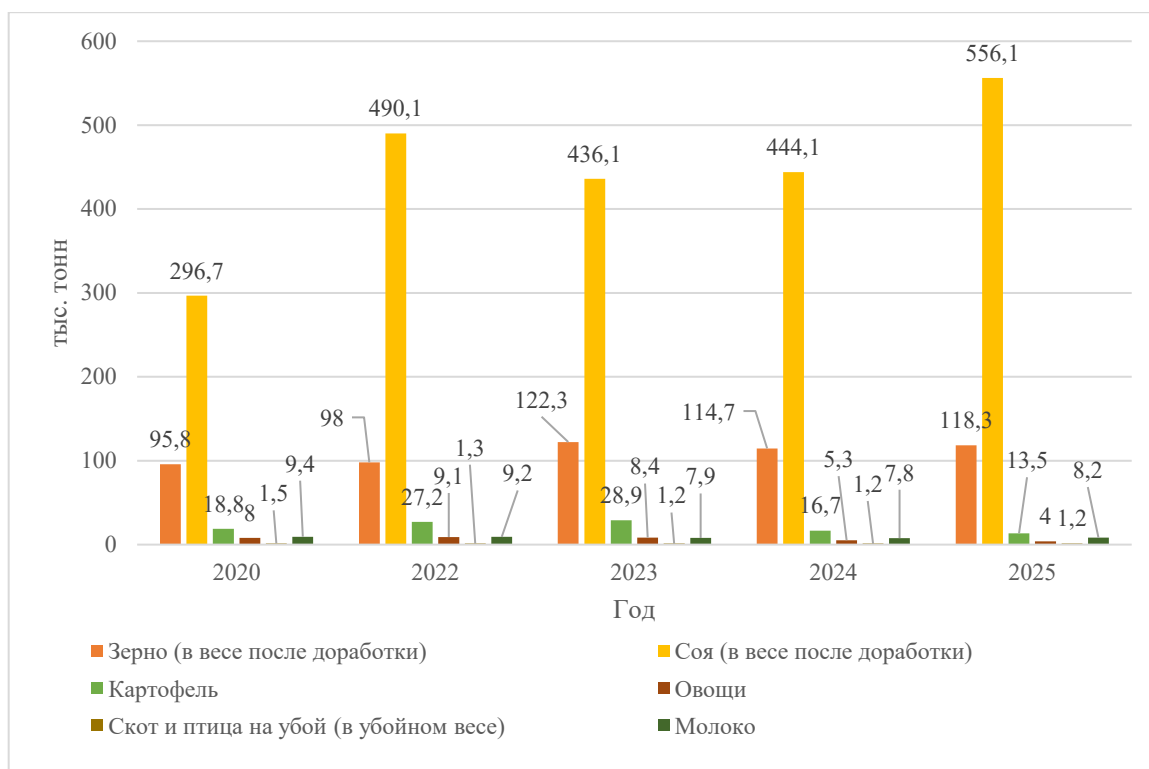


Рисунок 1.7 - Производство основных видов сельскохозяйственной продукции в крестьянских (фермерских) хозяйствах и у индивидуальных предпринимателей

1.2 Влияние региональных особенностей на процесс подготовки почвы в Амурской области

Амурская область характеризуется разнообразным рельефом, включая равнины, холмы и горные районы. Климат региона — континентальный, с холодными зимами и теплым летом. Почвы Амурской области в основном представлены черноземами, сероземами и подзолистыми почвами. Черноземы, обладающие высокой плодородностью, находятся в южной части региона, где условия для сельского хозяйства наиболее благоприятные. В северных районах, где почвы менее плодородные и более подвержены эрозии, подготовка почвы требует особого подхода и использования дополнительных агрономических методов.

По данным Министерства сельского хозяйства России, в 2025 году в Амурской области было засеяно более 1136,7 гектаров сельскохозяйственных угодий, что является значительным показателем наряду со значениями прошлых

лет. Это свидетельствует о стабильно высоком интересе к сельскому хозяйству и необходимости оптимизации процессов подготовки почвы [153].

Подготовка почвы в регионе включает в себя несколько ключевых этапов: вспашка, боронование, культивация и удобрение. Каждый из этих этапов должен учитывать специфические условия, такие как уровень влажности, температура почвы и ее химический состав. Например, в условиях недостатка влаги, характерного для некоторых районов, агрономы применяют технологии минимальной обработки почвы, что позволяет сохранить влагу и улучшить структуру почвы.

С учетом современных экологических вызовов, таких как изменение климата и деградация почв, в Амурской области наблюдается переход к более устойчивым методам ведения сельского хозяйства. В 2022 году 25% сельхозпроизводителей начали внедрять методы органического земледелия, что значительно повлияло на подходы к подготовке почвы. Использование зеленых удобрений, севооборота и интегрированных систем защиты растений стало важной частью агрономической практики, отследить показатели прироста позволяют таблицы 1.1 и 1.2 [154].

Таблица 1.1 – Внесение минеральных удобрений под посевы в сельскохозяйственных организациях

	2020	2022	2023	2024	2025
Внесено минеральных удобрений, всего, тонн	18237	25792	26055	31035	27869
На 1 гектар, килограммов:					
Всей посевной площади	34	42	40	49	45
Зерновых культур (без кукурузы)	39	32	32	48	47
Сои	29	41	41	47	41
Картофеля	-	99	52	-	-
Овощебахчевых культур	-	-	-	-	-
Кормовых культур	39	23	21	24	37
Удельный вес площади с внесенными минеральными удобрениями во всей посевной площади, %	87,1	82,1	85,5	90,6	85,7

Таблица 1.2 – Внесение органических удобрений под посевы в сельскохозяйственных организациях

	2020	2022	2023	2024	2025
Всего органических удобрений, всего, тонн	37463	88686	72003	65984	45032
На 1 гектар, килограммов:					
Всей посевной площади	-	143	111	105	73
Зерновых культур (без кукурузы)	-	396	209	210	158
Сои	-	85	81	-	50
Картофеля	-	-	6271	5232	-
Овощебахчевых культур	-	-	-	-	-
Кормовых культур	-	-	-	-	-
Удельный вес площади с внесенными органическими удобрениями во всей посевной площади, %	5,0	4,9	7,0	7,5	8,0

1.3 Наличие и состояние машинно-тракторного парка в АПК Амурской области

На 2025 год машинотракторный парк (МТП) региональных хозяйств представляет собой важнейший элемент агропромышленного комплекса региона, который играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности и устойчивом развитии сельского хозяйства. Развитие МТП в последние годы было обусловлено несколькими факторами, включая модернизацию техники, внедрение новых технологий и повышение квалификации кадров.

Наблюдается значительный рост численности и качества машинно-тракторного парка. Основными составляющими парка являются тракторы, комбайны, почвообрабатывающее и кормозаготовительное оборудование (таблица 1.3). В последние годы область активно инвестировала в обновление техники, что позволило значительно повысить производительность и эффективность сельскохозяйственных работ [155].

В Амурской области в 2025 году по сравнению с 2024 годом сельскохозяйственными организациями области было приобретено больше тракторов - на 33,3%, плугов - на 38,5%, посевных комплексов - на 57,1%. Коэффициент обновления тракторов, без тракторов, на которых смонтированы

землеройные, мелиоративные и другие машины, жаток валковых, плугов, посевных комплексов, доильных установок и агрегатов, соответственно на 1,6; 1,2; 1,7; 2,1; и 0,1 процентных пунктов выше по сравнению с 2024 годом. Коэффициент износа машин для посева и сеялок был выше коэффициента их обновления. В 2025 году по сравнению с 2024 годом отмечалось увеличение наличия тракторов (на 2,9%); плугов (на 2,6%); борон (на 0,2%); культиваторов (на 2,5%); комбинированных агрегатов (на 0,7%); посевных комплексов (на 4,2%); косилок (на 3,3%); комбайнов кукурузоуборочных (на 8,0%); машин для внесения в почву жидких органических удобрений (на 14,3%); опрыскивателей и опыливателей тракторных (на 4,7%), доильных установок и агрегатов с молокопроводом (на 3,1%) [154].

Таблица 1.3 - Парк основных видов техники в сельскохозяйственных организациях

Наименование	2020	2022	2023	2024	2025
	Количество, штук				
1	2	3	4	5	6
Тракторы	1861	1789	1861	1834	1814
Плуги	318	274	282	274	281
Культиваторы	581	579	602	595	610
Сеялки	360	301	300	285	274
Комбайны:					
зерноуборочные	1005	1007	1044	1026	1026
кормоуборочные	43	41	40	40	37
картофелеуборочные	9	9	8	9	7
Косилки	198	167	173	153	158
Пресс-подборщики	165	134	131	121	108
Жатки валковые	237	255	273	255	266
Дождевальные и поливные машины и установки	-	15	9	-	-
Разбрасыватели твердых минеральных удобрений	55	63	70	90	101
Опрыскиватели и опыливатели тракторные	349	350	361	337	353

В 2025 году в МТП региона представлены как отечественные, так и зарубежные модели тракторов и комбайнов. Наиболее популярными среди сельхозпроизводителей стали тракторы марки «МТЗ», «Кировец» и современные модели от зарубежных производителей John Deere и Case IH.

Распределение марок тракторов в Амурской области характеризуется ярко выраженной доминирующей позицией и сегментированностью рынка.

Наибольшую долю (40%) занимают тракторы марки «МТЗ», вдвое опережающей ближайшего конкурента. Второе место с существенным отрывом занимает марка «Кировец» (19%), что демонстрирует высокий спрос на отечественную технику.

Средний сегмент формируют:

- RSM Versatlie (10%) - заметный игрок, вероятно, за счёт специализации на определённых агротехнологиях;

- DT (6%) и New Holland (5%) - представлены умеренно, сочетая баланс между импортными и отечественными решениями.

Низкопроцентный сегмент (3–5%) включают:

- John Deere (3%) - премиальный импортный бренд, представленный в нишевом сегменте;

- Т-150, 150К (3%) - классические советские модели, сохраняющие актуальность в отдельных хозяйствах;

- китайские тракторы (3%) - отражают тренд на доступные импортные решения, но пока не достигли масштабного распространения [154].

Эти машины обеспечивают высокую производительность, надежность и экономичность, что особенно важно в условиях конкурентного агропродовольственного рынка.

Комбайны, используемые в области, также претерпели значительные изменения. Современные модели, оснащенные системами GPS и автоматизации, позволяют значительно сократить время на уборку урожая и повысить его качество. Внедрение технологий точного земледелия стало возможным благодаря использованию высокотехнологичных комбайнов, что позволяет фермерам оптимизировать затраты и увеличивать рентабельность.

Кроме того, в области активно развиваются технологии агрономического мониторинга и дистанционного зондирования, что позволяет в режиме реального времени отслеживать состояние посевов и принимать оперативные решения по их уходу.

Не менее важным аспектом развития машинотракторного парка является обучение и повышение квалификации кадров. В 2025 году в регионе

функционируют несколько учебных заведений и курсов, которые готовят специалистов для работы с современными машинами и технологиями. Повышение квалификации механизаторов и агрономов позволяет эффективно использовать новейшие достижения в области сельского хозяйства и обеспечивать высокие результаты.

С учетом глобальных вызовов, связанных с изменением климата и охраной окружающей среды, в Амурской области также уделяется внимание экологическим аспектам эксплуатации МТП. Внедряются более экологически чистые технологии, такие как использование биотоплива и электрификация некоторых видов сельскохозяйственной техники. Это позволяет не только снизить углеродный след, но и повысить устойчивость сельского хозяйства к изменениям окружающей среды.

Таким образом, машинотракторный парк Амурской области представляет собой современную и высокоэффективную систему, способную обеспечить потребности агропромышленного комплекса региона. Инвестиции в технику, внедрение новых технологий и повышение квалификации кадров создают условия для устойчивого развития сельского хозяйства и обеспечения продовольственной безопасности. Важно отметить, что дальнейшее развитие МТП будет зависеть от государственной поддержки, инновационных подходов и готовности аграриев к изменениям в условиях быстро меняющегося мира.

1.4 Назначение технологической операции боронование почвы и классификация дисковых борон

Боронование почвы — это одна из ключевых агротехнических операций, которая играет важную роль в системе обработки почвы, особенно в таких регионах, как Амурская область. Эта операция направлена на улучшение структуры почвы, повышение её плодородия и создание оптимальных условий для роста сельскохозяйственных культур (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Основные функции боронования

Боронование почвы выполняет несколько основных функций [156]:

- разрыхление почвы. Боронование способствует разрушению плотных слоев почвы, что улучшает аэрацию и водопроницаемость. Это особенно важно для Амурской области, где почвы могут быть подвержены уплотнению из-за механической обработки и недостатка органического вещества.

- уничтожение сорняков. Боронование помогает контролировать рост сорняков, что снижает конкуренцию за питательные вещества и воду между культурными растениями и нежелательными растениями. В условиях Амурской области, где разнообразие сорняков может быть значительным, эта функция особенно актуальна.

- повышение содержания органических веществ. При бороновании происходит перемешивание верхнего слоя почвы, что способствует лучшему разложению растительных остатков и увеличению содержания гумуса. Это критически важно для поддержания плодородия почвы в условиях интенсивного земледелия.

- подготовка почвы к посеву. Боронование помогает создать мелкокомковатую структуру, что улучшает условия для посева семян и способствует их лучшему прорастанию. Для регионов, где климатические условия могут быть разнообразными, это имеет особое значение для успешного старта сельскохозяйственных культур.

В Амурской области боронование может осуществляться как весной, так и осенью, в зависимости от конкретных агрономических условий и типа возделываемых культур. Весной боронование часто проводят после вспашки для

подготовки почвы к посеву. Осенью же боронование может использоваться для обработки полей после сбора урожая, что способствует лучшему разложению остатков растений и улучшению структуры почвы.

По срокам проведения и назначению существуют следующие виды боронования [156]:

- ранневесенние агротехнические работы. Боронование ранней весной проводится с целью задержки влаги (черный пар или зябь). Для старта работ требуется физическая готовность земли. Зябь и пары проходят обработку зубовой бороной, если определяется достаточная степень увлажнения. К игольчатым боронам прибегают в случае обезвоженности почвы.

- работы с озимыми культурами и многолетними растениями. Метод боронования используется с целью активизации микробиологических процессов. Используются маловесные и средние бороны, а также ротационные цапки.

- предпосевное возделывание. Данный вид боронования выполняется зубowymi боронами. Практикуется его совместное проведение с культивацией. С помощью тяжеловесной дисковой техники в степной зоне на юге страны осуществляется вспашка поверхности грунта перед посадкой озимых. Боронование широко распространено на культивированных участках.

Главный рабочий орган дисковой бороны – это заостренные со всех сторон диски. Они имеют отформовку по сфере. В зависимости от модели их диаметр может отличаться. Современные модели могут иметь диаметр от 450 до 660 мм.

Рабочие органы такой машины не расположены хаотически. Они объединены в группы (батареи). Каждая такая группа прикрепляется к рабочей раме под определенным углом.

Имеются передние и задние батареи. В них разное количество дисков и работают они под разным углом наклона. Такое строение агрегата позволяет ему достигать эффективного выполнения своих функций.

Дисковая борона относится к универсальным сельскохозяйственным агрегатам. Благодаря этому, им можно обрабатывать как влажные, так и сухие типы почв [156].

Несмотря на то, что это устройство универсальное, для отдельных типов почв необходимо подбирать специальные виды борон дискового типа. В связи с этим, сейчас появилось много видов этих устройств. Их можно условно разделить на ряд групп и далее мы их представим.

Главная классификация дисковых борон основана на сфере их применения. По этому принципу выделяют:

- полевые (как правило, легкие агрегаты, в которых диаметр рабочего органа не превышает 500 мм);
- садовые (самые бюджетные борона, которые могут применяться не только на крупных фермерствах, но и на небольших частных земельных участках);
- болотные (в основном используются для осваивания целины, рабочий орган в них по диаметру может доходить до 660 мм).

Классификация дисковых борон в зависимости от конфигурации и площади обрабатываемого поля представлена на рисунке 1.9.

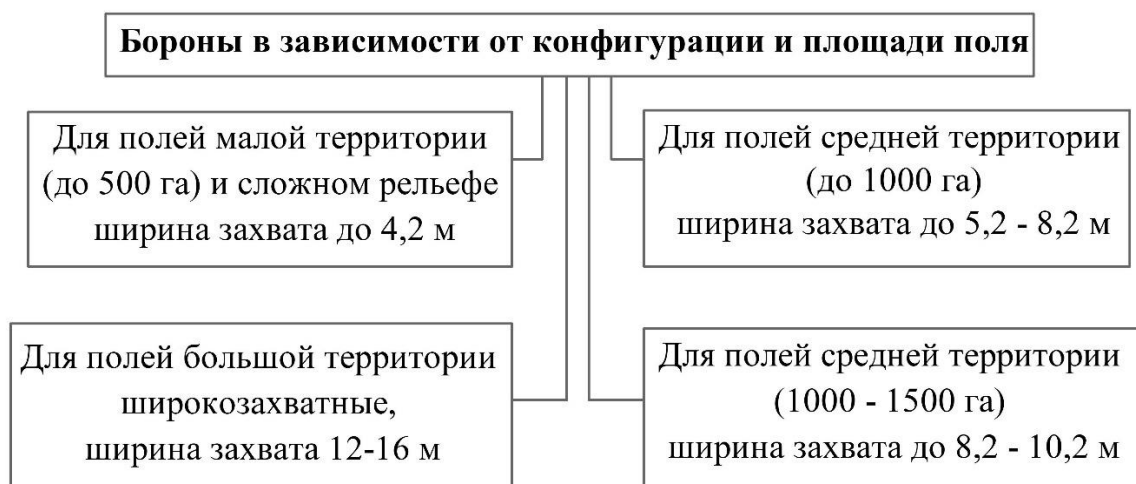


Рисунок 1.9 – Классификация борон в зависимости от конфигурации и площади обрабатываемого поля

Следующая классификация основана на весе агрегата, основными являются:

- легкие бороны (идеально подходят для садовой и полевой обработки почвы);

- тяжелые устройства (лучший выбор, если есть необходимость обрабатывать пересушенную почву или осваивать целину).

В зависимости от веса дисковых борон появляется необходимость в подборе специального трактора, который будет работать в тандеме с агрегатом. Для легких борон может подойти практически любой вид трактора, но, если речь идет про тяжелые агрегаты, то тут без мощного трактора работа осуществляться не сможет.

Эффективное боронование почвы в Амурской области может привести к значительному увеличению урожайности сельскохозяйственных культур. Улучшение структуры почвы и борьба с сорняками позволяют снизить затраты на химические средства защиты растений и удобрения. Это, в свою очередь, повышает экономическую эффективность сельскохозяйственного производства и способствует устойчивому развитию аграрного сектора региона [125].

Таким образом, боронование почвы является неотъемлемой частью агрономической практики в Амурской области. Эта технологическая операция не только улучшает физические и химические свойства почвы, но и способствует повышению урожайности, что делает её важным инструментом в руках сельхозпроизводителей. В условиях изменения климата и необходимости устойчивого развития сельского хозяйства боронование становится ключевым элементом в обеспечении продовольственной безопасности и сохранении природных ресурсов региона.

1.5 Общая характеристика и конструкция дисковых борон

В настоящее время для выполнения процесса боронования применяются различные по конструкции и составу МТА. Это в основном зависит от наличия площадей, энергетических средств, природно-климатических условий и других немаловажных причин. Основные агрегаты, используемые при бороновании, представлены на рисунке 1.10.

Технические характеристики дисковых борон, которые нашли применение в Амурской области по моделям [157,158,159] представлены в таблицах 1.4 - 1.7.

Таблица 1.4 - Бороны дисковые цельнорамные, навесные

Модель	Кол-во дисков, шт	Ширина, м	Мощность трактора, л.с. / кВт	Вес, кг	Произв-ность, га/час
БДМ – 1.8х2 Н	12	1.62	50-60 / 35-45	750	2.19
БДМ – 2.0х2 Н	14	1.88	60-70 / 45-50	850	2.54
БДМ – 2.2х2 Н	16	2.04	70-80 / 50-60	940	2.75
БДМ – 2.4х2 Н	18	2.30	70-90 / 60-65	1093	3.11
БДМ – 3х2 Н	22	3.00	90-120 / 65-90	1265	4.05
БДМ – 4х2 Н	30	3.76	120-150 / 90-110	1680	5.08

Таблица 1.5 - Полуприцепные модульные и цельнорамные

Модель	Кол-во дисков, шт	Ширина, м	Мощность трактора, л.с. / кВт	Вес, кг	Произв-ность, га/час
БДМ – 3х2 П	22	2.82	90-120 / 65-90	2400	3.78
БДМ – 4х2 П	30	3.86	120-160 / 90-120	2910	5.21
БДМ – 5х2 П	38	4.90	150-190 / 110-140	3650	6.62
БДМ – 6х2 П	46	5.94	180-230 / 130-170	4160	8.02

Таблица 1.6 - Полуприцепные, секционные

Модель	Кол-во дисков, шт	Ширина, м	Мощность трактора, л.с. / кВт	Вес, кг	Произв-ность, га/час
БДМ – 6х2 ПК	46	5.94	180-230 / 130-170	4640	8.02
БДМ – 7х2 ПК	54	6.98	220-270 / 160-200	5100	9.42
БДМ – 8х2 ПК	62	8.02	250-310 / 185-230	5655	10.83
БДМ – 9х2 ПК	66	8.55	300-330 / 220-240	5900	11.54

Таблица 1.7 - Полуприцепные типа «Бабочка»

Модель	Кол-во дисков, шт	Ширина, м	Мощность трактора, л.с. / кВт	Вес, кг	Произв-ность, га/час
БДМ – 4х2 Б ПК	30	3.86	120-160 / 90-120	3433	5.21
БДМ – 5х2 Б ПК	38	4.90	150-190 / 110-140	3950	6.62
БДМ – 6х2 Б ПК	46	5.94	180-230 / 130-170	4390	8.02

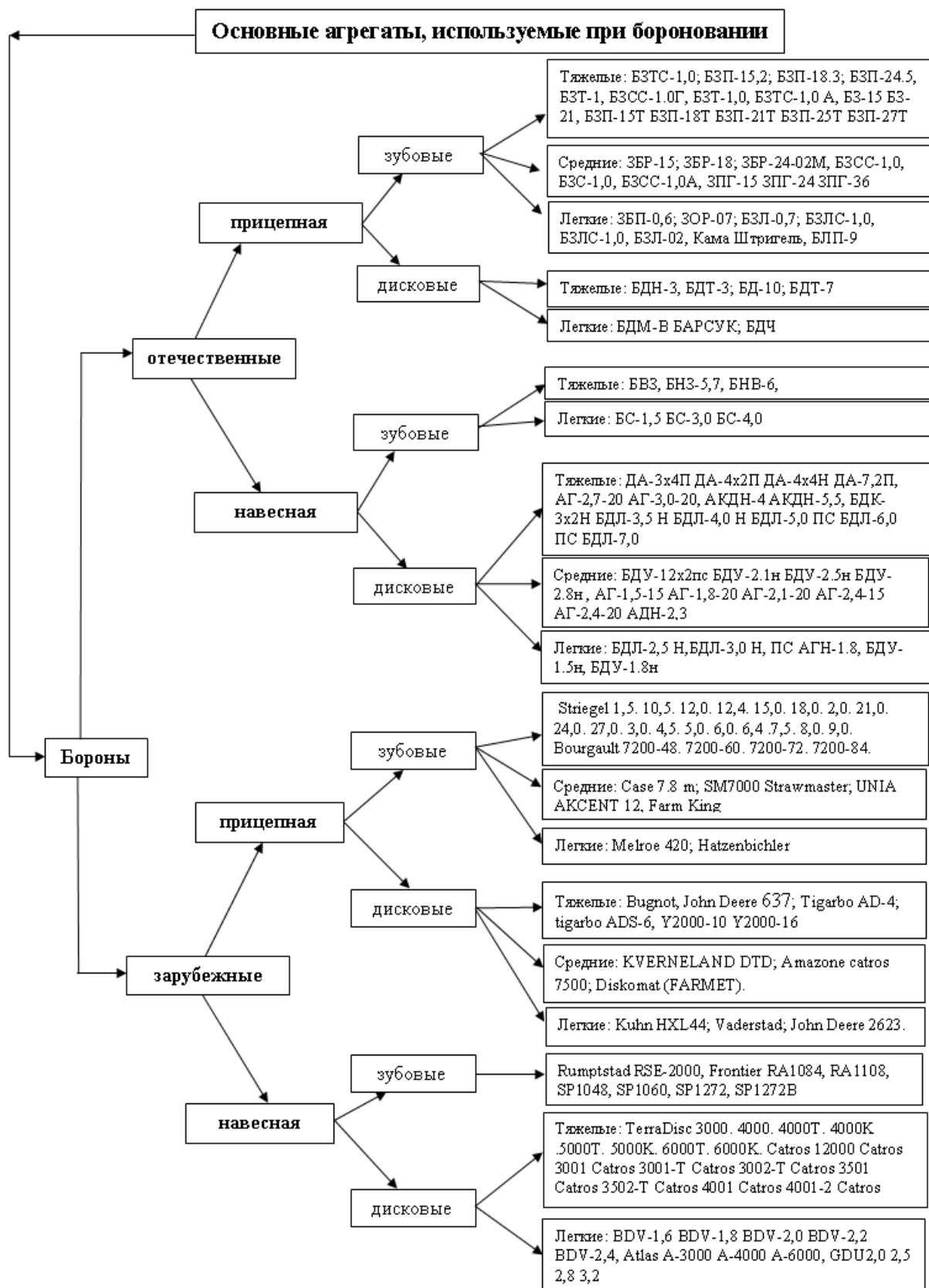


Рисунок 1.10 - Основные агрегаты, используемые при бороновании

1.6 Основные характеристики дискаторов

Дискатор БДМ 2х4Н. Общий вид дискатора БДМ 2х4Н представлен на рисунке 1.11.

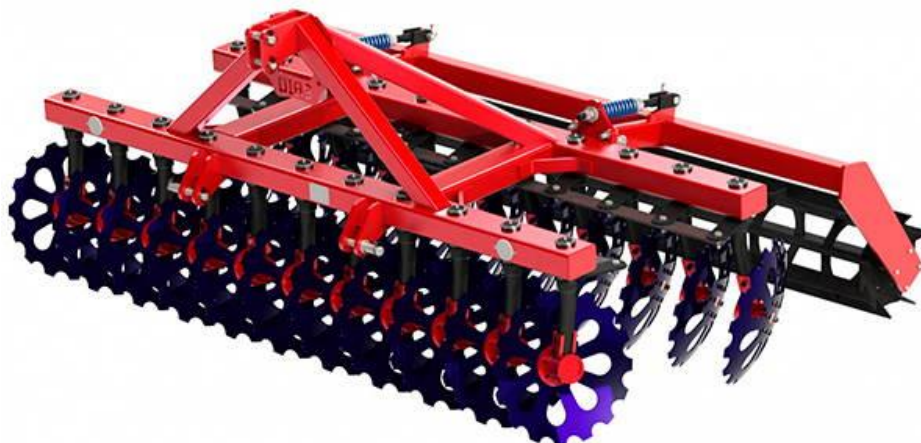


Рисунок 1.11 - БДМ-2,4x2Н ШКПП

Устройство БДМ 2х4 предусматривает размещение дисков в два ряда, которое обеспечивает тщательное рыхление почвы при выполнении подготовительных работ для посевной, а также позволяет легко выполнить подготовительную обработку участка после сбора толстостебельных культур.

Борона предназначена для работы на всех почвах с влажностью почвы не более 28%, уклоном поверхности поля не более 10°, твердостью почвы в обрабатываемом слое не более 3,5 МПа [158, 159].

Дисковая борона БДМ 3х4. Общий вид дисковой бороны представлен на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 - Дисковая борона БДМ - 3х4 ШКС

БДМ 3х4 предназначена для обработки почв на глубину до 120 мм, подготовительную предпосевную обработку почвы, задел и измельчение стерни, подготовку полупара и зяби.

Дискаторы 3х4 относятся к полунавесному оборудованию, особенность этого оборудования предусматривает размещение режущих элементов на индивидуальных стойках в четыре ряда.

При помощи шлейф-катка, входящего в комплект, можно настроить необходимую глубину пахоты, не изменяя угол атаки [159].

Общий вид бороны БДМ 4х4 представлен на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 - Дисковая борона БДМ - 4х4 ШКС

Конструкция БДМ 4х4 была разработана для культивирования почвы на оптимальную глубину – 150 мм, что позволяет выполнять качественные предпосевные подготовительные работы, удаление сорных трав и задел жнивья.

Уникальное расположение дисковых режущих элементов - каждый на собственной оси, облегчает обработку влажных почв и препятствует забиванию комьями влажной земли, корнями и сорняками [159].

Борона дисковая БДМ-6х4. Общий вид дисковой бороны БДМ 6Х4 представлен на рисунке 1.14.

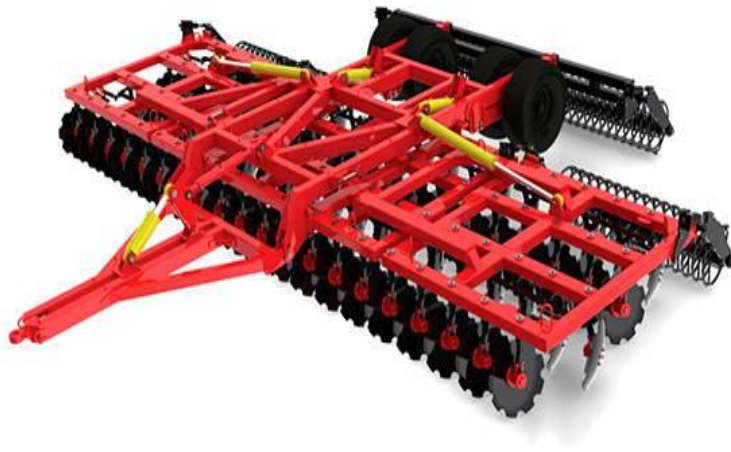


Рисунок 1.14 - Дисковая борона БДМ - 6х4 ШКС

Этот тип предназначен для обработки поверхностного слоя с максимальной глубиной 12 см. Делая боковой разрез почвы, ряд подрезает сорняки, измельчает пожнивные остатки. Перемешивая слой, диски заделывают остатки пожнивья или полупара в почву.

Особенно она удобна в период обработки перед посевом.

Четырехрядный обрабатывающий инструмент может применяться в любых климатических поясах с любыми типами почв. Основное преимущество – наличие большого числа дисков [157].

Дисковая борона БДМ-6х3. Общий вид дисковой бороны БДМ6х3 представлен на рисунке 1.15.

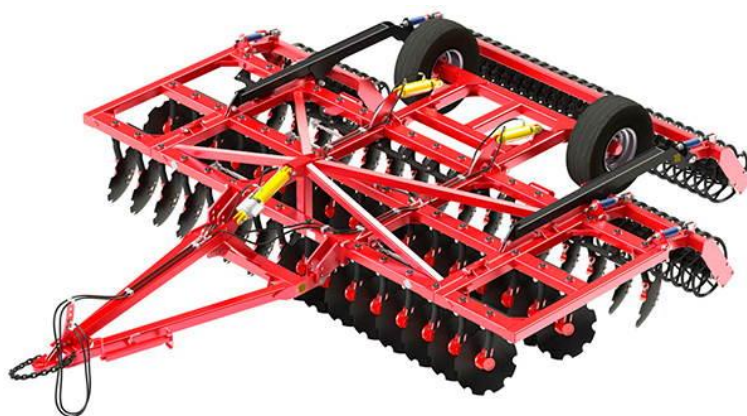


Рисунок 1.15 - Дисковая борона БДМ-6х3 ПШК

Дискатор БДМ-6х3 – это устройство с тремя рядами. Конструктивно такая борона не отличается от четырехрядной системы, но расстояние между рядами увеличивается.

Дискатор имеет такие же индивидуальные стойки для каждого рабочего органа с возможностью изменения угла атаки. Глубина обработки почвы увеличена до 17 см. Это позволяет повысить качество обработки почвы с высокой ветровой или водной эрозией. Заделанные в почву остатки пожнивья или полупара более активно преобразуются в перегной [100].

Дисковая борона БДТ – 7.0. Общий вид дисковой бороны БДМ -7 представлен на рисунке 1.16.



Рисунок 1.16 - Борона БДТ-7.0

Борона агрегатируется с тракторами класса 5. Борона БДТ-7.0 состоит из следующих сборочных единиц: рамы центральной с прикрепленными к ней дисковыми батареями, а также боковых рам, оси транспортных колес, подшипниковых узлов и гидросистемы. Для транспортирования бороны на далекие расстояния предусмотрены растяжки [158].

Борона прицепная БП-6. Общий вид бороны прицепной БП-6 представлен на рисунке 1.17.



Рисунок 1.17 - Борона прицепная БП-6

Увеличены возможности регулирования угла атаки от 15 до 30°. Конструкция подшипникового узла и более вертикальное положение диска уменьшает упор бороны, способствует лучшему подрезанию растительных остатков, в следствии чего уменьшает расход топлива и увеличивает производительность. Изгиб стойки с цельного круга высококачественной стали равномерно распределяет нагрузку на подшипниковый узел, таким образом, увеличивает работу узла в несколько раз [159].

1.7 Известные аналитические разработки по обработке почвы дисковыми рабочими органами

Проблеме обработки почвы и повышения эффективности использования почвообрабатывающих машин и механизмов посвящены многие труды. Среди них работы авторов Апажева А.К. [33], Аушева М.Х. [35], Горячкина В.П. [62], Желиговского В.А. [80], Багманова Р.С. [37], Беляева А.Н. [41], Валиева А.Р. [54], Голубева В.В. [61], Демко А.Н. [67], Егорова А.С. [79], Кузнецова Е.Е. [94], Макеевой Ю.Н. [108], Мезниковой М.В. [110], Нестяк В.С. [116,117] и других.

Исследованиям в области совершенствования поверхностной обработки почвы дисковыми рабочими органами посвящены работы многих российских ученых: Редкокашин А.А. [127], Никитин В. В. [119], Мякотина О. М. [113], Сергунцов А.С. [129], Ожерельев В. Н. [121], Слепенков А.Е. [132,134], Кобяков И.Д. [89], Горячкин В.П. [62], Кузнецов Е.Е. [94,95], Поликутина Е.С. [126], Леонов В.В. [97,98], Третьяков А. И. [128], Шевкун В. А. [146], и других авторов.

В работе А.А. Редкокашина [127] предложены новые технические решения для сельскохозяйственных орудий, используемых для поверхностной обработки почвы, оснащённые дисковыми рабочими органами, конструктивные решения которых защищены патентами для условий Приморского края. Научная новизна работы заключается в полученной математической модели кинематического обоснования движения рабочих органов, определении тягового сопротивления дискового орудия, оптимизации конструктивно-технологических параметров предлагаемой бороны с дисковыми рабочими органами, установленными по принципу «качающаяся шайба», позволяющими реализовать рассматриваемые агротехнологические режимы для повышения качества обработанного поверхностного слоя почвы. В Результате исследований (рисунок 1.18) были предложены математическая зависимости абсолютной скорости диска и общего тяговое усилие, необходимое для движения дисковой бороны

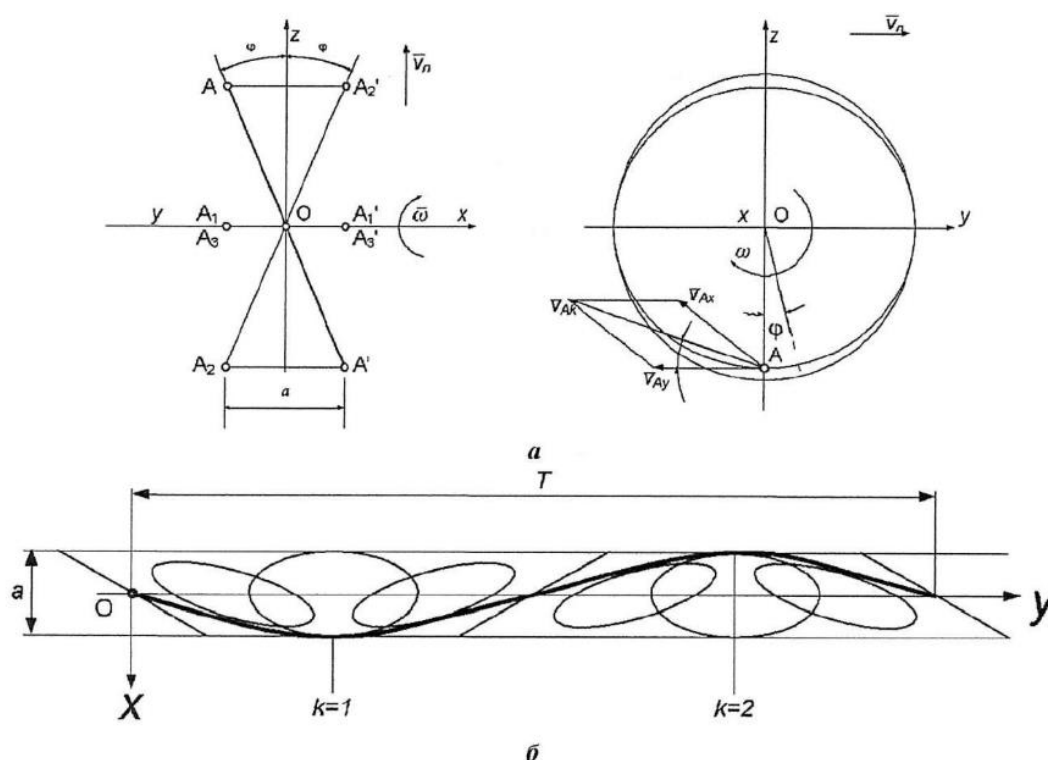


Рисунок 1.18 – Кинематика (а) и траектория (б) дискового рабочего органа

Абсолютная скорость диска будет определяться соответственно:

$$v_a = \sqrt{(v_{ax})^2 + (v_{ay})^2 + (v_n)^2} \quad (1.1)$$

где v_{ax} - скорость движения диска в режиме гармонических колебаний, м/с;

v_{ay} - скорость вращения диска вокруг оси, м/с;

v_n - поступательная (линейная) скорость точек окружности диска, м/с.

Общее тяговое усилие, необходимое для движения дисковой бороны будет определяться

$$P_\partial = (P_\partial^3 + P_\partial^6) \cdot N_\partial, \quad (1.2)$$

где P_∂^3 – сила сопротивления почвы в фазе заглубления диска, Н;

P_∂^6 – сила сопротивления почвы в фазе выглубления диска, Н;

N_∂ – количество дисков в одном ряду батареи.

В.В. Никитин в своей работе [119] исследовал вопрос решения чрезмерного поперечного отброса пласта почвы сферическим диском в специфических условиях междурядий ягодных кустарников путем применения различных способов ограничения дальности отброса почвенного пласта. Представлены фазы движения пласта почвы по рабочей поверхности сферического диска (рисунок 1.19)

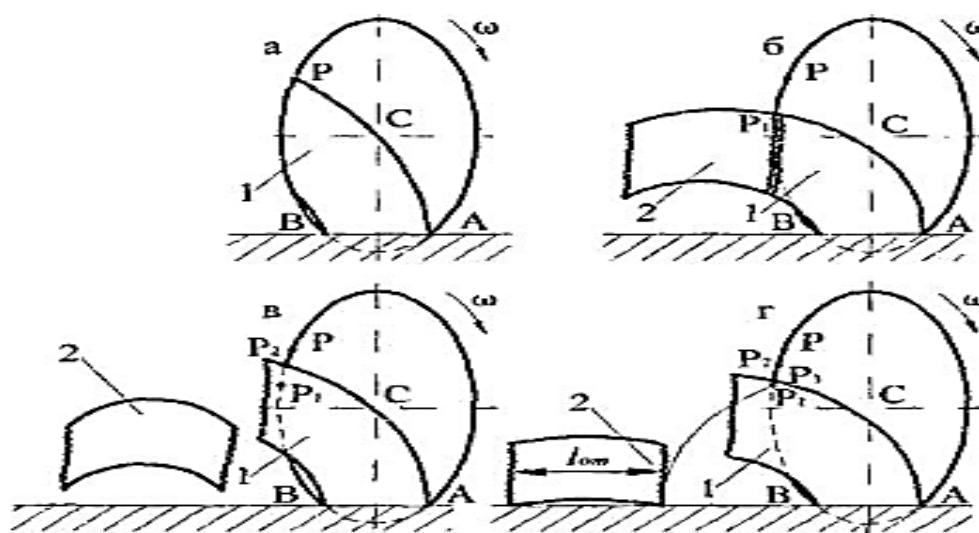


Рисунок 1.19 – Фазы движения пласта почвы по рабочей поверхности
сферического диска

1 – контактирующая с диском часть пласта; 2 – часть пласта, выходящая за
пределы диска

В работе получена зависимость дальности отброса пласта сферическим диском от скорости его движения и влажности почвы, сформулирован алгоритм управления ограничением дальности поперечного отброса пласта почвы, позволяющий определить местоположение отражающего щитка на диске и установлена степень значимости сил инерции в разрушении почвенного пласта рабочей поверхностью сферического диска [119].

Дальность отброса почвенного пласта в поперечном направлении складывается из следующих составляющих: длины его отделившейся части, дальности отброса поверхности разреза основного пласта и его консольной части, с учетом угла доворота отделившейся части совершающей свободное падение в плоскости XOY. То есть

$$\Delta Y = l_{от} \cdot \sin(\beta' + \Delta\varphi) + Y \quad (1.3)$$

где $l_{от}$ – длина отделившейся части пласта, м;

β' – угол схода почвенного пласта с рабочей поверхности сферического диска по отношению к направляющей движения орудия, градус;

Y – дальность отброса отделившейся части пласта почвы в поперечном направлении, м.

В работе И.В. Соболевского [135] рассмотрен системный подход на основе бионики к обоснованию элементов конструкции рабочих органов гибко-ударной ротационной бороны. Это позволяет улучшить процесс создания прерывистых борозд в форме лунок, повысить водопроницаемость верхнего обработанного слоя почвы и его сопротивляемость порывам ветра.

В результате проведенных исследований в работе [135] автор предлагает при определении силы сопротивления почвы сдвигу учитывать нормальную силу:

$$N = (qh + V^2 p_{\text{пп}}) S \sin \theta \quad (1.4)$$

где q – коэффициент удельного тягового сопротивления почвы,

h – глубина обработки, м;

V – скорость движения агрегата, м/с;

p – коэффициент удельного смятия почвы, Н/м³;

S – площадь заглубленного сегмента рабочего органа, м²;

θ – угол атаки, град.

О.М. Мякотина в своей работе [113] установила зависимость гребнистости семенного ложа и энергоемкости предпосевной обработки почвы в зависимости от параметров дисковых рабочих органов. В работе приведены результаты ее многофакторных экспериментов по определению качественных показателей предпосевной обработки почвы при односледной и двухследной работе дисковых рабочих органов. На основании полученных данных в рамках исследования разработана конструктивная схема комбинированного дискового орудия, обеспечивающего высокое качество и снижение затрат энергии, труда и средств на предпосевной обработке почвы (рисунок 1.20).

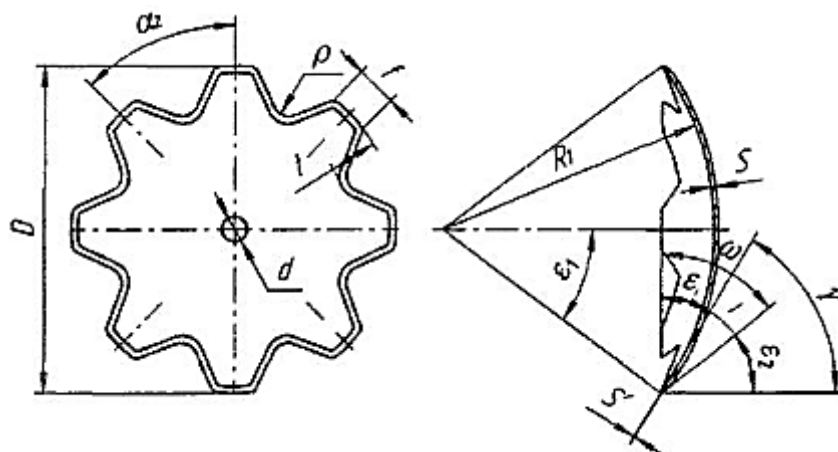


Рисунок 1.20 – Геометрические параметры сферического диска

На рисунке 1.20 представлены следующие обозначения:

- α_z – угол между зубьями (выступами диска);
- t – глубина выреза (впадины);
- ρ – радиус сопряжения кромок выреза (впадины);
- f – длина дуги зуба (выступа);
- передний угол $\varepsilon_1 = \arcsin (D/2R_1)$;
- угол наклона образующей $\omega = i + \varepsilon_1$;
- затылочный угол $\varepsilon_2 = 90 - (i + \varepsilon_1)$;
- угол резания $\gamma = i + \varepsilon_2$;
- угол между зубьями (выступами) $\alpha_z = 360^\circ/z$, где z число зубьев (выступов на диске).

Высота гребней на дне борозды равна

$$h = \frac{\cos \beta}{2} (D - \sqrt{D^2 - l^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \alpha}) \quad (1.5)$$

где D – диаметр диска, м;

l – расстояния между дисками в батарее, м;

α и β – углы установки диска.

Выражение показывает (1.5), что высота гребней на дне борозды h зависит от следующих параметров: диаметр диска D , расстояния между дисками в батарее l , углов установки диска α и β . Увеличение диаметра диска приводит к снижению гребнистости дна борозды. Расстояние между дисками приводит к увеличению

высоты гребней. Увеличение угла α способствует двух-трёхкратному уменьшению высоты гребней [113].

В работе [131] отмечается, что после схода снежного покрова на поверхности поля образуется почвенная корка. Которая работает по принципу насоса перекачивая воду с нижних почвенных горизонтов к верхним. Для устранения это негативное явление необходимо своевременно разрушать образовавшиеся капилляры.

На основании проведенных исследований авторами [131] была установлена зависимость между глубиной обработки почвы и диаметром диска бороны батарейного типа

$$D = k \cdot h \quad (1.6)$$

где k - коэффициент, учитывающий склонность к забиванию междискового пространства почвой и пожнивными остатками, $k=4\dots6$;

h – глубина обработки, м.

Процесс взаимодействия рабочих органов с почвой рассмотрен в работе А.С. Союнова и Е.В. Демчук [137]. На основании проведенных исследований получена аналитическая зависимость устанавливающая зависимость силы сопротивления дискового почвообрабатывающего агрегата от объёма вырезанного пласта

$$P_{01B} = W_{BH}(h, H) + W_{BO}(H) \quad (1.7)$$

где $W_{BH}(h, H)$ – вертикальная сила на дисковом ноже;

$W_{BO}(H)$ – вертикальная сила на сферической поверхности диска.

В работе [141] установлено, что для обеспечения качества работы дисковых борон на рабочих органах необходимо сделать ассиметричные вырезы, которые обеспечат процесс резание почвенного горизонта со скольжением.

В работе Е.В. Воронкина, Ю.А. Быковского [58] приведены результаты исследований по определению влияния предпосевного боронования (бороны БЗСС-1) на структурный состав, влажность и твёрдость почвы в условиях Алтайского края. Выявили, что боронование обеспечивает максимальную влажность почвы, что важно в засушливые периоды.

Пегова Н. А. в своей работе [125] разработала ресурсосберегающие системы обработки дерново-подзолистой почвы, где боронование выступает как элемент минимизации обработок.

В работе А.В. Байбакова [38] предлагается определять силу сопротивления трению рабочего органа о почву по следующему выражению:

$$F_{\text{тр}} = \mu(F_n + F_c) = \mu F_n + kS \quad (1.8)$$

где μ – коэффициента трения;

F_n – нормальная сила давления прилипшего слоя почвы на рабочую площадь, Н;

F_c – силы агдезии слоя прилипшей почвы, Н;

k – коэффициента сцепления;

S – площадь контакта, м².

В работе [118] предлагается качество обработки почвы МТА определять по следующей зависимости

$$K = \int_{0.25}^{10} N x d d_{\text{по}} \rightarrow 1 \quad (1.9)$$

где N – количество почвенных отдельностей (агрегатов) оптимального размера в единице массы почвы;

x – коэффициент, обусловленный формой, плотностью оптимальных почвенных отдельностей, плотностью укладки оптимальной почвенной отдельности и связывающий ее средний размер, и массу;

$d_{\text{по}}$ – средний размер почвенной отдельности.

В работах В.В. Леонова [97,98,99] установлено, что использование МТА состоящего из трактора с шарнирно-сочленённой и бороной БДТ-7 с установленным устройством корректор-распределитель сцепного веса при бороновании позволяет перераспределить вертикальную нагрузку как между трактором и бороной, так и между мостами колёсного энергетического средства, что дает возможность как регулировать глубину заглубления рабочих органов бороны так и повысить тягово-сцепные характеристики трактора.

В работе [130] установлена зависимость между радиусом кривизны дискового рабочего органа и его диаметром

$$R = \frac{D}{2 \sin \varphi} \quad (1.10)$$

где φ – половина угла при вершине сектора;

D – диаметр диска, м.

Для повышения эффективности работы машинно-тракторного агрегата состоящего из колёсного трактора класса 1,4 и дисковой бороны БДТ-3 автор [132,133,134] при подготовке почвы под посев предложил устройство позволяющее регулировать нагрузку на опорные поверхности за счёт её перераспределения внутри МТА.

А.А. Цыбань, Г.И. Орехов, В.А. Маковский [143] разработали и испытали пропашную борону БПРЗ-1,2 для обработки посевов сои. Показали, что использование такой бороны в засушливый период существенно повышает урожайность.

А.С. Сергунцов в своей работе [129] представил конструктивно-технологическую схему многофункционального агрегата (МФА) для поверхностной обработки почвы, позволяющего проводить боронование посевов озимой пшеницы с одновременной подкормкой. Разработана математическая модель работы МФА позволяющая определить скорость его движения при бороновании посевов озимой пшеницы с одновременной подкормкой. Обоснованы параметры и режим работы предлагаемого МФА позволяющего проводить боронование посевов озимой пшеницы с одновременной подкормкой.

В работе авторов В.Н. Ожерельева, В.В. Никитина, А.М. Гринь [121] дан ретроспективный анализ изменения подходов к классификации и конструкции дисковых почвообрабатывающих орудий. Отмечено широкое применение мульчировщиков и дискаторов, которые технологически могут быть идентифицированы в качестве аналогов дискового луцильника и дисковой бороны, но с точки зрения конструктивного исполнения имеют существенные отличия. Их диски скомпонованы в поперечные ряды, для мульчировщика характерны два, а для дискатора – четыре ряда, при этом каждый диск смонтирован на индивидуальной ступице, что препятствует забиванию дисков почвой и

исключении наматывания на них сорняков. Проведено сравнение основных параметров традиционной дисковой бороны и дискатора такой же ширины захвата. Отмечено, что увеличение давления на диск обеспечивает дискатору большую величину заглубления рабочих органов, но при этом цена дискатора в 2-3 раза превышает цену дисковой бороны батарейного типа сопоставимой ширины захвата. Представлено решение проблемы поперечного выноса почвы в кусты и прикустовую зону. Предложено увеличить боковой вынос задней батареи и снабдить крайний правый диск передней батареи отбойным щитком, установленным под оптимальными углами в плане и в поперечном сечении. Модернизированная дисковая борона использовалась в крестьянском хозяйстве для обработки междурядий малины и смородины площадью 5 га в течение десяти лет. Благодаря ее работе удавалось поддерживать выровненным поперечный профиль поверхности междурядий и не допускать появления характерных для использования серийных дисковых борон почвенных валов вдоль основания кустов. Это способствовало созданию агрофона, приемлемого для эффективного использования ягодоуборочных комбайнов [121].

Анализ конструкций дисковых почвообрабатывающих орудий показал, что ряд технических решений заключался в том, что были изменены элементы конструкций рам борон, другие решения были направлены на изменение конструкции элементов подвески рабочих органов. Оба эти направления изменений помимо улучшения качества обработки почвы всё же больше решали вопрос организации обработки почвы и улучшения эксплуатационных свойств орудий, так как среди преимуществ этих решений были такие как улучшение обслуживания или появление возможностей изменять геометрические параметры в зависимости от некоторых свойств почвы. И лишь небольшая часть из всех решений была направлена на создание рабочих органов с другим, беспрецедентным качественным воздействием на почву, позволяющим максимально эффективно обрабатывать почву с лучшими качественными показателями.

1.8 Выводы по главе

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Амурская область обладает уникальным набором природных ресурсов и особенными климатическими условиями. На территории области выделены следующие виды почв: бурые лесные, подзолисто бурые лесные, аллювиальные луговые, лугово-бурые, лугово-черноземные, болотные, в поймах рек - пойменные. В поймах рек почвы пойменные, пойменно-луговые.

2. На 2025 год в Амурской области наблюдается значительный рост численности и средств машинно-тракторного парка. Основными составляющими парка являются тракторы, комбайны, почвообрабатывающее и кормозаготовительное оборудование. В последние годы область активно инвестировала в обновление техники, что позволило значительно повысить производительность и эффективность сельскохозяйственных работ. Причиной необходимого обновления машинно-тракторного парка является тот факт, что с превышением сроков амортизации работает 66% тракторов и 22% зерноуборочных комбайнов, которые требуют ежегодного ремонта.

4. Урожайность сельскохозяйственных культур во многом зависит от качества обработки почвы перед посевом, при этом необходимо обеспечить выровненную поверхность поля, уничтожение сорной растительности, сохранение почвенной влаги, создание оптимальной плотности и структурного состава посевного слоя почвы.

5. На основании проведенного анализа установлено, что с целью улучшения качества подготовки почвы к посеву, используемые дисковые бороны требуют модернизации за счёт оптимизации нагрузки на ведущие колеса трактора и рабочий орган бороны (диск). Требуемые решения должны решать главный вопрос - создание рабочих органов с более качественным воздействием на почву, позволяющим максимально эффективно обрабатывать почву с лучшими качественными показателями.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ БОРОНОВАЛЬНОГО АГРЕГАТА

2.1 Методологическое обоснование необходимости адаптации бороновального агрегата к естественно-производственным условиям региона

Агротехническая подготовка почвы в основном содержит в себе следующие виды работ: рыхление поверхностного плодородного слоя, борьбу с сорняками, аэрацию, дробление крупных фракций, создание оптимальной плотности. В связи с вышесказанным, основной целью такой подготовки почвы является адаптация почвообрабатывающих агрегатов под естественно–климатические особенности региона с учётом физико–механических свойств почвы и соблюдением агротехнологических требований к возделываемой культуре. При этом, на качество выполнения работы, как показали исследования, влияют конструктивно–технологические параметры почвообрабатывающего орудия (бороны). Особенно это влияние сказывается на тяжёлых почвах, обладающих большой твёрдостью, что в конечном итоге увеличивает энергоёмкость проведения данного процесса.

Рассмотрим более подробно, какие агротехнические показатели (рисунок 2.1) определяют качество работы дисковых борон [126]:

- соблюдение агротехнологических требований (сроков обработки);
- сохранность стерни от предыдущей культуры;
- выдерживание глубины обработки по всему участку поля;
- качество обработки стыковых проходов (перекрытие смежных проходов);
- соблюдение прямолинейности движения бороновального агрегата;
- качество обработки поворотных полос (соблюдение глубины обработки поворотных полос – заглубление и подъём);
- обеспечение основных критериев качества обработанной площади (глубина рыхления, комковатость, выравненность обработанной поверхности).



Рисунок 2.1 - Агротехнические показатели качества работы дисковых борон

Как показывает анализ агротехнических показателей работы дисковых борон (рисунок 2.1), одним из главных критериев качества выполнения работ являются глубина обработки, степень крошения почвы и выравненность (гребнистость) поверхности почвы [73].

В зависимости от функциональных требований использования машинно-тракторных агрегатов применяются различные критерии при оценке их эффективности. Одним из таких критериев является сила тяги на крюке энергетического средства, необходимая для буксирования различных орудий и механизмов при выполнении ими определённых сельскохозяйственных операций. В общем случае её можно характеризовать отношением избыточной силы тяги на крюке к весу машины, мощностью на крюке и эффективностью использования тягового усилия, что в конечном итоге влияет на производительность машинно-тракторных агрегатов (МТА) (рисунок 2.2) [74].

Анализируя факторы, определяющие влияние на производительность МТА можно отметить, что повысить её возможно за счёт двух основных:

- повышением тягового усилия на крюке энергетического средства;
- снижением силы сопротивления сельскохозяйственной машины.

Повысить тяговое усилие на крюке энергетического средства возможно следующим образом [71]:

- увеличением нагрузки, приходящейся на ведущие двигатели энергетического средства;
- использование силы сопротивления сельскохозяйственной машины на увеличение тягового усилия.

Увеличение тягового усилия путём частичного использования силы сопротивления создаваемой прицепной машиной, за счёт установки дополнительного устройства, является чрезвычайно актуальным, так как в конечном итоге способствует повышению производительности МТА.

Для обеспечения работы любого МТА должно выполняться условие

$$F_{\text{из}} > P_{\text{кр}} - P_{\text{с}} \quad (2.1)$$

где $F_{\text{из}}$ – избыточная сила тяги на крюке, Н;

$P_{\text{кр}}$ – тяговое усилие на крюке, Н;

$P_{\text{с}}$ – результирующая сила сопротивления, создаваемая с.х машиной, Н.

Тяговое усилие, развиваемое энергетическим средством на крюке, при сцеплении с почвой можно определить по выражению [8]

$$P_{\text{кр}} = \varphi G_{\text{сц}} - P_f \quad (2.2)$$

где φ – коэффициент использования сцепного веса;

$G_{\text{сц}}$ – сцепной вес, Н;

P_f – сила сопротивления движению, Н.

Исходя из выражения (2.2) уравнение (2.1) примет вид

$$F_{\text{из}} > \varphi G_{\text{сц}} - P_f - P_{\text{с}} \quad (2.3)$$

Анализируя выражение (2.3) можно отметить, что избыточная сила тяги обеспечивающая движение МТА во многом определяется реализацией сцепного веса, приходящегося на ведущие двигатели энергетического средства.

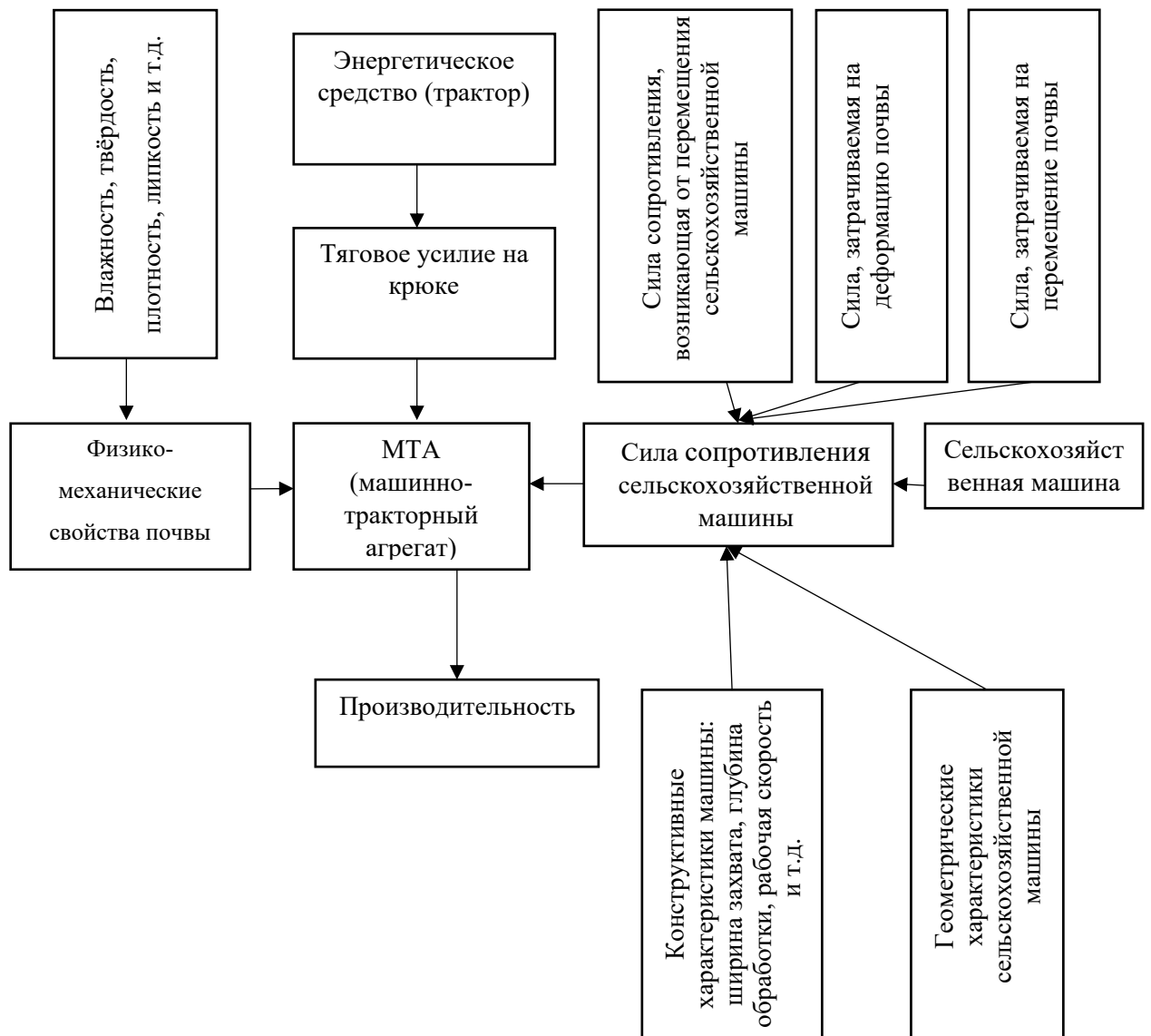


Рисунок 2.2 – Основные факторы, определяющие производительность (эффективность) работы МТА

С целью повышения сцепного веса, приходящегося на ведущие колёса, было разработано устройство, позволяющее частично увеличивать сцепной вес на задние колёса трактора.

2.2 Повышение эффективности использования дисковых борон на предпосевной подготовке почвы

Исследования показывают, что правильный выбор скорости работы и глубины обработки существенно влияет на эффективность в зависимости от типа почвы. Математическое моделирование, позволяет предсказывать результаты работы борон в различных условиях.

Современные требования к долговечности и надежности сельскохозяйственной техники обуславливают необходимость использования новых материалов. В этом контексте стоит отметить работы профессора Грядунова С.С., который в своем исследовании «Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон» (2021) предложил использование наплавочных материалов, что позволило увеличить срок службы рабочих органов.

Анализ работ авторов [14,17,95,96,148] позволил предложить обоснованное решение обозначенной задачи, применением новых технических решений:

- «Догрузочно-распределяющее устройство для прицепной рамной дисковой бороны» - патент РФ на изобретение № 2812473 [16] (рисунок 2.3);
- «Распределяюще-догружающее устройство для прицепной рамной бороны»- Патент РФ на изобретение № 2821900 [15] (рисунок 2.4);
- «Корректор-распределитель силовой нагрузки в бороновальном агрегате»- патент на полезную модель № 244122 [18] (рисунок 2.5).

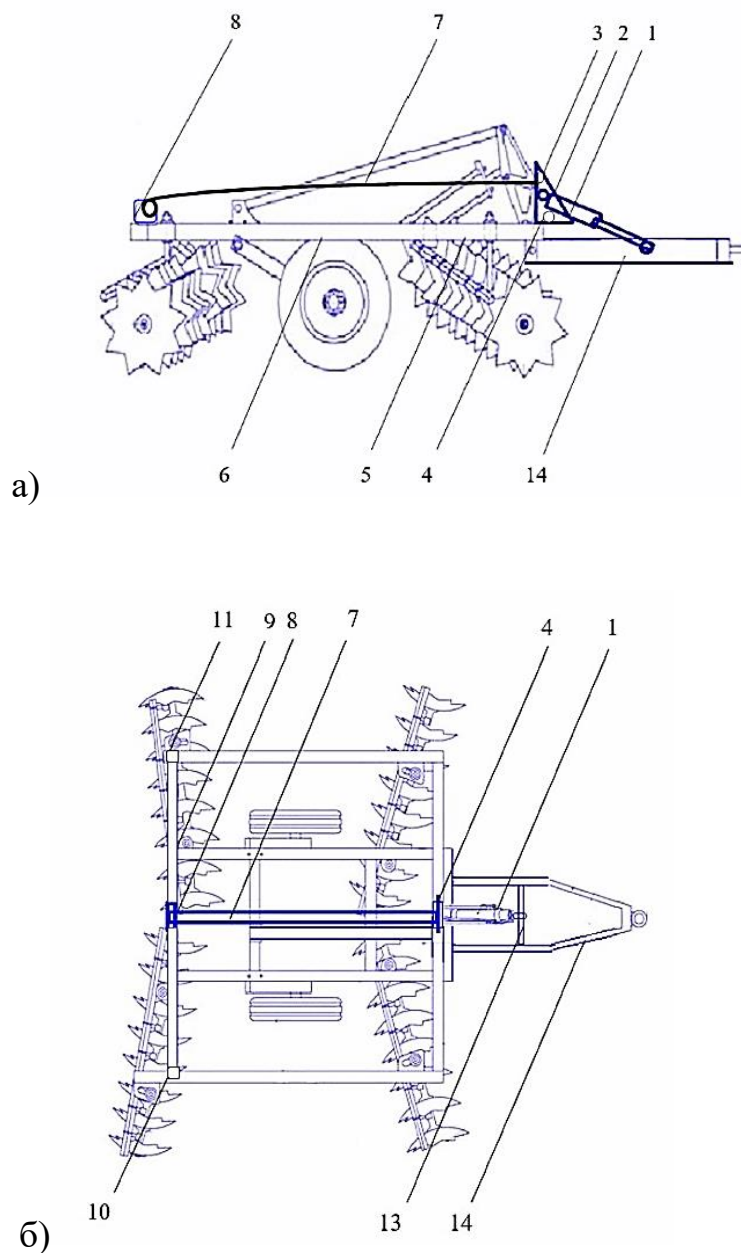


Рисунок 2.3 – Догрузочно-распределяющее устройство для прицепной рамной дисковой бороны (патент РФ на изобретение № 2812473)

а - профильный вид; б - вид сверху; 1 - силовой гидроцилиндр; 2 – уголкового кронштейн; 3,4 – шарнирная опора; 5 – рама бороны; 6 – борона; 7 – передающая тяга; 8 – нагрузочный шарнирный кронштейн; 9 – распределяющая тяга; 10, 11 – нагрузочные кронштейны; 13 - стержневая пружина, 14 - сница

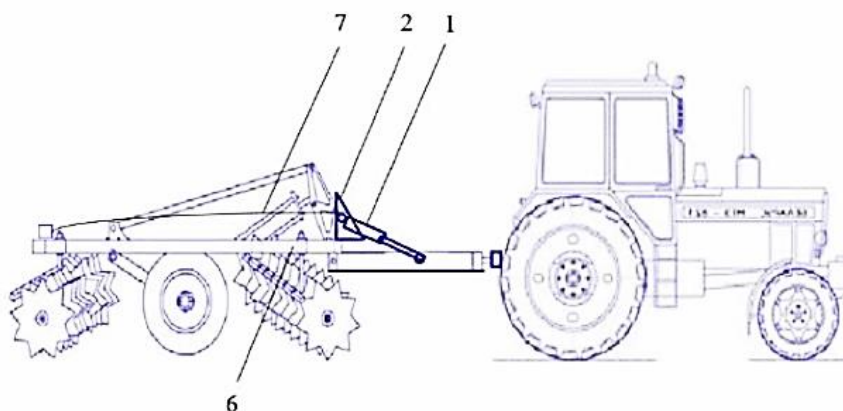


Рисунок 2.4 – Распределяюще-догружающее устройство для прицепной рамной бороны (патент РФ на изобретение № 2821900)

1 - силовой гидроцилиндр; 2 – уголкового кронштейн; 6 – бороны; 7 – передающая тяга

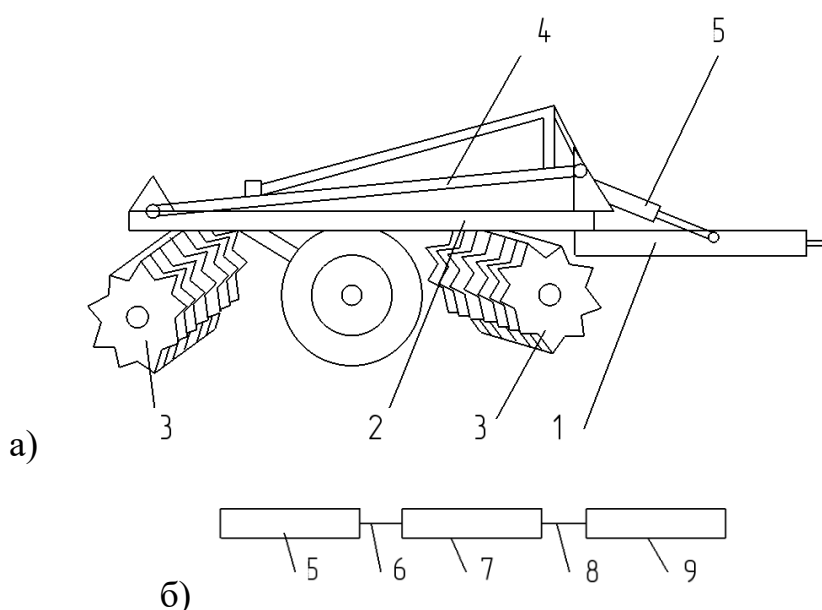


Рисунок 2.5 – Корректор-распределитель силовой нагрузки в бороновальном агрегате

а - профильный вид бороны с корректор-распределителем силовой нагрузки в бороновальном агрегате; б - принципиальная схема автоматического корректирования силовой нагрузки на рабочие органы дисковой бороны;
1 - сница; 2 - рама бороны; 3 - рабочие органы (диски); 4 - корректор сцепного веса; 5 - гидроцилиндр; 6 - гидравлический шланг; 7 - электромагнитный клапан;
8 - соединительные провода; 9 - программируемый логический контроллер

Принципиальным отличием патентов на изобретения №2812473 и №2821900 являются способы закрепления передающей тяги в нагрузочном кронштейне и, как следствие, различный принцип действия передачи нагрузок внутри бороновального агрегата, что напрямую влияет на воздействие на тягово-сцепные свойства буксирующего энергетического средства.

Использование предложенных технических решений позволит повысить эффективность обработки почвы, уменьшить энергетические затраты при бороновании почвы, улучшить качество предпосевной обработки прицепной рамной дисковой бороны, повысить урожайность возделываемых сельскохозяйственных культур за счёт оптимизации глубины обработки почвы. Более подробно общее устройство и принцип работы описано в работах [16].

Проведённый анализ и рассмотрение теоретических конструктивно-эксплуатационных признаков позволяет сделать вывод о перспективности и обоснованности внедрения предлагаемых устройств, для чего необходимо проведение теоретических исследований, позволяющих оценить эффективность их использования. При проведении исследований использованы работы авторов [14,17,95,96,99,148].

Таким образом, целью предлагаемой работы являются теоретические исследования силовых реакций и устойчивости движения системы при выравнивании вертикальной нагрузки тяжёлой рамной дисковой бороны в условиях внешнего догружения.

Для адекватного теоретического обоснования используем методологию, которую применяют в машиностроении для сравнения упругих элементов в виде рессоры и трубы. [85,120]. Она позволит показать при каких условиях труба может теоретически заменить рессору.

Для полуэллиптической листовой рессоры (упрощённая модель, шарнирные опоры по концам): жесткость рессоры определяем по формуле 2.4 [124,144]

$$k_{\text{рес}} = \frac{8nbh^3E}{3L^3} \quad (2.4)$$

где n – число листов;

b – ширина листа, м;

h – толщина листа, м;

L – эффективная длина, м;

E – модуль юнга, Н/м² (Па).

В связи с тем, что рессора имеет прогрессивную характеристику жёсткости и её жёсткость изменяется под воздействием внешних факторов на рабочие органы бороны (воздействие очаговых зон).

Труба, установленная вместо рессоры, работает как балка на изгиб. Для шарнирно опертой балки с центральной нагрузкой жёсткость трубы может быть определена по следующей аналитической зависимости [52]

$$k_{\text{труб}} = \frac{48EI}{L^3} \quad (2.5)$$

где I – момент инерции полого круглого сечения, Н/м².

Коэффициент «48» в числителе указывает на специфические граничные условия или схему закрепления элемента (балка с жёстким защемлением на обоих концах; определённая схема нагружения (распределённой или сосредоточенной нагрузке; трубчатая конструкция с учётом её геометрии).

Момент инерции полого круглого сечения [124,144]

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (2.6)$$

где D – наружный диаметр трубы, м;

d – внутренний диаметр трубы, м.

Для того, чтобы труба повторяла статическую жёсткость рессоры, должно выполняться следующее условие

$$k_{\text{рес}} = k_{\text{труб}}. \quad (2.7)$$

Решив совместно уравнения 2.4 и 2.5 относительно момента инерции с учетом выражения 2.7 получим

$$I = \frac{1}{18} nbh^3 \quad (2.8)$$

Или

$$\frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{1}{18} nbh^3 \quad (2.9)$$

Или

$$(D^4 - d^4) = \frac{32}{9} nbh^3 \pi \quad (2.10)$$

Полученное выражение (2.10) позволяет определить параметры (геометрические размеры) трубы, которые позволят выдержать усталостные нагрузки при той же жёсткости.

2.3 Определение нагрузок, приходящихся на опорные основания бороновального агрегата

При определении нагрузок, приходящихся на опорные основания бороновального агрегата, рассмотрим три положения предлагаемого корректора-распределителя силовой нагрузки:

- при неработающем корректоре-распределителе силовой нагрузки;
- при работе корректора-распределителя силовой нагрузки в режиме загрузки энергетического средства;
- при работе корректора-распределителя силовой нагрузки в режиме разгрузки энергетического средства.

В целях определения взаимодействующих элементов конструкции при не работающем устройстве (корректоре-распределителе силовой нагрузки), вертикальных нагрузок и силовых параметров устройства в системе МТА предлагается рассмотрение равновесия составной конструкции трактор + сница + борона согласно схеме к определению вертикальных реакций поверхности движения без работы корректора-распределителя силовой нагрузки, представленной на рисунке 2.6 [16], в режиме неработающего корректора-распределителя силовой нагрузки.

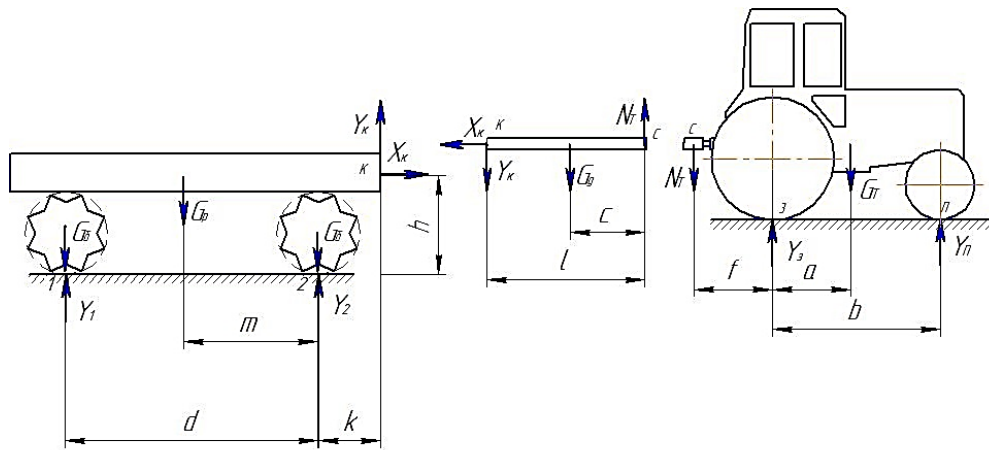


Рисунок 2.6 - Схема к определению вертикальных реакций поверхности без работы корректора-распределителя силовой нагрузки

На рисунке 2.6 указаны следующие обозначения:

- Y_{Π} – вертикальная составляющая реакции поверхности под передней опорой трактора, Н;
- Y_3 – вертикальная составляющая реакции поверхности под задней опорой трактора, Н;
- G_T – вес трактора, Н;
- G_g – вес сноры борона, Н;
- G_p – вес рамы борона, Н;
- G_6 – вес секции борона (одинаков для обеих секций борона), Н;
- Y_2 – вертикальная составляющая реакции поверхности под передней секцией борона, Н;
- Y_1 – вертикальная составляющая реакции поверхности под задней секцией борона, Н;
- N_T – силовая реакция сноры в буксирном устройстве трактора, Н;
- $б$ – продольная база трактора, Н;
- a – расстояние от вертикальной проекции центра масс трактора до центра пятна контакта заднего ведущего колеса, м;
- c – точка сцепления сноры и трактора в буксирном устройстве;

- f – расстояние от вертикальной проекции точки «с» - в точке сцепления сани и трактора в буксирном устройстве до центра пятна контакта заднего ведущего колеса, м;

- C – расстояние от вертикальной проекции точки «с» - в точке сцепления сани и трактора в буксирном устройстве до вертикальной проекции центра масс бороны, м;

- Y_k – вертикальная силовая реакция в шарнире углового кронштейна, Н;

- X_k – горизонтальная силовая реакция в шарнире углового кронштейна, Н;

- m – расстояние от точки приложения вертикальной составляющей поверхности под передней секцией бороны до проекции центра масс бороны, h - высота крепления углового кронштейна, м;

- K – точка установки шарнира в угловом кронштейне;

- k – расстояние от точки установки шарнира в угловом кронштейне до вертикальной составляющей реакции поверхности передней секцией бороны, м;

- d – продольная база бороны, м;

- 1 и 2 – точки в центре пятна контакта задней и передней секций бороны.

В связи с небольшой массой, весом конструкции корректора-распределителя силовой нагрузки пренебрегаем.

Составим уравнения равновесия для каждой части системы в отдельности и решим системы уравнений [16]:

Для составной части МТА – трактор:

$$\sum F_{ky} = 0; Y_3 + Y_{\Pi} - G_T - N_T = 0. \quad (2.11)$$

$$\sum M_{\Pi}(F_k) = 0; -Y_3 \cdot b + G_T(b - a) + N_T(b + f) = 0. \quad (2.12)$$

$$\sum M_3(F_k) = 0; Y_{\Pi} \cdot b - G_T a + N_T \cdot f = 0. \quad (2.13)$$

Для составной части системы – сани

$$\text{При } \sum F_{kx} = 0; X_k = 0 \quad (2.14)$$

$$\sum M_k(F_k) = 0; N_T l - G_T(l - c) = 0 \quad (2.15)$$

$$\sum M_c(F_k) = 0; G_g \cdot c + Y_k \cdot l = 0 \quad (2.16)$$

Составная часть – борона

$$\sum F_{ky} = 0; Y_1 + Y_2 - 2G_6 - G_p + Y_k = 0 \quad (2.17)$$

$$\sum M_1(F_k) = 0; -G_p(d - m) - G_6 \cdot d + Y_2 d + Y_k(k + d) - X_k \cdot h = 0 \quad (2.18)$$

$$\sum M_2(F_k) = 0; -Y_1 d + G_6 \cdot d + G_p \cdot m + Y_k \cdot k - X_k \cdot h = 0 \quad (2.19)$$

$$\text{Из (2.14)} \quad X_k = 0 \quad (2.20)$$

$$\text{Из (2.15)} \quad N_T = \frac{G_g(l-c)}{l} = G_g \left(1 - \frac{c}{l}\right) \quad (2.21)$$

$$\text{Из (2.16)} \quad Y_k = -\frac{G_g c}{l} \quad (2.22)$$

$$\text{Из (2.12)} \quad Y_3 = \frac{G_T(b-a)}{b} + \frac{N_T(b+f)}{b}$$

Откуда с учетом (2.21):

$$Y_3 = G_T \left(1 - \frac{a}{b}\right) + G_g \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right) \quad (2.23)$$

Из (2.13)

$$Y_{II} = \frac{G_T \cdot a}{b} - N_T \cdot f$$

И с учетом (2.21)

$$Y_{II} = G_T \frac{a}{b} - G_g \cdot f \cdot \left(1 - \frac{c}{l}\right) \quad (2.24)$$

Из (2.18)

$$Y_2 = \frac{G_p(d - m) + G_6 \cdot d - Y_k(k + d) + X_k \cdot h}{d}$$

С учетом формул 2.20, 2.22 уравнения

$$Y_2 = G_6 + G_p \left(1 - \frac{m}{d}\right) + G_g \cdot \frac{c \cdot (k+d)}{l \cdot d} \quad (2.25)$$

Из (2.19)

$$Y_1 = \frac{G_6 \cdot d + G_p \cdot m + Y_1 \cdot k - X_k \cdot h}{d}$$

С учетом уравнений (2.20, 2.22)

$$Y_1 = G_6 + G_p \frac{m}{d} - G_g \frac{c \cdot k}{l \cdot d} \quad (2.26)$$

Таким образом, получены уравнения вертикальных реакций поверхности при неработающем корректоре-распределителе силовой нагрузки в бороновальном агрегате и определены взаимодействующие элементы и силовые реакции.

Рассмотрим равновесие системы МТА при работающем корректоре-распределителе силовой нагрузки. Весом корректора-распределителя силовой нагрузки пренебрегаем [15].

Рассмотрим схему равновесия составной конструкции: трактор + сница + борона + корректор-распределитель силовой нагрузки (рисунок 2.7).

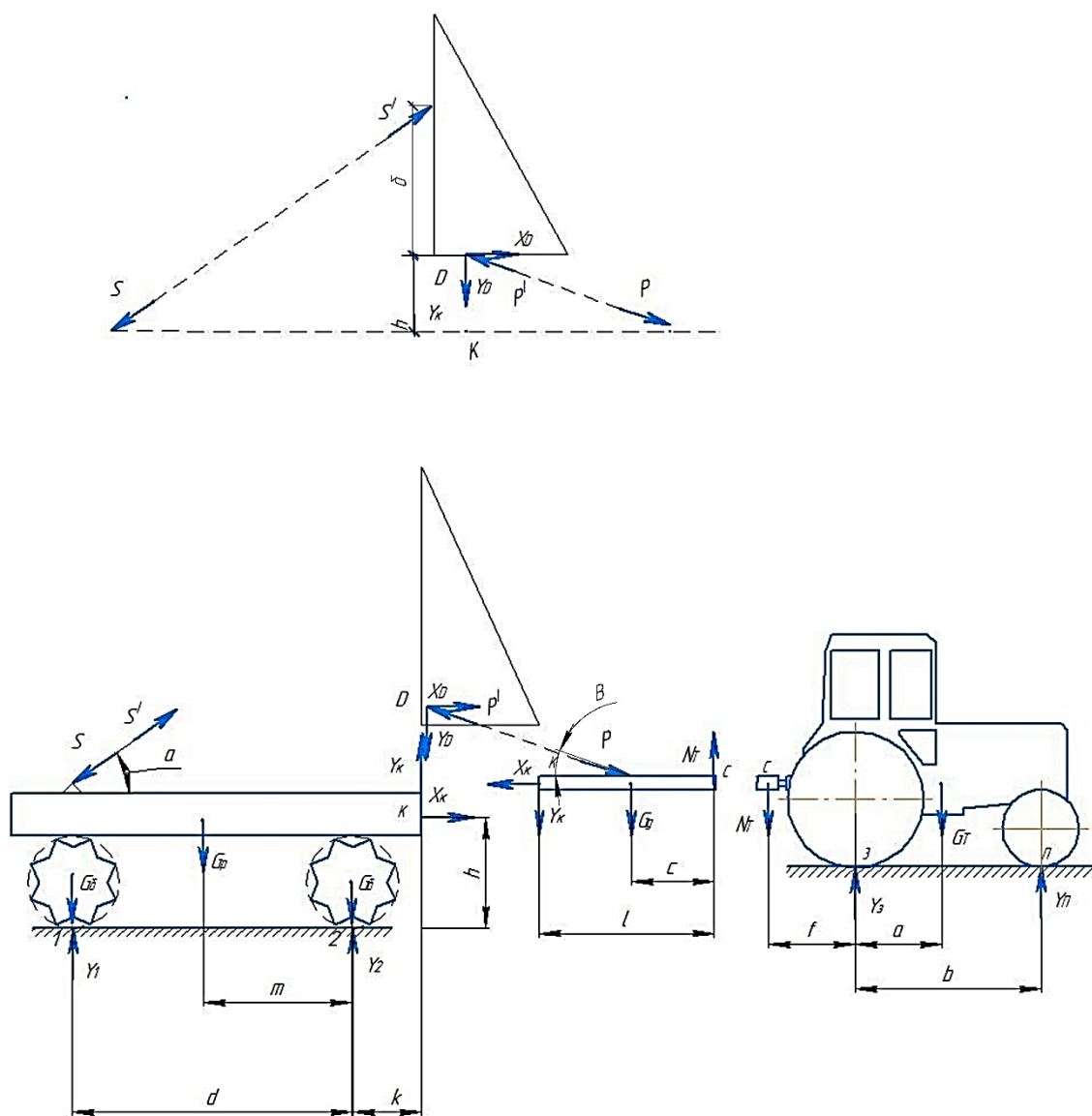


Рисунок 2.7 - Схема к определению вертикальных реакций поверхности при работе корректора-распределителя силовой нагрузки

На рисунке 2.7 указаны следующие обозначения:

- Y'_Π – вертикальная составляющая реакции поверхности под передней опорой трактора, Н;
- Y'_3 – вертикальная составляющая реакции поверхности под задней опорой трактора, Н;
- G_T – вес трактора, Н;
- G_g – вес сннца бороны, Н;
- G_p – вес рамы бороны, Н;
- G_6 – вес секции бороны (одинаков для обеих секций бороны), Н;
- Y'_2 – вертикальная составляющая реакции поверхности под передней секцией бороны, Н;
- Y'_1 – вертикальная составляющая реакции поверхности под задней секцией бороны, Н;
- $P = P'$ – усилие гидроцилиндра при выдвижении, Н;
- S – усилие в выравнивающей тяге, Н;
- X_d, Y_d – горизонтальная и вертикальная реакция в шарнире углового кронштейна, Н.

По расчетной схеме на рисунке 2.7 составим уравнения равновесия для каждой части составной конструкции в отдельности и решим системы уравнений относительно неизвестных реакций.

Для составной части системы – трактор [15]:

$$\sum M_\Pi(F_k) = 0; -Y'_3 \cdot b + G_T(b - a) + N'_T(b + f) = 0 \quad (2.27)$$

$$\sum M_3(F_k) = 0; Y'_\Pi \cdot b - G_T \cdot a + N'_T \cdot f = 0 \quad (2.28)$$

Для составной части – сннца:

$$\sum F_{kx} = 0; P \cos \beta - X'_k = 0. \quad (2.29)$$

$$\sum M_k(F_k) = 0; N'_T l - G_g(l - c) - P \sin \beta \cdot (l - c) = 0. \quad (2.30)$$

$$\sum M_c(F_k) = 0; -Y'_k l + G_g \cdot c + P \sin \beta \cdot c = 0. \quad (2.31)$$

Для составной части – бороны:

$$\sum F_{kx} = 0; x'_k - x_d - S \cos \alpha = 0. \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_1(F_k) = 0; S \cos \alpha (h + n) - G_p(d - m) - G_6 d + Y'_2 d - Y'_k(d + k) - X'_k \cdot \\ h + X_d(h + n) + Y_d(d + k) = 0. \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_2(F_k) = 0; S \cos \alpha (h + n) + S \sin \alpha \cdot d + G_p m + G_b d - Y'_1 \cdot d - Y'_k k - \\ X'_k h - Y_d \cdot k + X_d(h + n) = 0. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Составная часть – корректор-распределитель силовой нагрузки:

$$\Sigma F_{kx} = 0; X_d + S \cos \alpha - P \cos \beta = 0. \quad (2.35)$$

$$\Sigma F_{ky} = 0; -Y_d + S \sin \alpha + P \sin \beta = 0. \quad (2.36)$$

$$\Sigma M_d(F_k) = 0; P \cos \beta \cdot \delta - S \cos \alpha (\delta + r) = 0. \quad (2.37)$$

Из (2.37)

$$S = \frac{P \cos \beta \cdot \delta}{\cos \alpha (\delta + r)} \quad (2.38)$$

Из (2.35)

$$X_d = P \cos \alpha - S \cos \alpha = P \cos \alpha - \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha (\delta + r)} \quad (2.39)$$

Или после преобразований:

$$X_d = P \cos \beta \left(1 - \frac{\delta}{\delta + r} \right)$$

Из (2.36)

$$Y_d = S \sin \alpha + P \sin \beta = \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha (\delta + r)} + P \sin \beta$$

$$Y_d = P \left(\frac{\cos \beta \cdot \delta \cdot \tan \alpha}{\delta + r} + \sin \beta \right) \quad (2.40)$$

Из (2.29)

$$X'_k = P \cos \beta \quad (2.41)$$

Из (2.30)

$$N'_T = \frac{G_g(l - c) + P \sin \beta (l - c)}{l}$$

$$N'_T = G_g \left(1 - \frac{c}{l} \right) + P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l} \right) \quad (2.42)$$

Из (2.31)

$$Y'_k = \frac{G_g \cdot c + P \sin \beta c}{l}$$

$$Y'_k = G_g \frac{c}{l} + P \sin \beta \frac{c}{l} \quad (2.43)$$

Из (2.27)

$$Y'_3 = \frac{G_T(b - a) + N'_T(b + f)}{b}$$

С учетом уравнения (2.42) получаем:

$$Y'_3 = G_T \left(1 - \frac{a}{b} \right) + G_g \left(1 - \frac{c}{l} \right) \left(1 + \frac{f}{b} \right) + P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l} \right) \left(1 + \frac{f}{b} \right) \quad (2.44)$$

Из (2.28)
$$Y'_\Pi = G_\tau \frac{a}{b} - N'_\tau \frac{f}{b}$$

С учетом уравнения (2.42):

$$Y'_\Pi = G_\tau \frac{a}{b} - G_g \left(1 - \frac{c}{l}\right) \frac{f}{b} - P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \cdot \frac{f}{b} \quad (2.45)$$

Исходя из формулы (2.33) расчет значения Y'_2 принимает вид:

$$Y'_2 = \frac{-S \cos \alpha (h+n) + G_p (d-m) + G_6 d + Y'_k (d+k) + X'_k h - X_d (h+n) - Y_d (d+k)}{d}$$

С учетом выражений (2.38), (2.39), (2.40), (2.41), (2.43) получаем уравнения вертикальных реакций для секций бороны:

$$Y'_2 = G_6 + G_p \left(1 - \frac{m}{d}\right) - \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \cos \alpha (h+n)}{\cos \alpha (\delta+r) \cdot d} + G_g \frac{c(d+k)}{l \cdot d} + P \sin \beta \frac{c}{l} \left(1 + \frac{k}{d}\right) + P \cos \beta \frac{h}{d} - P \cos \beta \left(1 - \frac{\delta}{\delta+r}\right) \frac{h+n}{d} - P \left(\frac{\cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\delta+r} + \sin \beta\right) \left(1 + \frac{k}{d}\right)$$

Или

$$Y'_2 = G_6 + G_p \left(1 - \frac{m}{d}\right) + G_g \frac{c}{l} \left(1 + \frac{k}{d}\right) - \frac{P \cos \beta \delta}{\delta \cdot r} \cdot \left(\frac{h+n}{d}\right) + P \sin \beta \frac{c}{l} \left(1 + \frac{k}{d}\right) + P \cos \beta \frac{h}{d} - P \cos \beta \frac{h+n}{d} + P \cos \beta \frac{\delta}{\delta+r} \cdot \left(\frac{h+n}{d}\right) - P \frac{\cos \beta \operatorname{tg} \alpha}{\delta+r} \cdot \left(1 + \frac{k}{d}\right) - P \sin \beta \left(1 + \frac{k}{d}\right)$$

С учетом преобразований:

$$Y'_2 = G_6 + G_p \left(1 - \frac{m}{d}\right) + G_g \frac{c}{l} \left(1 + \frac{k}{d}\right) - P \sin \beta \left(1 + \frac{k}{d}\right) \cdot \left(1 - \frac{c}{l}\right) - P \cos \beta \frac{m}{d} - \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(\delta+r)} \left(1 + \frac{k}{d}\right) \quad (2.46)$$

Из (2.34)

$$Y'_1 = \frac{S \cos \alpha (h+n) + S \sin \alpha d + G_p m + G_6 d - Y'_k \cdot k - X'_k h + Y_d k + X_d (h+n)}{d}$$

С учетом (2.38), (2.39), (2.40), (2.41), (2.43):

$$Y'_1 = G_6 + G_p \frac{m}{d} + \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \cos \alpha (h+n)}{\cos \alpha (\delta+r) d} + \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha (\delta+r)} - G_g \frac{c \cdot k}{l \cdot d} - P \sin \beta \cdot \frac{c}{l} \cdot \frac{k}{d} - P \cos \beta \frac{l}{d} + P \left(\frac{\cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\delta+r} + \sin \beta\right) \cdot \frac{k}{d} + P \cos \beta \cdot \left(\frac{h+n}{d}\right) - P \cos \beta \left(\frac{\delta}{\delta+r}\right) \cdot \left(\frac{h+n}{d}\right)$$

$$Y'_1 = G_6 + G_p \frac{m}{d} - G_g \frac{c \cdot k}{l \cdot d} + \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\delta+r} \cdot \left(1 + \frac{k}{d}\right) + P \sin \beta \frac{k}{d} \left(1 - \frac{c}{l}\right) + P \cos \beta \frac{n}{d} \quad (2.47)$$

Анализ уравнений позволяет сделать выводы о том, что при выходе штока гидроцилиндра корректора-распределителя силовой нагрузки происходят следующие перераспределения нагрузок внутри МТА:

1. Из формул (2.23) и (2.44) - задний мост трактора загружается на величину $P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})$;

2. Из формул (2.24) и (2.45) – передний мост трактора разгружается на величину $P \sin \beta (1 - \frac{c}{l}) \cdot \frac{f}{b}$;

3. Из формул (2.25) и (2.46) - передняя секция бороны разгружается на величину $P \sin \beta (1 + \frac{k}{d}) \cdot (1 - \frac{c}{l}) - P \cos \beta \frac{m}{d} - \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(\delta + r)} (1 + \frac{k}{d})$.

4. Из формул (2.26) и (2.47) - задняя секция бороны загружается на величину $\frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\delta + r} \cdot (1 + \frac{k}{d}) + P \sin \beta \frac{k}{d} (1 - \frac{c}{l}) + P \cos \beta \frac{n}{d}$.

Полученные зависимости показывают, что при втягивании штока гидроцилиндра корректора в режиме разгрузки энергетического средства разгружается сцепное устройство и задние ведущие колёса трактора (уравнение 2.14 и 2.34) на величину $P \cdot \sin \beta \cdot a \cdot l$, разгружаются задние секции бороны (уравнение 2.17 и 2.39) на величину $P \cdot (\sin \beta \cdot d \cdot b \cdot a \cdot l - \cos \beta \cdot h \cdot b)$, загружаются передние секции бороны на $P \cdot (\sin \beta \cdot (1 + d \cdot b) \cdot a \cdot l + \cos \beta \cdot b)$.

В общем случае, проведённый математический анализ позволяет сделать вывод о том, что машинно-тракторный агрегат, с установленным корректором-распределителем силовой нагрузки в бороновальном агрегате получает возможность перераспределить нагрузку в составе МТА, тем самым позволяет расширить функциональные возможности и эксплуатационно-технологические характеристики трактора класса 1,4-2, при применении его в хозяйствах сельскохозяйственного направления в ходе проведения полевых работ.

2.4 Влияние использование предлагаемого технического решения на производительность бороновального агрегата

В предыдущих разделах была теоретически обоснована нагрузка, приходящаяся на задние ведущие колёса энергетического средства (трактора) с колёсной формулой 4К4 марки МТЗ:

- без использования предлагаемого устройства:

$$Y_3 = G_T \left(1 - \frac{a}{b}\right) + G_g \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right). \quad (2.48)$$

- при работе предлагаемого устройства:

$$Y'_3 = G_T \left(1 - \frac{a}{b}\right) + G_g \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right) + P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right). \quad (2.49)$$

При этом как показал анализ полученных зависимостей (2.48) и (2.49) при использовании предлагаемого устройства произошло увеличение нагрузки на задние ведущие колёса трактора

$$Y'_3 = Y_3 + P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right). \quad (2.50)$$

Ранее проведенные исследования [145,148,149] показали, что увеличение нагрузки (сцепной вес), приходящейся на ведущие движители энергетического средства, позволяет повысить производительность машинно-тракторного агрегата. Тогда с учётом выше сказанного, производительность машинно-тракторного агрегата можно представить следующими зависимостями:

- для серийного бороновального машинно-тракторного агрегата (без установленного устройства)

$$W_c = 0,36B_p \cdot V_T \cdot \left(1 - \frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y_3}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y_3}\right)^3}\right) \quad (2.51)$$

- для экспериментального бороновального машинно-тракторного агрегата (с установленным устройством)

$$W_3 = 0,36B_p \cdot V_T \cdot \left(1 - \frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y'_3}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y'_3}\right)^3}\right) \quad (2.52)$$

Или

$$W_3 = 0,36B_p \cdot V_T \cdot \left(1 - \frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})} \right)^3} \right) \quad (2.53)$$

С учётом полученных выражений (2.51) и (2.53) увеличение производительности экспериментального бороновального машинно-тракторного агрегата можно представить следующем выражением:

$$\begin{aligned} \Delta W_3 = W_3 - W_c = 0,36B_p \cdot V_T \cdot \left(1 - \frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})} \right)^3} \right) - 0,36B_p \cdot V_T \cdot \\ \cdot \left(1 - \frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y_3}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y_3} \right)^3} \right) = 0,36B_p \cdot V_T \cdot \left(\frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y_3}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y_3} \right)^3} - \frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})} \right)^3} \right) \quad (2.54) \end{aligned}$$

или

$$\Delta W_3 = 0,043B_p \cdot V_T \cdot \left(\frac{\frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})}}{\left(\frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{c}{l})(1 + \frac{f}{b})} \right)^3} - \frac{\frac{P_{кр}}{Y_3}}{\left(\frac{P_{кр}}{Y_3} \right)^3} \right) \quad (2.55)$$

Анализ уравнения 2.55 позволяет выявить ключевые параметры, в наибольшей степени определяющие рост производительности экспериментального машинно-тракторного агрегата (МТА). Полученные результаты дают научно обоснованную базу для целенаправленного управления рабочими режимами агрегата и оптимизации его эксплуатационных характеристик.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Задачи экспериментальных исследований

Работоспособность любого технического решения кроме теоретического обоснования требует экспериментальной проверки в реальных условиях эксплуатации на базе предприятий АПК. В связи с этим, с целью подтверждения ранее полученных теоретических предпосылок были сформулированы задачи экспериментальных исследований:

1. Проверить влияние корректора-распределителя силовой нагрузки в реальных условиях эксплуатации на распределение силовой нагрузки на опорные поверхности энергетического средства (трактора);
2. Определить влияние корректора-распределителя на распределение силовой нагрузки на рабочие органы почвообрабатывающего агрегата БДТ-3 в реальных условиях эксплуатации;
3. Выявить влияние бороновального машинно-тракторного агрегата с корректором-распределителем силовой нагрузки на агротехнологические показатели бороновального агрегата;
4. Провести сравнительные хозяйственные испытания экспериментального МТА;
5. Дать топливно-энергетическую оценку почвообрабатывающего бороновального агрегата с установленным корректором-распределителем силовой нагрузки.

3.2 Общая методика проведения экспериментальных исследований

При обосновании общей методики проведения экспериментальных исследований учитывались требования ГОСТов:

- ГОСТ 12.2.002-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности [1];
- ГОСТ 33687-2015 Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний [13];
- ГОСТ 20915-2011. Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний [2];
- ГОСТ 23730-88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки универсальных машин и технологических комплексов [3];
- ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90) Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей [4];
- ГОСТ 30746-2001 Тракторы сельскохозяйственные. Определение мощности и грузоподъёмности гидравлической навесной системы [5];
- ГОСТ 30750-2001 Тракторы сельскохозяйственные. Определение положения центра тяжести [6];
- ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний [7];
- ГОСТ Р 54784-2011 Испытания сельскохозяйственной техники. Методы оценки технических параметров [8];
- ГОСТ 26244-84 Обработка почвы предпосевная. Требования к качеству и методы определения [9];
- ГОСТ 30746-2001 (ИСО-789-2-93) Тракторы сельскохозяйственные. Определение мощности и грузоподъёмности гидравлической навесной системы [10];
- ГОСТ 26953-86 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву [11];
- ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений [12];

3.3 Объекты и условия проведения экспериментальных исследований

Объектами исследования были выбраны:

1. Борона БДТ - 3 серийная (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 - Серийная борона БДТ-3

2. Борона БДТ – 3 экспериментальная (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 - Экспериментальная борона БДТ-3

3. Экспериментальный почвообрабатывающий бороновальный агрегат (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 - МТА с экспериментальной бороной

Качество подготовки почвы к дальнейшим полевым работам во многом определяется степенью соответствия используемых почвообрабатывающих агрегатов естественно – производственным и природно–климатическим условиям региона. От этого во многом зависит выполнение весенне–полевых работ в отведённые агротехнологические сроки с обязательным соблюдением всех технологических операций и требований. В крестьянско–фермерских хозяйствах Амурской области подготовка почвы осуществляется как правило весной, что предопределило способ её подготовки – безотвальный [73]. Это объясняется рядом преимуществ (рисунок 3.4).

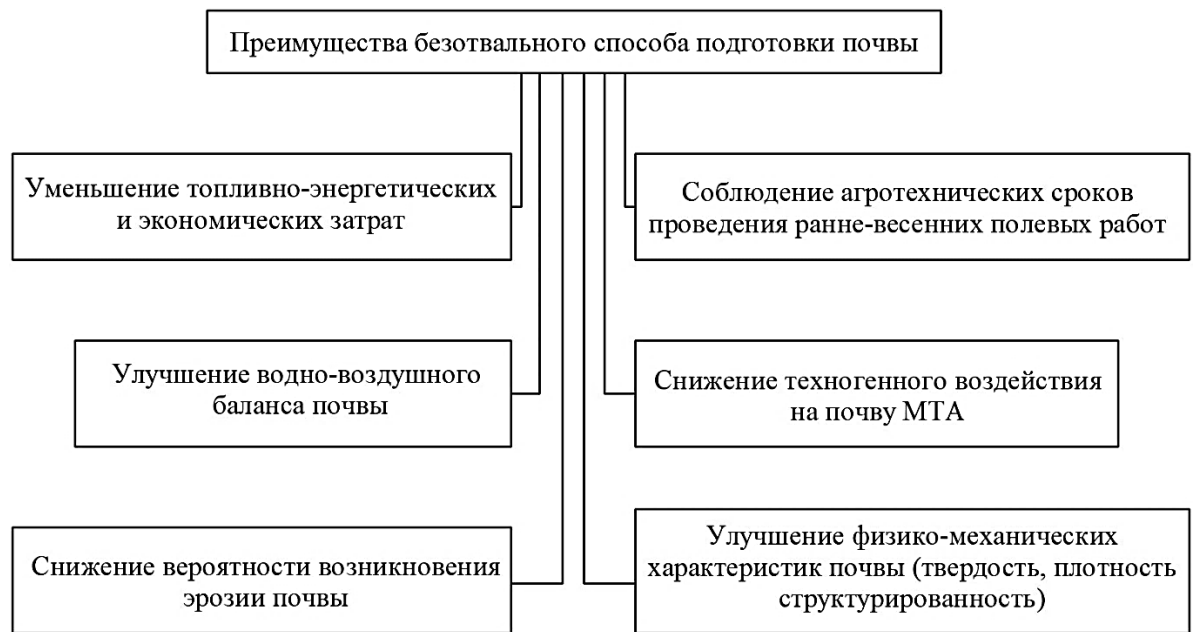


Рисунок 3.4 – Преимущества безотвального способа подготовки почвы

В то же время, в период проведения ранне-весенних полевых работ, связанных с подготовкой почвы почвообрабатывающими машинно-тракторными агрегатами, возникает необходимость адаптации их с учётом региональных природно-климатических особенностей:

- повышение тягово-сцепных возможностей самого энергетического средства за счёт возможности регулирования силового воздействия его движителей на поверхность поля;
- повышение качества подготовки почвы к дальнейшим полевым работам, за счёт возможности регулирования силового воздействия обрабатывающих органов в зависимости от её физико-механических свойств.

Для адаптации почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов состоящих из трактора (класс тяги 1,4) и тяжелой дисковой бороны с шириной захвата 3 м (БДТ-3), предложено устройство выполненное согласно патента на изобретение № 2812473 [16], направленного на решение проблем, связанных с региональными особенностями (рисунок 3.5).

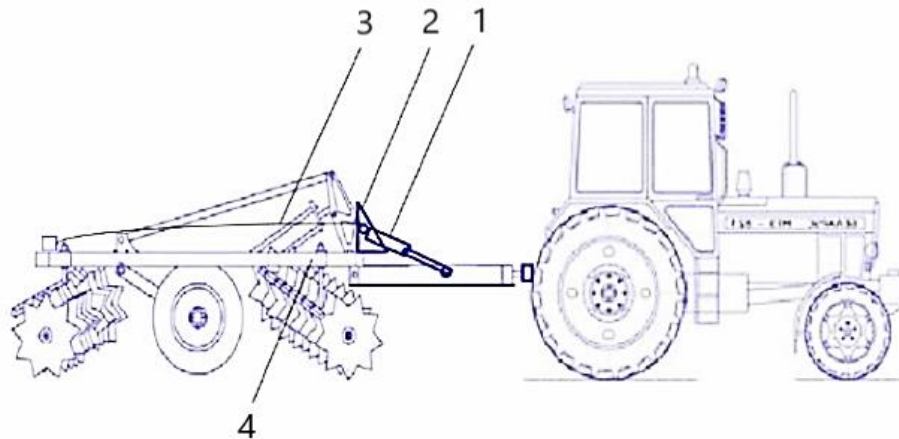


Рисунок 3.5 - Профильный вид МТА с установленным корректора-распределителя силовой нагрузки тяжёлой дисковой бороны

1 – гидроцилиндр; 2 - уголкоый кронштейн; 3 - передающая тяга; 4 - борона

Корректор-распределитель силовой нагрузки работает следующим образом [16]:

- при выдвижении штока гидроцилиндра происходит снижение нагрузки на рабочий орган бороны и увеличение сцепного веса трактора за счёт перераспределения части нагрузки с самой бороны;

- при втягивании штока гидроцилиндра сцепной вес с трактора передается на рабочие органы бороны тем самым увеличивая нагрузку.

Регулирование нагрузки позволяет решить следующие задачи:

- адаптировать энергетическое средство к несущей способности почвы, за счёт регулирования силового воздействия его движителей на опорное основание;
- адаптировать почвообрабатывающий агрегат (БДТ-3) к физико-механическим свойствам почвы (различной твёрдости).

Экспериментальная производственная проверка проводилась на базе Отдела семеноводства Дальневосточного ГАУ. Почвы данного хозяйства являются типичными для южного района Амурской области, преимущественно луговые черноземовидные с механическим составом - суглинки средней тяжести.

3.4 Средства измерений при проведении полевых испытаний

Для решения поставленных задач с учётом рекомендаций ГОСТов [5,6,7,8] и определения влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на работу почвообрабатывающего агрегата состоящего из трактора класса 1,4 и бороны БДТ-3 были проведены экспериментальные исследования. В процессе проведения исследований измерялись следующие показатели:

- нагрузка на движители энергетического средства (трактора) класса 1,4;
- нагрузка на рабочие органы почвообрабатывающего агрегата (тяжелой дисковой бороны);
- глубина обработки почвы;
- физико-механические характеристики почвы.

Для определения нагрузки на опорные поверхности энергетического средства (трактора) использовались платформенные электронные весы МВСК(В) с диапазоном измерения до 10 т (дискретность взвешивания - 5 кг) (рисунок 3.6, 3.7).



Рисунок 3.6 – Фрагмент измерения нагрузки, приходящейся на задние опорные поверхности энергетического средства (трактора) с помощью платформенных электронных весов МВСК(В)



Рисунок 3.7 - Фрагмент измерения нагрузки, приходящейся на опорные поверхности энергетического средства (трактора)

При проведении экспериментальных исследований производилось измерение нагрузки, приходящейся на рабочие органы бороны (рисунок 3.8), а также на опорные поверхности самой бороны (рисунок 3.9)



Рисунок 3.8 - Фрагмент подготовки к измерению нагрузки приходящейся на рабочие органы задней секции бороны



Рисунок 3.9 - Фрагмент определения нагрузки приходящейся на опорные поверхности бороны БДТ-3

При проведении исследований производись измерения по определению угла наклона рамы бороны при помощи инклинометра Absolute Digital Protractor (рисунок 3.10). Фиксация заданного угла наклона в экспериментальной установке осуществляется посредством механического стопорения с использованием распорки в сопряжении «гайка — болт».

Конструктивно узел фиксации включает распорный элемент, позиционируемый между опорными поверхностями сопрягаемых деталей, и резьбовое соединение (болт с гайкой), обеспечивающее создание нормированного усилия затяжки. При затяжке гайки в резьбовой паре возникает осевое усилие, передаваемое на распорку; последняя, будучи жёстко сопряжённой с сопрягаемыми элементами, исключает относительные перемещения и тем самым стабилизирует пространственное положение узла.



Рисунок 3.10 - Фрагмент измерения угла наклона рамы бороны

Для измерения тягового сопротивления почвообрабатывающего бороновального агрегата использовались крановые весы ВК-5000 с диапазоном измерения до 5 т (дискретность взвешивания — 2 кг) (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Фрагмент измерения тягового сопротивления почвообрабатывающего орудия (бороны БДТ-3)

Для измерения угла наклона гидроцилиндра использовался инклинометр Absolute Digital Protractor (рисунок 3.12) основные характеристики которого приведены в таблице 3.1.



Рисунок 3.12 - Инклинометр Absolute Digital Protractor

Таблица 3.1 – Основные характеристики инклинометра Absolute Digital Protractor

Accuracy	Точность	0° and $90^\circ \leq 0.1^\circ$, the rest $\leq 0.2^\circ$
Working Range	Рабочий диапазон	$^\circ: 4 \times 90^\circ$, mm/m: 1000 mm/m, %: 100%
Working temperature	Рабочая температура	32°F to 104°F (0°C to 40°C)
Working Humidity	Рабочая влажность	$\leq 85\%$
Resolution	Разрешение	0.05°
Protection Grade	Степень защиты	IP65

Для измерения длины выхода штока гидроцилиндра использовалась измерительная лента (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 - Фрагмент измерения длины выхода штока гидроцилиндра

3.5 Определение физико-механических характеристик почвы

При определении плотности почвы после прохода трактора использовался цилиндр – бур (рисунок 3.14). Повторность опыта пятикратная [2].

Взятые образцы почвы подписывались и помещались в полиэтиленовые пакеты (рисунок 3.15), а затем взвешивались в лабораторных условиях на электронных весах (рисунок 3.16). Повторность опыта пятикратная [2].



Рисунок 3.14 – Взятие пробы для определения плотности почвы



Рисунок 3.15 - Взятый образец почвы



Рисунок 3.16 – Определение массы взятого образца почвы (определение плотности)

Изменение структурного состава определялось с использованием набора сит с различными диаметрами от 10 мм до 0,25 мм (рисунок 3.17). После высушивания (рисунок 3.18) и просеивания образцы взвешивались. Повторность опыта пятикратная.



Рисунок 3.17 – Набор сит для определения агрегатного состава почвы



Рисунок 3.18 - Шкаф сушильный ШСЧП-0,25-60

При проведении исследований производились измерения влажности почвы с помощью влагомера почвы Verdo MM 1220 (рисунок 3.19, 3.20) основные характеристики которого представлены в таблице 3.2. Повторность опытов десятикратная по ходу движения агрегата.



Рисунок 3.19 - Влагомер почвы Verdo MM 1220



Рисунок 3.20 - Фрагмент определения влажности почвы

Таблица 3.2 - Технические характеристики влагомера почвы Verdo MM 1220

Тип дисплея	ЖК
Диапазон измерения	0 – 50 %
Цена единицы младшего разряда	0,1
Погрешность измерения	$\pm 0,5\%$
Условия эксплуатации	
Температура:	0 - 60°
Относительная влажность:	< 85 %
Метод измерения	Кондуктометрический с автоматической температурной компенсацией
Питание	4x1.5 В AAA батарея
Габаритные размеры	
Основной блок:	140x60x22 мм
Длина измерительного щупа:	280 мм
Вес	210 г (без батареи)

При определении глубины обработки использовалась измерительная линейка (рисунок 3.21). Повторность опыта десятикратная.



Рисунок 3.21 – Фрагмент определения глубины обработки

3.6 Методика статистической обработки данных полевых опытов

Обработка данных качественных показателей велась по стандартной методике. При этом статистические совокупности варьируемых признаков характеризовались следующими показателями: среднеарифметическими значениями $\bar{X}$; среднеквадратическим отклонением σ ; коэффициентом вариации V ; ошибкой средней арифметической $\bar{Sx}$; показателем точности результата $\bar{Sx} \%$ [147].

Количество измерений N , обеспечивающих достоверность получения закона распределения случайных величин, определялись исходя из заданной точности, принятой вероятности полученного результата и изменчивости принимаемого признака

$$N = \frac{t^2 \cdot V^2}{\bar{Sx}} \quad (3.1)$$

где t - коэффициент, зависящий от доверительной вероятности, принимаемый 0,80; 0,90; 0,95. При этих вероятностях принимали значения:

$$t_{0.80} = 0,842; t_{0.90} = 1,282; t_{0.95} = 1,645.$$

Количество опытов принималось при V не более 0,4 (40%) и не более 0,05 (5%).

Среднеарифметическое значение, являющееся наиболее вероятным значением измеряемой величины при данном количестве измерений [147]

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (3.2)$$

где x_i - результаты i -го измерения (опыта).

Среднеквадратическое отклонение, являющееся мерой точности неоднократно измеренной неизменной величины; если же неоднократно измеренная величина является переменной, то значения ее среднеквадратического отклонения показывают не только меру точности как случайную ошибку измерений, но и меру изменчивости переменной [147]

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (3.3)$$

Коэффициент вариации, характеризующий изменчивость величины [147]

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3.4)$$

В процессе определения отдельных параметров необходимо было учитывать ошибку средней арифметической [147]

$$\overline{S_x} = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.5)$$

Ошибка, выраженная в процентах от соответствующей средней, считалась показателем точности опыта [147]

$$\overline{S_x}\% = \frac{\overline{S_x}}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

Если значение $\overline{S_x}\%$ превышало 5%, уточняли методику, а при превышении 7-8 % опыты браковали.

Достаточными числовыми характеристиками случайных величин является математическое ожидание и дисперсия. Оценками математического ожидания и дисперсии случайных величин являются выборочное среднее и выборочная дисперсия [147]. Для определения точности и надежности оценки математического

ожидания воспользуемся доверительным интервалом, соответствующим определенной надежности [147]

$$P\left(\bar{X} - t_s \frac{s}{\sqrt{n}} < m < \bar{X} + t_s \frac{s}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (3.7)$$

где m - математическое ожидание;

P - надежность опыта ($P=95\%$);

α - доверительная вероятность ($\alpha=5\%$);

t_s - коэффициент Стьюдента.

Относительная погрешность результата измерений отдельного параметра определялась по формуле [147]

$$\varepsilon_x = \frac{t_s \cdot S}{\bar{x}} \quad (3.8)$$

где S - среднеквадратическое отклонение.

Доверительный интервал для оценки выборочной дисперсии, нормального распределения, определялся по выражению [147]

$$\frac{S^2(n-1)}{X_1^2} < G_x^2 < \frac{S^2(n-1)}{X_2^2} \quad (3.9)$$

где X_1^2, X_2^2 - табличные значения величин, соответствующим вероятностям:

$$P_1 = \frac{\alpha}{2}, P_2 = 1 - \frac{\alpha}{2} \quad (3.10)$$

Однородность дисперсий можно проверить по критерию, который определяется [147]

$$G = \frac{S_{max}^2}{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2} \quad (3.11)$$

где S_{max} - максимальная дисперсия из S_1^2, S_2^2, S_m^2

Полученный результат сравнивают с табличными данными.

Статистическая обработка данных полевых опытов проводится с помощью дисперсионного анализа. Существенность различий показателей в целом по всему опыту оценивали с помощью критерия Фишера [12].

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОВЕРКИ

4.1 Результаты экспериментальных исследований по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на изменение величины силовой нагрузки, приходящейся на колеса трактора и рабочие органы бороны

Одним из ключевых условий получения хорошего урожая является качественная подготовка почвы для проведения посевных работ и работ по улучшению условий, способствующих качественному прорастанию сельскохозяйственных культур. В последние годы широко применяется технология обработки почвы без оборота пласта. Данную операцию чаще всего в небольших крестьянско-фермерских хозяйствах (КФХ) Амурской области проводят с использованием дисковых борон БДТ-3. Это объясняется тем, что для использования более широкозахватных орудий необходимо иметь энергонасыщенные трактора высокого класса тяги. В то же время, основной парк данных хозяйств представлен в основном тракторами класса 1,4...2, как из-за финансовых трудностей для приобретения более энергонасыщенных тракторов, так и в виду того, что посевные площади, как правило, небольшие и мелкоконтурные [77].

Специфические естественно-производственные особенности Амурской области заключаются в том, что основную обработку почвы проводят весной при наличии твердого слоя почвы, вследствие ее промерзания зимой на глубину более 2,5 метров. Осенью провести данную работу не всегда получается из-за поздней уборки фирменной культуры региона - сои, практически при наступлении заморозков. При этом нужно отметить, что в данных условиях на тяжелых почвах при наличии мерзлотного основания с целью повышения качества обработки почвы, необходимо регулировать нагрузку на рабочий орган (диск).

Повышение эксплуатационно-технологических параметров дисковой бороны может быть получено благодаря оптимизации нагрузки между движителями энергетического средства (трактора) и рабочими органами (дисками).

Это может стать возможным за счет внедрения новых технических решений путем установки дополнительных устройств. Это особенно важно на почвах с наличием твердого подстилающего слоя (мерзлоты). При работе в обычных условиях нагрузка на отдельные органы дисковой бороны приходится практически одинаковая, так как она обусловлена в основном массой самой бороны. В то же время, работа на почвах, подверженных промерзанию в зимний период времени на глубину более 2,5 метров, в весенний период времени сопровождается своими особенностями, заключающимися в неравномерном оттаивании верхнего плодородного слоя. Это приводит к тому, что в процессе обработки верхнего слоя почвы происходит перераспределения нагрузки на рабочие органы между секциями бороны, что ведёт как к несоблюдению агротехнологических требований, предъявляемых к процессу боронования, так и к нарушению стабилизации прямолинейного движения самого машинно-тракторного агрегата. Кроме того, в данных условиях проведения ранневесенних сельскохозяйственных работ при работе колёсных энергетических средств наблюдается нехватка тягово-сцепных свойств, обусловленная слабой несущей способностью почвы.

В весенний период слабая несущая способность почвы объясняется тем, что в период наступления положительных температур происходит оттаивание мерзлотного основания, а выпадающие осадки в виде дождя со снегом резко повышают влажность почвы. Это все влияет на тягово-сцепные свойства трактора, которые непосредственно зависят от нагрузки, приходящейся на ведущие колёса трактора. С этой целью, повышения нагрузки на ведущие колёса трактора, чаще всего используются дополнительные грузы, которые размещают на энергетическом средстве, но в условиях Амурской области этот способ увеличения тягово-сцепных свойств не приемлем. Увеличение массы самого энергетического средства приводит к тому, что трактор продавливает верхний слой почвы, а это увеличивает буксование движителей, оставляя после себя колею и повышая техногенное воздействие на почву [73].

В дополнение к изложенному выше предлагается использование устройства для перераспределения весовой нагрузки посредством корректора-распределителя силовой нагрузки. Далее приведён анализ функциональных взаимосвязей работы предлагаемого устройства.

При увеличении длины штока гидроцилиндра относительно нейтрального его положения произошло изменение силовой нагрузки внутри почвообрабатывающего бороновального агрегата, состоящего из колёсного трактор класса 1,4 и тяжёлой дисковой бороны БДТ-3.

Результаты экспериментальных исследований по определению изменения силовой нагрузки при увеличении длины штока гидроцилиндра приведены на рисунках 4.1...4.4.

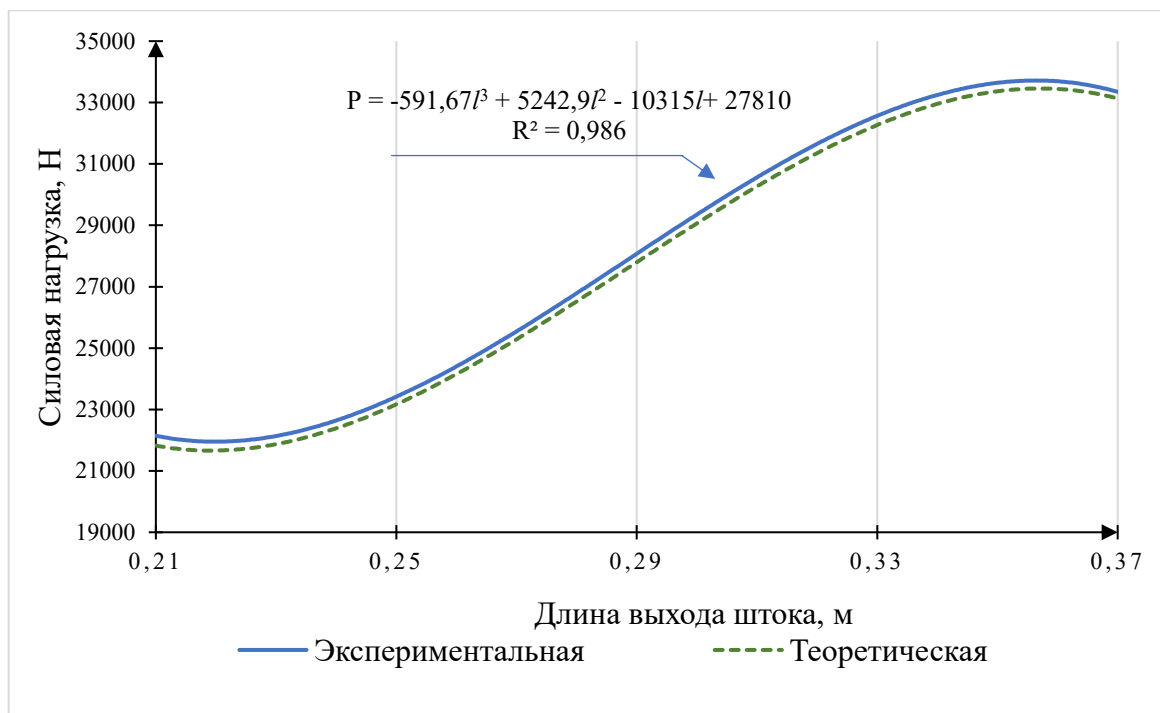


Рисунок 4.1 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на задние движители трактора в зависимости от длины выхода штока гидроцилиндра

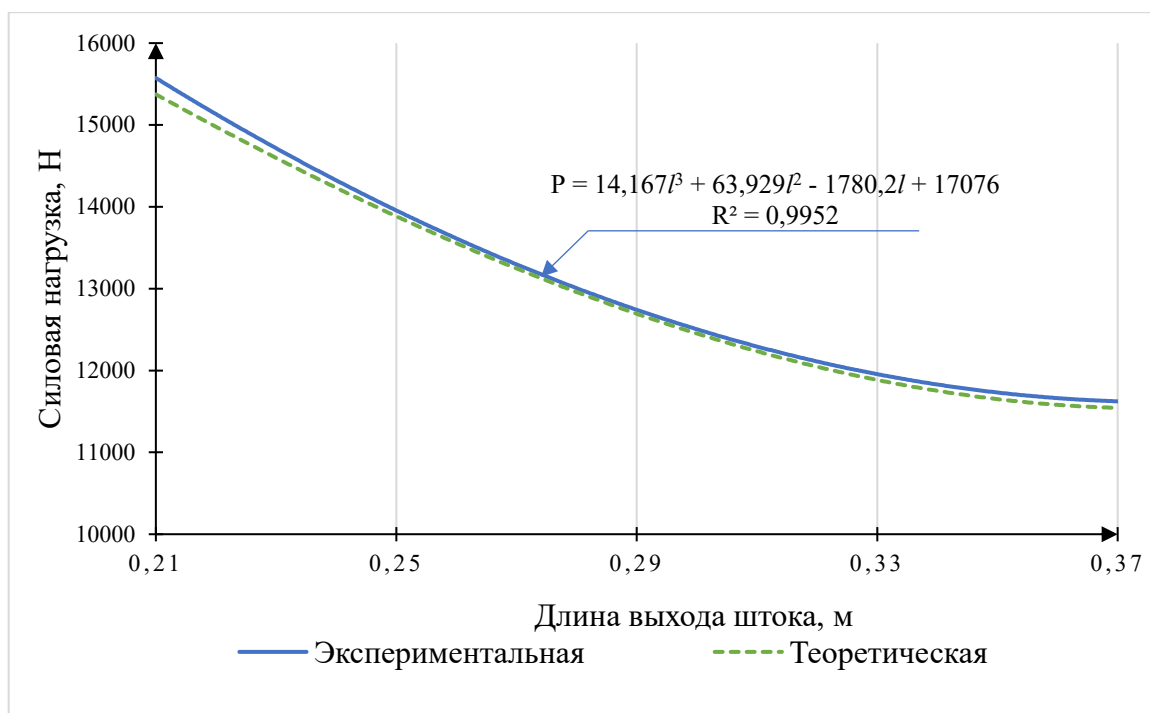


Рисунок 4.2 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на передние движители трактора в зависимости от длины выхода штока гидроцилиндра

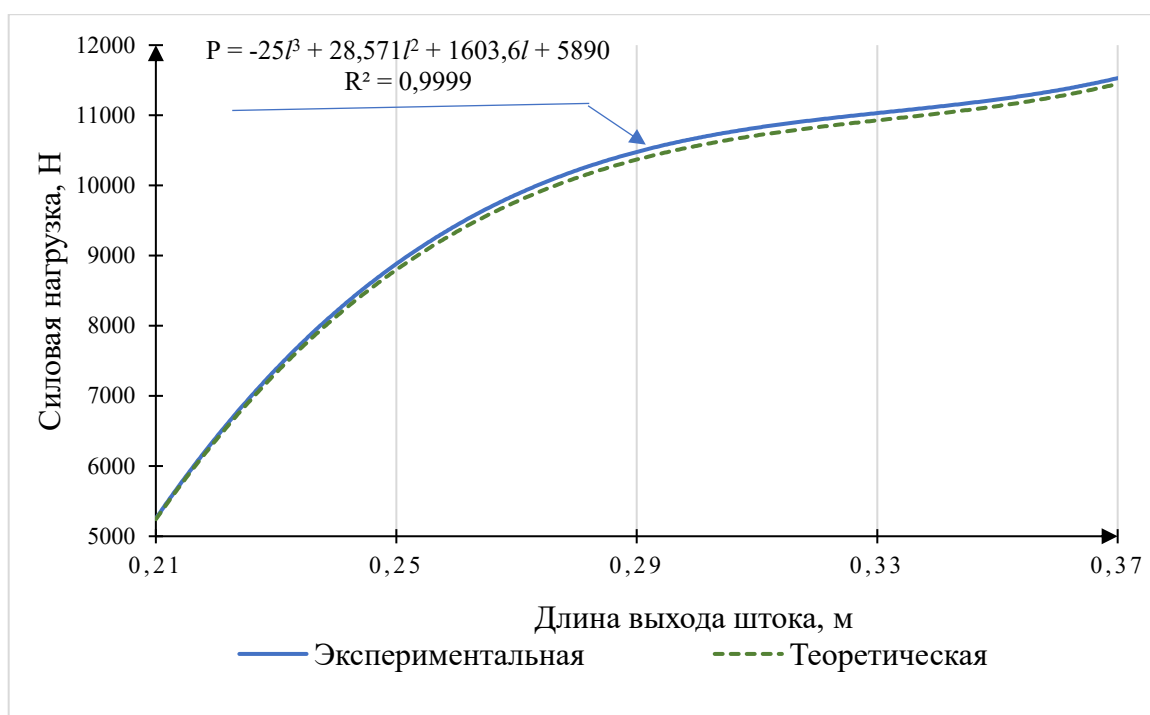


Рисунок 4.3 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на рабочие органы задней секции бороны в зависимости от длины выхода штока гидроцилиндра

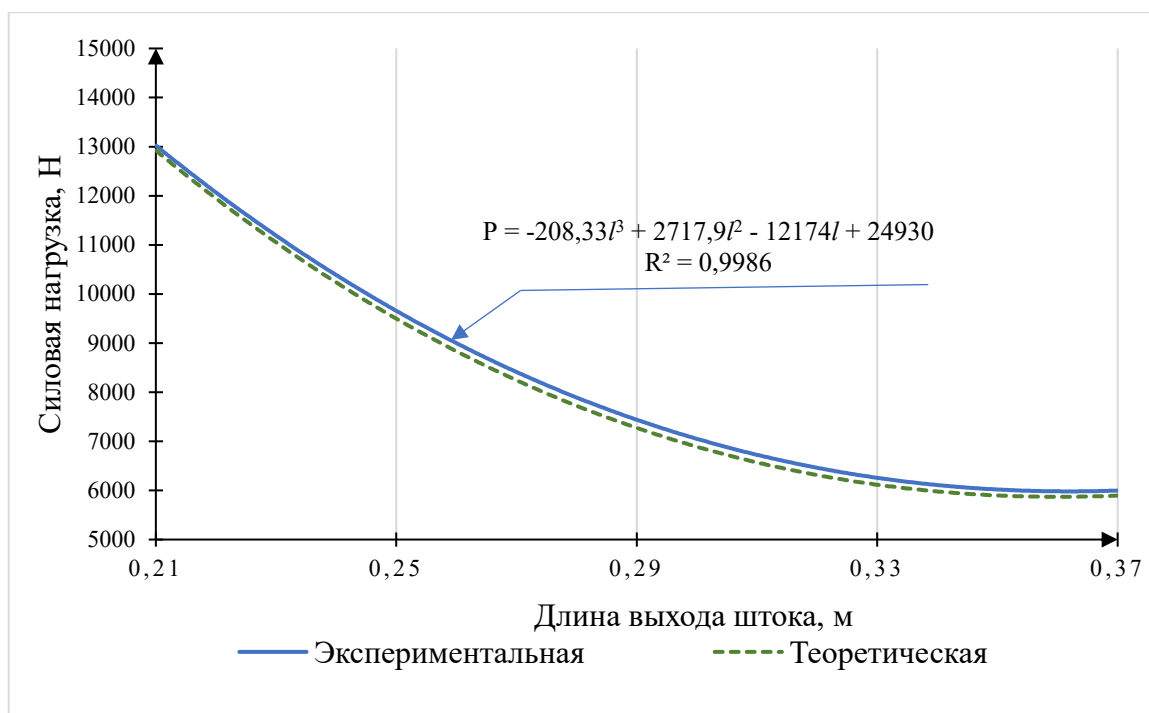


Рисунок 4.4 – Изменение силовой нагрузки приходящейся на рабочие органы передней секции бороны в зависимости от длины выхода штока гидроцилиндра

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 4.1...4.4 необходимо отметить, что произошло изменение силовой нагрузки, приходящейся на опорные поверхности трактора и рабочие органы бороны при увеличении длины выхода штока гидроцилиндра с 0,21 м до 0,37 м:

- увеличение нагрузки на задние движители трактора с 22020 Н до 33150 Н (рисунок 4.1);
- снижение нагрузки на передние движители трактора с 15600 Н до 11650 Н (рисунок 4.2);
- увеличение нагрузки на рабочие органы задней секции бороны с 5225 Н до 11500 (рисунок 4.3) Н;
- снижение нагрузки на рабочие органы передней секции бороны с 13025 Н до 6000 Н (рисунок 4.4).

Исходя из выше полученных результатов, представленных на рисунках 4.1...4.4 можно отметить следующее, что при увеличении длины выхода штока гидроцилиндра на 0,16 м позволило увеличить сцепной вес трактора и как

следствие повышение его тягово-сцепных свойств за счёт частичного использования веса бороны.

При уменьшении длины штока гидроцилиндра относительно нейтрального его положения произошло изменение силовой нагрузки внутри почвообрабатывающего бороновального агрегата, состоящего из колёсного трактор класса 1,4 и тяжёлой дисковой бороны БДТ-3.

Результаты экспериментальных исследований по определению изменения силовой нагрузки при уменьшении длины штока гидроцилиндра приведены на рисунках 4.5...4.8.

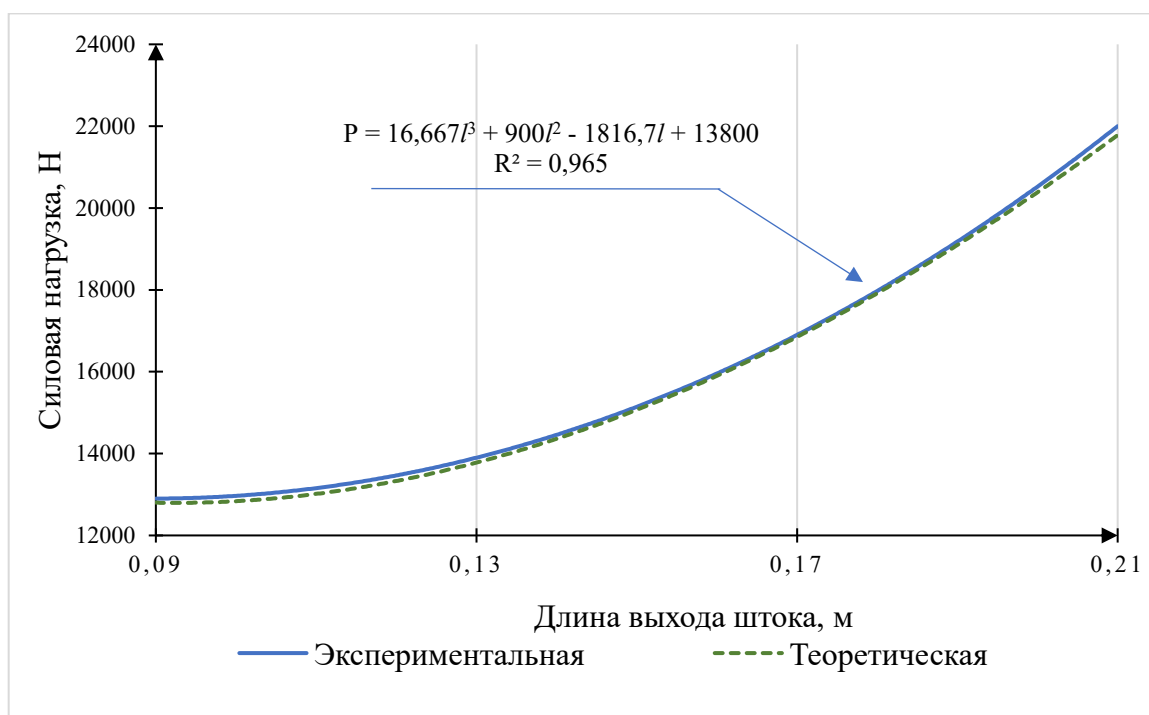


Рисунок 4.5 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на задние движители трактора в зависимости от длины выхода штока гидроцилиндра

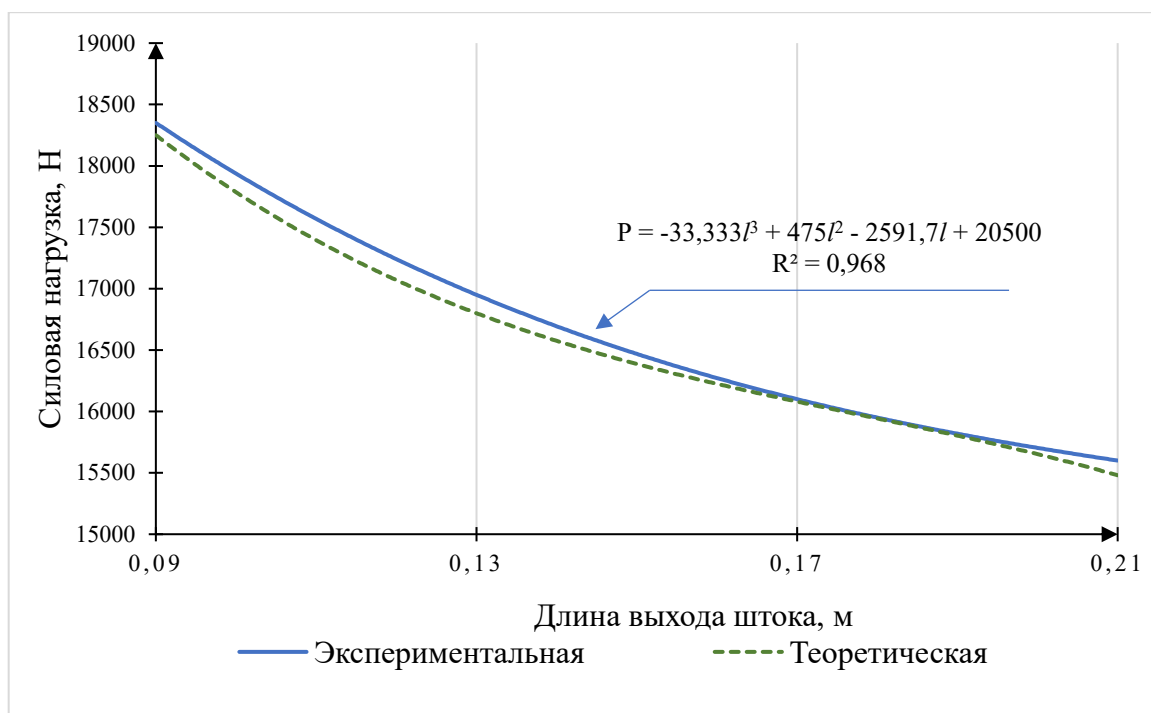


Рисунок 4.6 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на передние движители трактора в зависимости от длины выхода штока гидроцилиндра

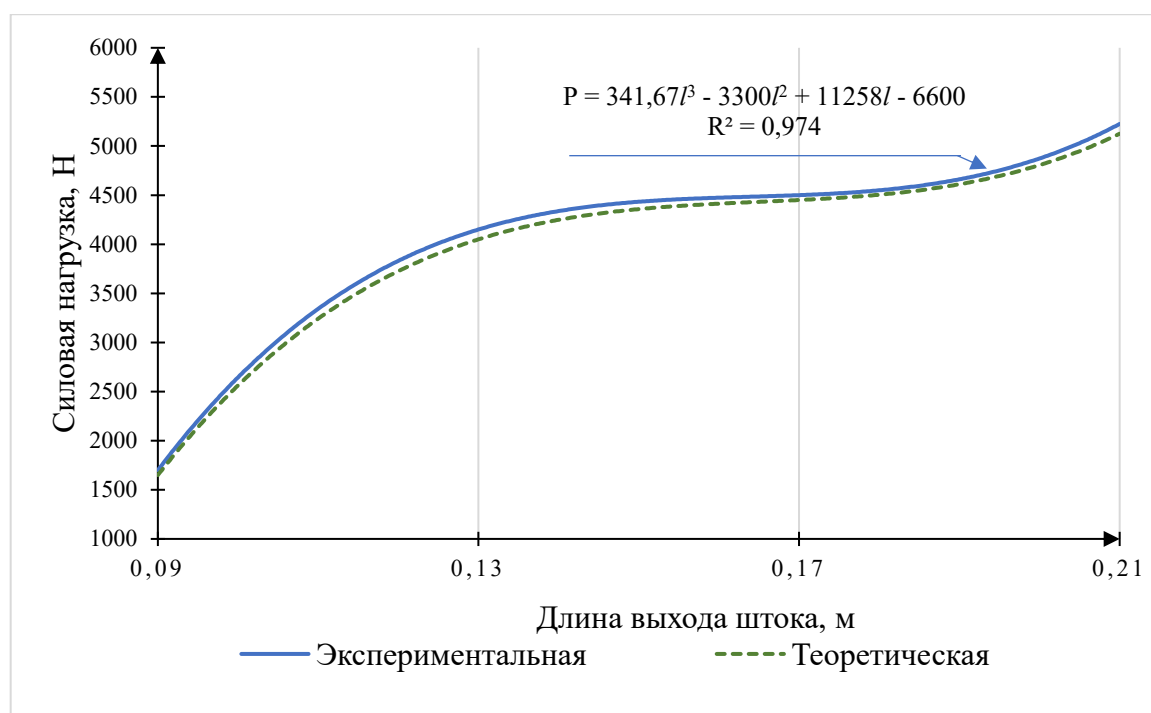


Рисунок 4.7 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на рабочие органы задней секции борона в зависимости от длины выхода штока гидроцилиндра

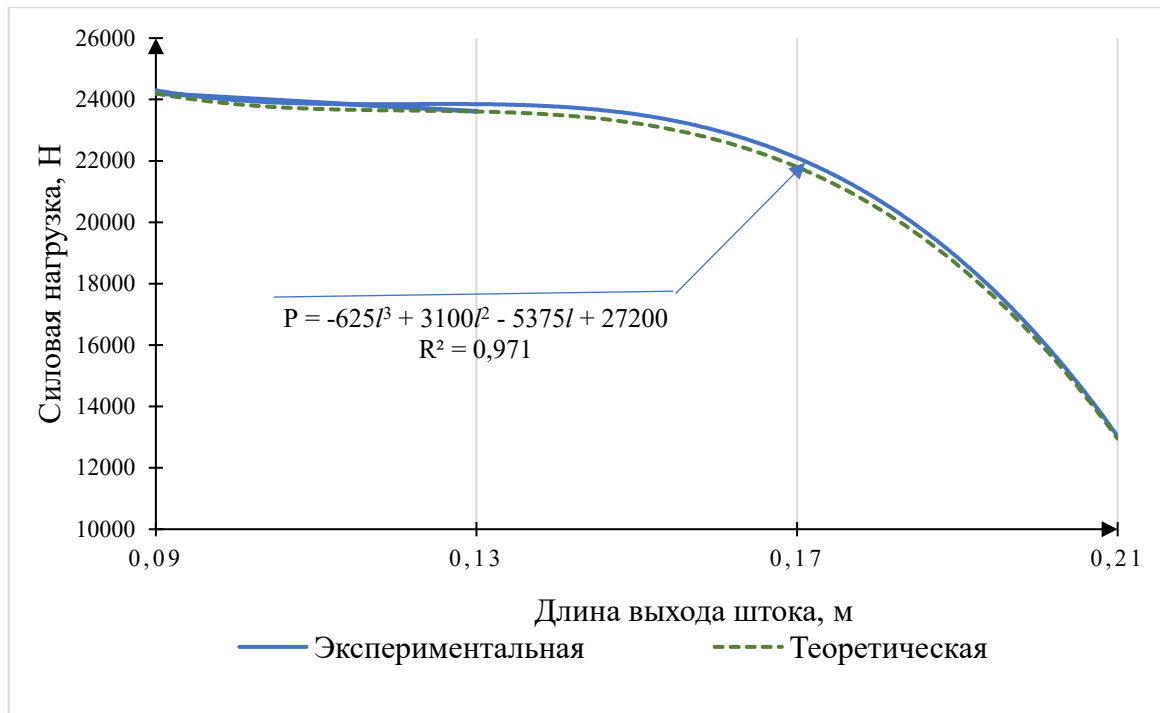


Рисунок 4.8– Изменение силовой нагрузки, приходящейся на рабочие органы передней секции бороны в зависимости от длины выхода штока гидроцилиндра

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 4.5...4.8 необходимо отметить, что произошло изменение силовой нагрузки, приходящейся на движители трактора и рабочие органы бороны при уменьшении длины выхода штока гидроцилиндра с 0,21 м до 0,09 м:

- снижение нагрузки на задние движители трактора с 22020 Н до 12900 Н (рисунок 4.5);
- увеличение нагрузки на передние движители трактора с 15600 Н до 18350 Н (рисунок 4.6);
- снижение нагрузки на рабочие органы задней секции бороны с 5225 Н до 1700 Н (рисунок 4.7);
- увеличение нагрузки на рабочие органы передней секции бороны с 13025 Н до 24300 Н (рисунок 4.4).

Исходя из выше полученных результатов, представленных на рисунках 4.5...4.8 можно отметить следующее, что при уменьшении длины выхода штока

гидроцилиндра на 0,12 м позволило увеличить вес, приходящейся на передние движители трактора.

В результате проведенных исследований установлено, что кроме длины выхода штока гидроцилиндра на распределение силовой нагрузки, приходящейся на движители трактора и рабочие органы бороны, оказывает влияние изменение угла наклона рамы. Результаты исследований при изменении угла наклона рамы (в сторону задних секций) от 0 градусов до 12 градусов приведены на рисунках 4.9...4.12.

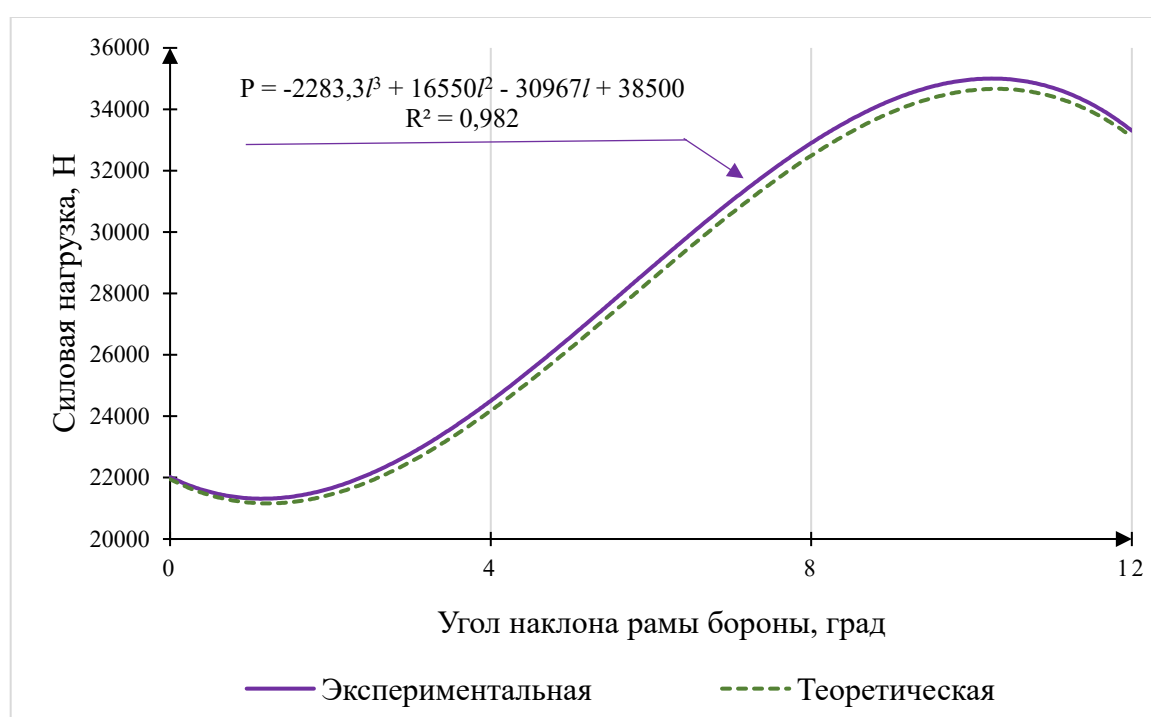


Рисунок 4.9 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на задние движители трактора в зависимости от угла наклона рамы бороны

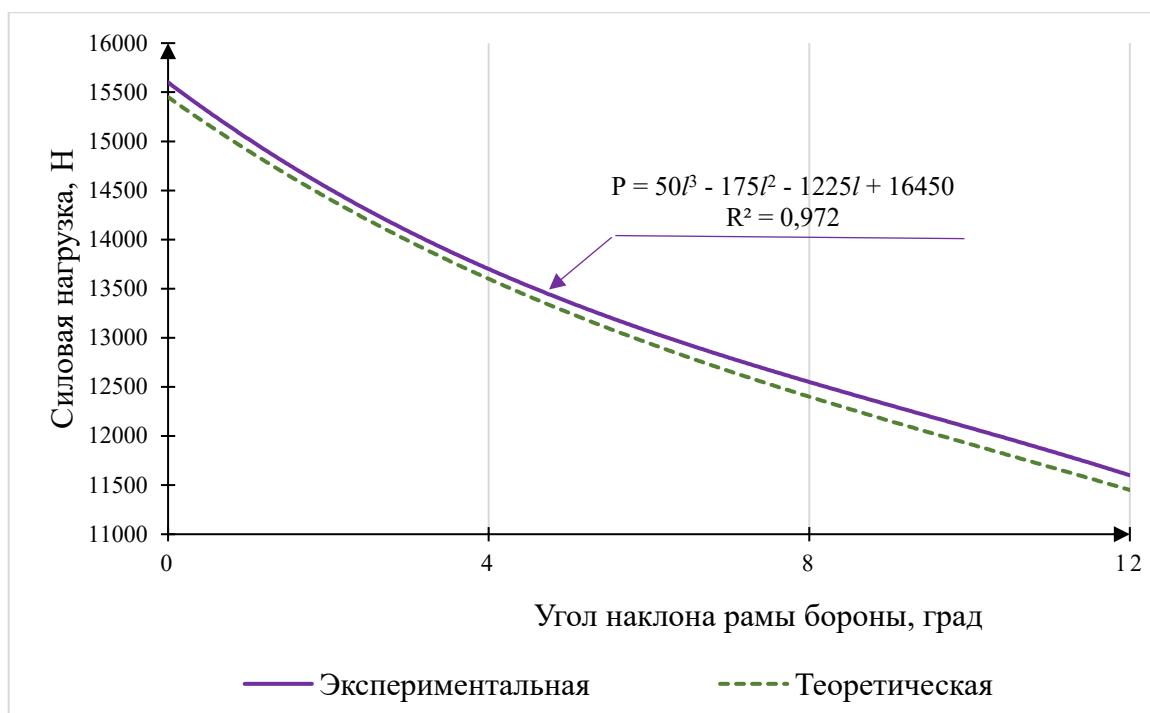


Рисунок 4.10 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на передние движители трактора в зависимости от угла наклона рамы бороны

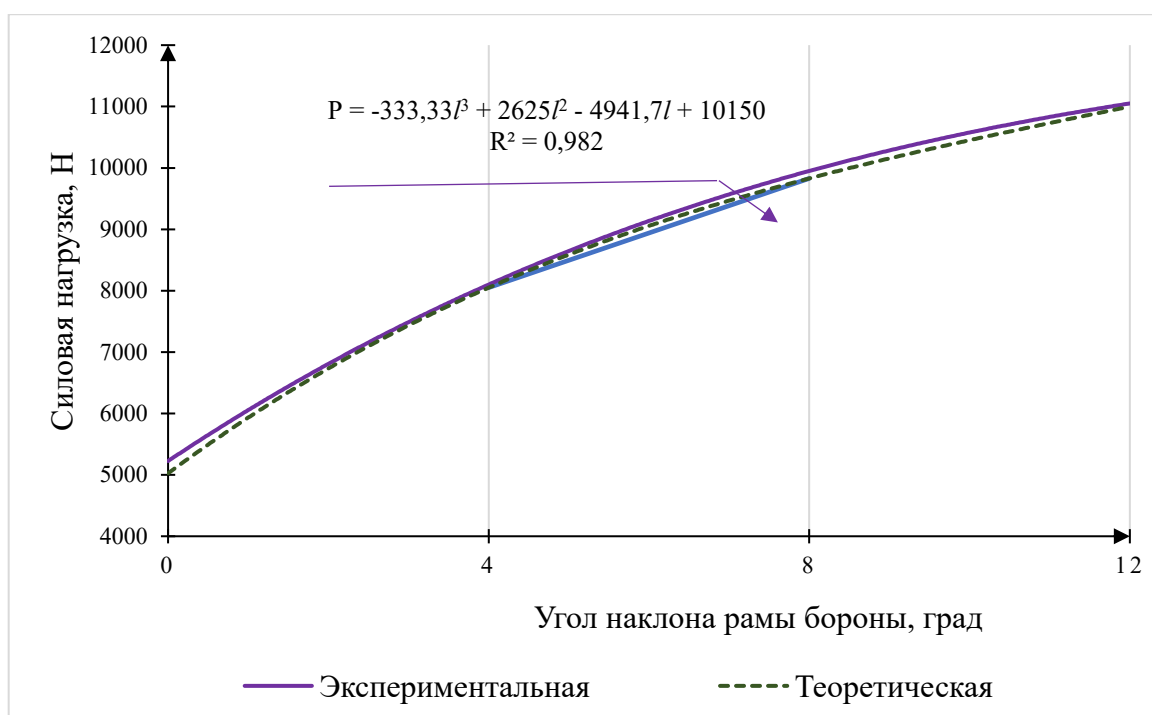


Рисунок 4.11 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на рабочие органы задней секции бороны в зависимости от угла наклона рамы бороны

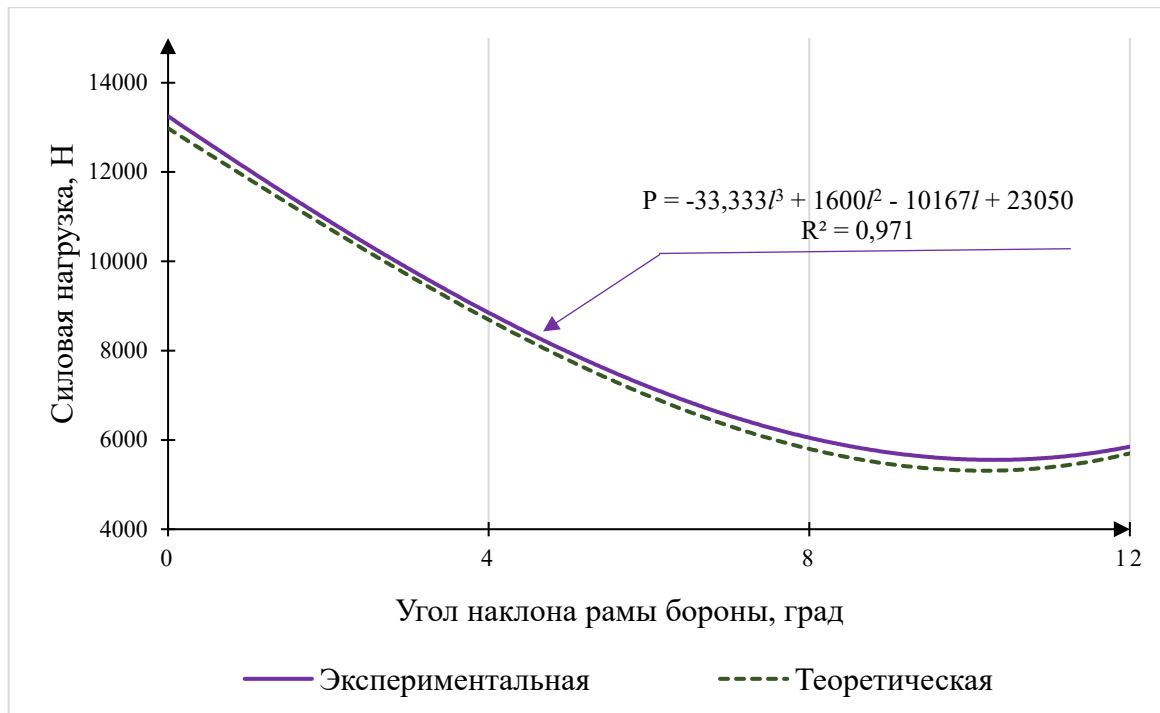


Рисунок 4.12 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на рабочие органы передней секции борона в зависимости от угла наклона рамы борона

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 4.9...4.12 необходимо отметить, что произошло изменение силовой нагрузки, приходящейся на опорные поверхности трактора и рабочие органы борона при изменении угла наклона рамы от 0 градусов до 12 градусов произошло перераспределение нагрузки:

- увеличение нагрузки на задние движители трактора с 22020 Н до 33300 Н (рисунок 4.9);
- снижение нагрузки на передние движители трактора с 15600 Н до 11600 Н (рисунок 4.10);
- увеличение нагрузки на рабочие органы задней секции борона с 5225 Н до 11050 (рисунок 4.11) Н;
- снижение нагрузки на рабочие органы передней секции борона с 13025 Н до 5850 Н (рисунок 4.12).

Исходя из выше полученных результатов, представленных на рисунках 4.9...4.12 можно отметить следующее, что при изменении угла наклона рамы от 0 градусов до 12 градусов произошло увеличение сцепного веса трактора и как

следствие повышение его тягово-цепных свойства за счёт частичного использования веса бороны.

Результаты исследований при изменении угла наклона рамы (в сторону передних секций) от 0 градусов до 12 градусов приведены на рисунках 4.13...4.16.

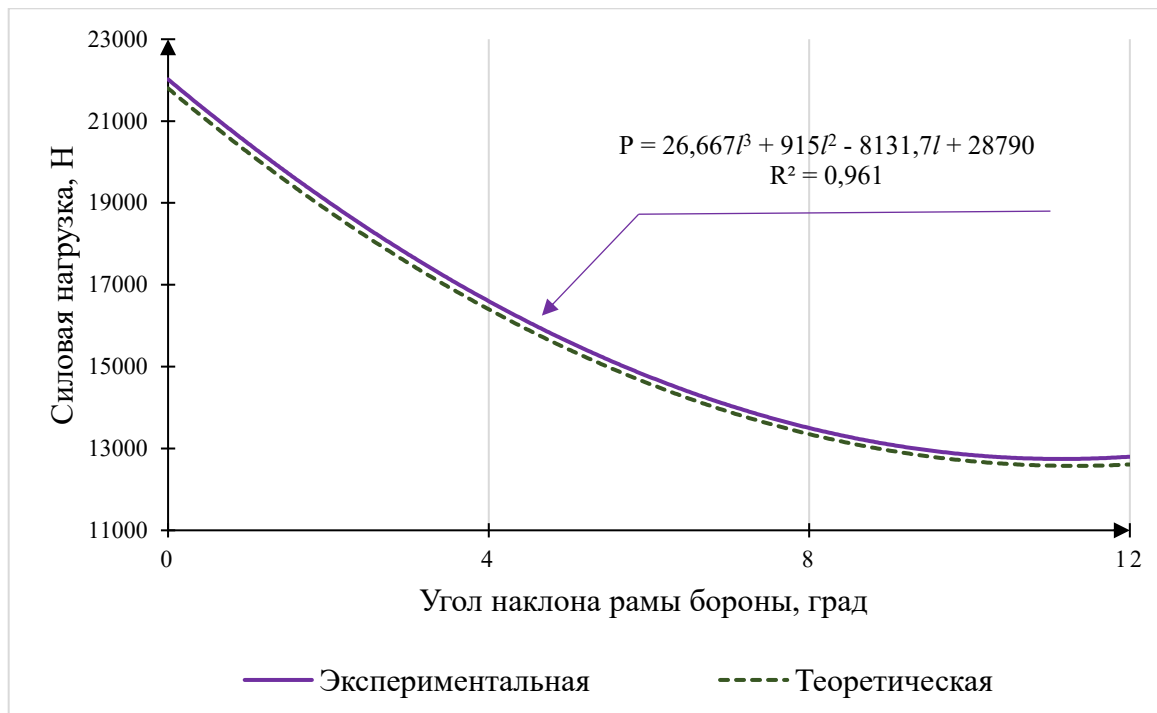


Рисунок 4.13 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на задние движители трактора в зависимости от угла наклона рамы бороны

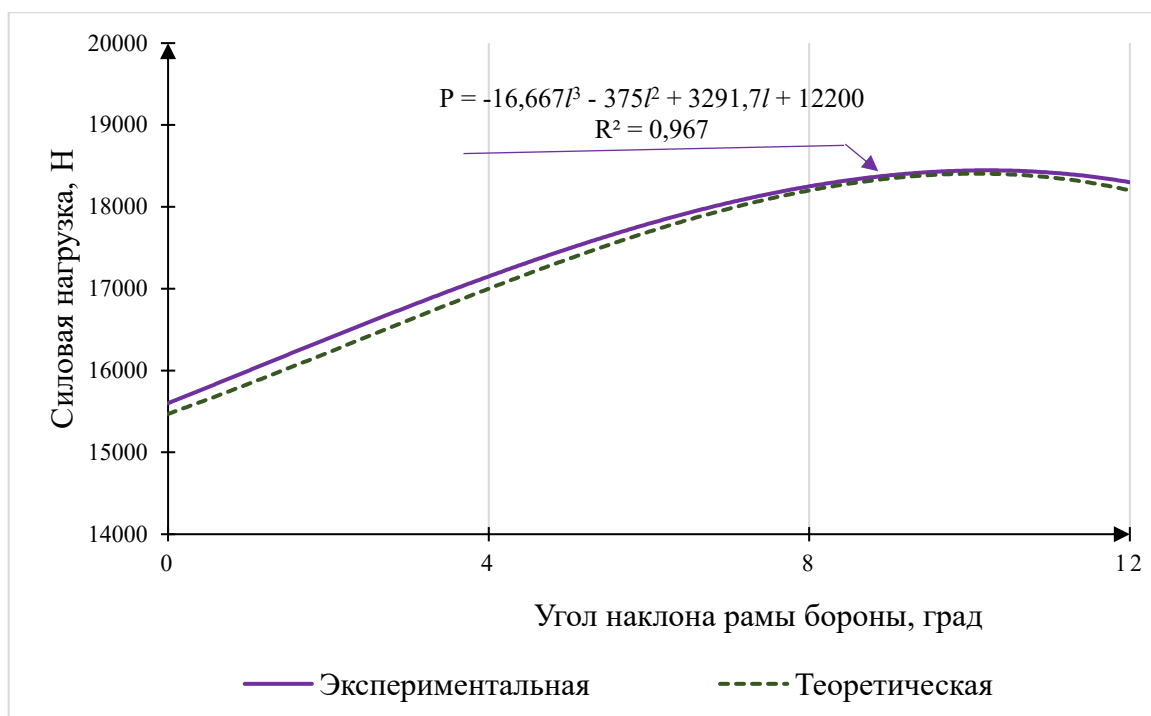


Рисунок 4.14 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на передние движители трактора в зависимости от угла наклона рамы

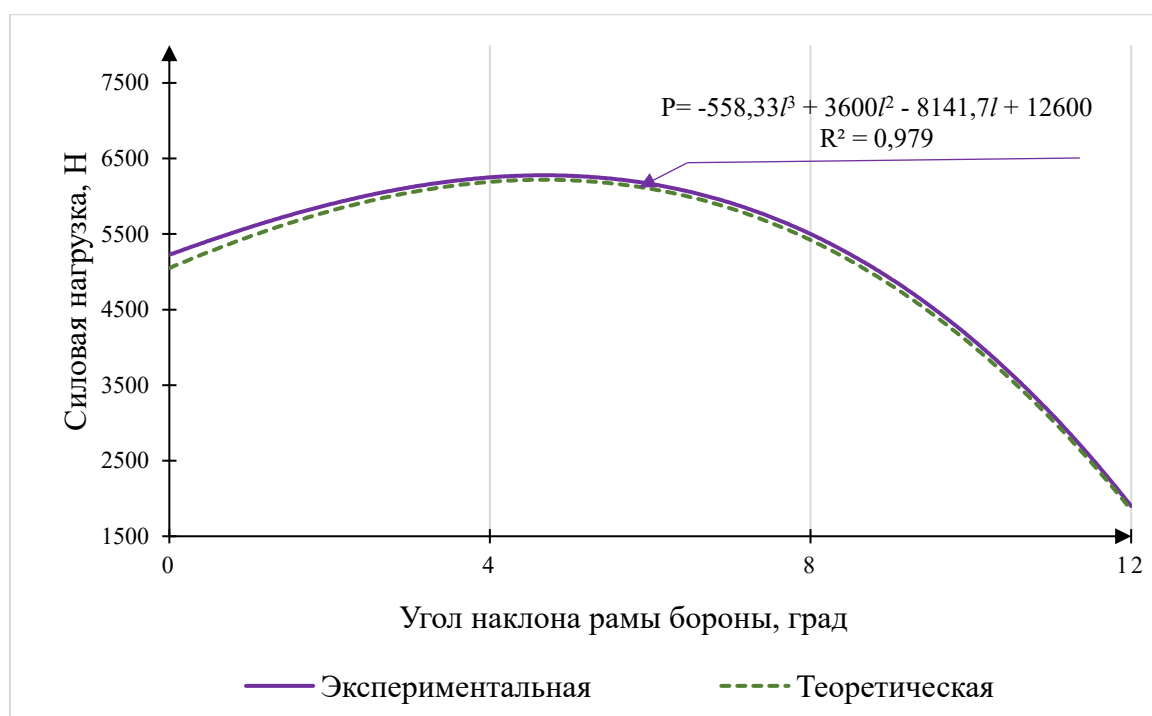


Рисунок 4.15 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на рабочие органы задней секции бороны в зависимости от угла наклона рамы бороны

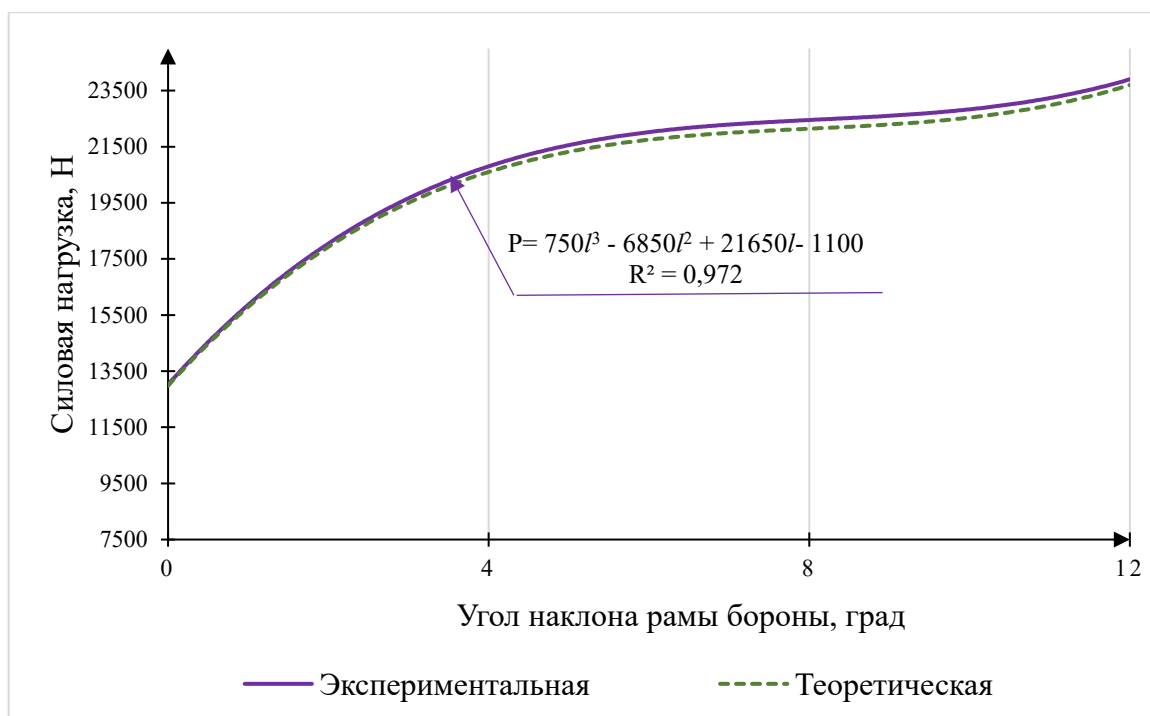


Рисунок 4.16 – Изменение силовой нагрузки, приходящейся на рабочие органы передней секции бороны в зависимости от угла наклона рамы бороны

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 4.12...4.16 необходимо отметить, что произошло изменение силовой нагрузки, приходящейся на движители трактора и рабочие органы бороны при изменении угла наклона рамы от 0 градусов до 12 градусов:

- снижение нагрузки на задние движители трактора с 22020 Н до 12800 Н (рисунок 4.13);
- увеличение нагрузки на передние движители трактора с 15600 Н до 18300 Н (рисунок 4.14);
- снижение нагрузки на рабочие органы задней секции бороны с 5225 Н до 1900 (рисунок 4.15) Н;
- увеличение нагрузки на рабочие органы передней секции бороны с 13025 Н до 23900 Н (рисунок 4.16).

Исходя из выше полученных результатов, представленных на рисунках 4.13...4.16 можно отметить следующее, что при изменении угла наклона рамы от 0

градусов до 12 градусов позволяет увеличить вес приходящейся на передние движители трактора;

Как показали проведенные исследования теоретические и практические данные находятся в диапазоне доверительного интервала, что доказывает достоверность проведенных исследований.

4.2 Результаты исследований по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на агротехнологические показатели бороновального агрегата

В результате проведенных исследований были получены результаты воздействия ходовой системы бороновального агрегата на изменение твёрдости, плотности и структурного состава почвы. При проведении исследований влажность почвы составляла 22,2...23,6 %.

В результате проведенных экспериментальных исследований по определению твёрдости почвы по следу трактора были получены результаты, приведенные на рисунке 4.17 [76].

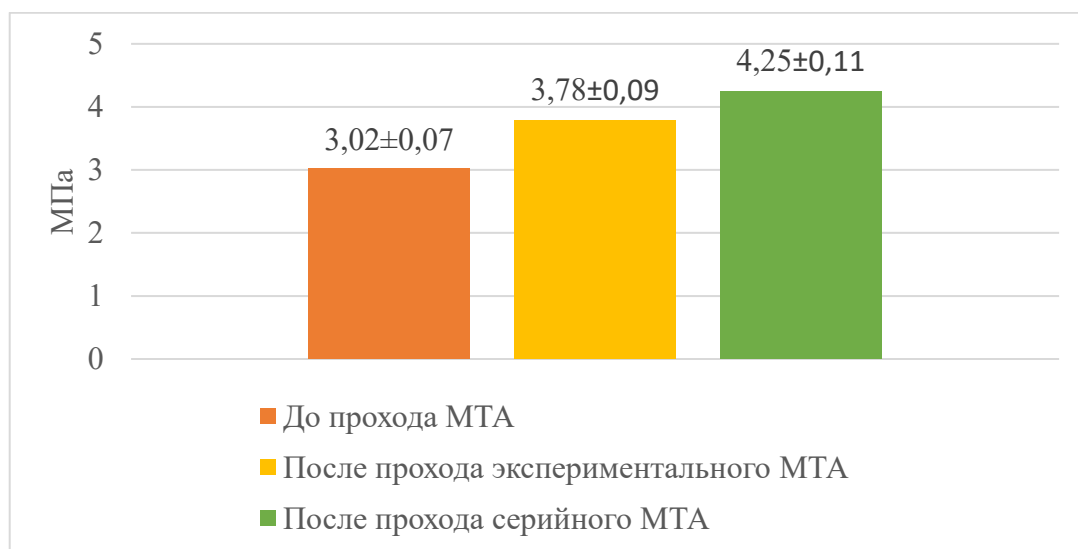


Рисунок 4.17 - Результаты экспериментальных исследований по определению твёрдости почвы по следу трактора

Анализ полученных результатов по определению твёрдости почвы показал, что твёрдость почвы после прохода серийного МТА возросла на 40,7%, а после прохода экспериментального на 25,1%. Таким образом, использование предлагаемого устройства позволила снизить твёрдость почвы в 1,6 раза, что в конечном итоге снизит энергозатраты на её обработку [76].

В результате проведенных экспериментальных исследований по определению плотности почвы по следу трактора были получены результаты, приведенные на рисунке 4.18.

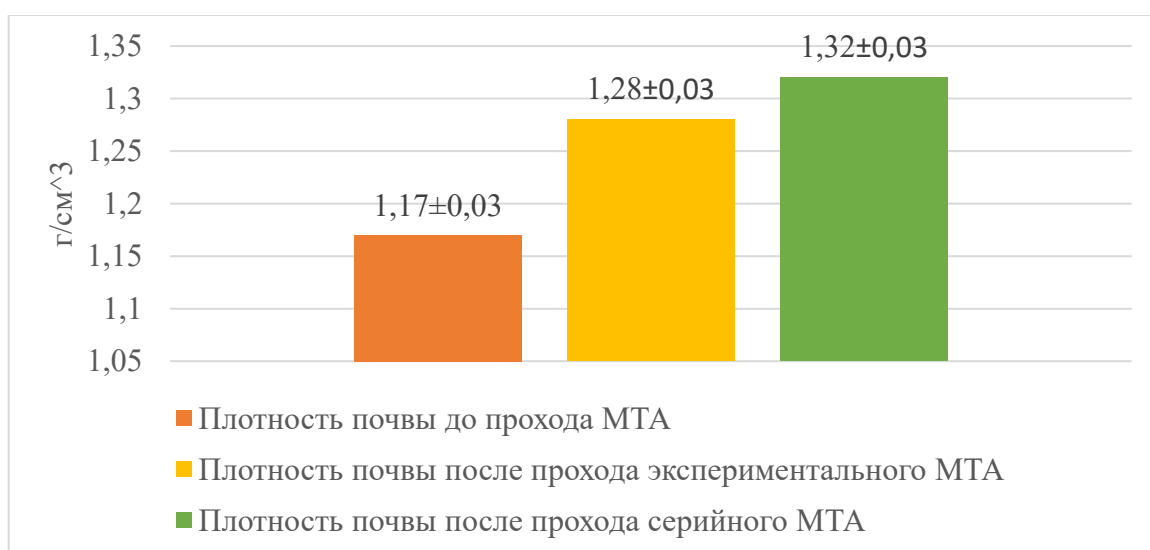


Рисунок 4.18 - Результаты экспериментальных исследований по определению плотности почвы по следу трактора

Результаты исследования плотности почвы продемонстрировали, что применение экспериментального образца привело к увеличению плотности на 9,4%, в то время как использование серийного МТА вызвало более существенное уплотнение – на 17,1%.

На основании проведенных исследований было установлено изменение структурного состава почвы (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Структурный состав почвы до и после прохода МТА по полю (горизонт от 0 до 10 см), мм

Структурный состав почвы		Размер агрегатов почвы, см								К
		1–0,7	0,7–0,5	0,5–0,3	0,3–0,2	0,2–0,1	0,1–0,05	0,05–0,025	Менее 0,025	
До прохода МТА	В граммах	0,05	0,07	0,95	1,31	1,26	10,69	19,93	64,32	52
	коэф. вариации, %	30,1	24,6	28,1	22,5	32,4	36,5	27,4	25,1	
После прохода серийного МТА	В граммах	0,04	0,05	0,53	0,82	1,01	6,82	13,86	75,94	42
	коэф. вариации, %	29,7	30,5	35,6	25,5	21,6	32,4	27,9	25,6	
После прохода экспериментального МТА	В граммах	0,03	0,06	0,62	1,02	0,78	7,2	15,46	74,11	50
	коэф. вариации, %	30,5	27,8	33,5	27,8	25,4	24,3	22,8	31,6	

Разброс опытных данных оценивался коэффициентом вариации [76].

Коэффициент структурности определялся по формуле [9]:

$$K = \frac{C}{B} \quad (4.1)$$

где C – количество макроагрегатов от 0,025 до 1 см в %;

B – сумма агрегатов менее 0,025 см и комков более 1 см в %.

По значению коэффициента структурности оценивается состояние почвы. Известно, что наиболее ценной является комковато–зернистая структура, с размером почвенных агрегатов от 0,025 до 1 см. Она придает почве рыхлое сложение, что улучшает прорастание семян и развитие корневой системы.

Из анализа таблицы 4.1 видно, что использование предлагаемого устройства позволяет улучшить коэффициент структурности почвы. Снижение разрушения структуры почвы, по нашему мнению, объясняется меньшим буксованием трактора

с установленным устройством на 12,5...14% по сравнению с трактором без установленного устройства.

4.3 Результаты сравнительных хозяйственных испытаний

Для подтверждения эффективности использования предложенного корректора-распределителя силовой нагрузки были проведены сравнительные хозяйственные испытания результаты, которых представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты сравнительных хозяйственных испытаний

Показатели		Состав МТА (МТЗ-82+БДТ-3)	
		Серийный	Экспериментальный
Длина гона, м		875	875
Ширина захвата, м	конструктивная	3,00	3,00
	рабочая	2,94	2,95
Скорость движения, м/с		2,22	2,61
Производительность, га/ч	В час времени движения	2,48	2,77
	В час основного рабочего времени	2,70	2,93
Коэффициент использования времени движения		0,87	0,85
Коэффициент использования времени смены		0,82	0,84
Расход топлива на единицу обработанной площади, кг/га		7,4	6,8

Анализируя полученные данные (таблица 4.2) можно отметить, что использование машинно-тракторного агрегата с корректором-распределителем силовой нагрузки позволило повысить производительность в час основного рабочего времени на 14,9% и снизить расход топлива на единицу обработанной площади на 8,1% по сравнению с серийным МТА.

4.4 Регрессионно-дисперсионный анализ результатов исследований по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на колеса энергетического средства

На основании проведенных исследований процесса подготовки почвы машинно-тракторным агрегатом с корректором-распределителем силовой нагрузки с целью определения влияния различных конструктивно-технологических параметров на величину нагрузки на задние ведущие движители трактора, был проведен многофакторный эксперимент.

Установлено авторами [97,133], что на распределение силовой нагрузки в машинно - тракторном агрегате с адаптированной дисковой бороной БДТ-3, выполняющую агротехнологическую операцию, связанную с подготовкой почвы, оказывают влияние его конструктивно–технологические параметры.

Проведем регрессионно-дисперсионный анализ результатов исследований по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на задние опорные поверхности энергетического средства (угла наклона рамы бороны).

С целью определения влияния конструктивно–технологических параметров разработанного устройства на силовую нагрузку, возникающую на задние движители трактора, построены и проанализированы эмпирические полиномиальные математические модели второго порядка, удовлетворяющие критериям ортогональности.

При трех сериях опытов с помощью ортогонального центрального композиционного эксперимента установили влияние конструктивно–технологических факторов (таблица 4.3):

- $x_1 - \alpha$ – угол наклона рамы бороны, град;
- $x_2 - v$ – скорость движения, м/с;
- $x_3 - h$ – глубина обработки почвы, см.

Результирующей функцией - $Y_1 - P$ – силовая нагрузка на задние движители трактора.

Таблица 4.3 – Условия проведения опытов при ортогональном центральном композиционном эксперименте

Факторы	x_1	x_2	x_3
Верхний уровень (+1)	8	2,6	21
Основной уровень (0)	4	2,4	18
Нижний уровень (–1)	0	2,2	15

Гипотезу об однородности дисперсии проверяли с помощью критерия Кохрена (рисунок 4.19).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y ₁	Y ₂	Y ₃	<Y _i >	S _T ²
2	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	22,1	22,08	22,09	22,09	0,0001
3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	23,2	23,1	23,3	23,2	0,01
4	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	24,1	24	24,2	24,1	0,01
5	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	25,3	25,4	25,2	25,3	0,01
6	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	24,4	24,5	24,3	24,4	0,01
7	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	25,5	25,4	25,6	25,5	0,01
8	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	25,4	25,3	25,4	25,36667	0,003333
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	26,7	26,6	26,65	26,65	0,0025
10	1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	22,7	22,8	22,6	22,7	0,01
11	1	1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	23,8	23,8	23,7	23,76667	0,003333
12	1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	21,4	21,3	21,4	21,36667	0,003333
13	1	0	1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	24,1	24	24,2	24,1	0,01
14	1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	23,1	23	23,1	23,06667	0,003333
15	1	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	24,2	24,1	24,2	24,16667	0,003333
16	1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	21,9	21,8	21,9	21,86667	0,003333
17	357,64	5,989333	9,547667	8,563167	0,273333	0,073333	2,430333	0,093333	4,300133	2,820133	5,4348	Σxi*ycp				ΣS _j ²
18	15	10,95245	10,95245	10,95245	8	8	8	8	4,3727	4,3727	4,3727	Σxi ²				S _j ² _{max}
19	22,79179	0,546849	0,871738	0,781849	0,034167	0,009167	0,303792	0,011667	0,983405	0,644941	1,242893	bi				G
20									0,000667	0,000667	0,000667					n-1
21	S _e ²	0,006173	S ² {b _{ij} }	0,008231	0,005636	0,011273	0,005636	0,007717	0,015433	0,007717	0,061733	0,014118	0,001412	0,001412		N
22	γ	0,95	S{b _{ij} }	0,090725	0,075077	0,106174	0,075077	0,087845	0,124231	0,087845	0,248462	0,118819	0,037574	0,037574		G _{cp}
23	f ₁	30	t _i	251,2171	7,283883	8,210446	10,41403	10,41403	0,038894	0,073787	3,458287	0,046956	8,276509	17,16465		G – G _{cp}
24	t _{cp}	2,04	t _{i-t_{cp}}	249,1771	5,243883	6,170446	8,374032	-2,00111	-2,00111	-1,96621	1,418287	-1,99304	6,236509	15,12465	Вывод	дисп.
25															(G < G _{cp})	однор.
26																

Рисунок 4.19 – Проверка воспроизводимости результатов исследования с помощью критерия Кохрена

Адекватность математической модели проверяли по F – критерию Фишера. Статистическая обработка полученных результатов рандомизированных опытов позволила получить уравнение регрессии [12].

$$Y(X_1, X_2, X_3) = b'_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2. \quad (4.2)$$

Статистическую значимость коэффициентов регрессии оценивали по критерию Стьюдента (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Проверка значимости коэффициентов регрессии

Коэффициенты регрессии	Численное значение	Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента			
		t_i	Табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{кр}$	$t_i - t_{кр}$	Проверка значимости
b'_0	22,79179	251,2171	2,0400	249,1771	Значимый
b_1	0,546849	7,283883	2,0400	5,243883	Значимый
b_2	0,871738	8,210446	2,0400	6,170446	Значимый
b_3	0,781849	10,41403	2,0400	8,374032	Значимый
b_{12}	0,034167	10,41403	2,0400	-2,00111	Незначимый
b_{13}	0,009167	0,038894	2,0400	-2,00111	Незначимый
b_{23}	0,303792	0,073787	2,0400	-1,96621	Незначимый
b_{123}	0,011667	3,458287	2,0400	1,418287	Значимый
b_{11}	0,983405	0,046956	2,0400	-1,99304	Незначимый
b_{22}	0,644941	8,276509	2,0400	6,236509	Значимый
b_{33}	1,242893	17,16465	2,0400	15,12465	Значимый

$$Y(X_1, X_2, X_3) = 22,79179 + 0,546849X_1 + 0,871738X_2 + 0,781849X_3 + 0,011667X_1X_2X_3 + 0,644941X_2^2 + 1,242893X_3^2. \quad (4.3)$$

В раскодированном виде уравнение (4.3) принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{\alpha-4}{4} = 0,25\alpha - 1 \\ X_2 &= \frac{v-2,4}{0,2} = 5v - 12 \\ X_3 &= \frac{h-18}{3} = 0,33h - 6 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

$$P(\alpha, v, h) = 22,79179 + 0,546849(0,25\alpha - 1) + 0,871738(5v - 12) + 0,781849(0,33h - 6) + 0,011667(0,25\alpha - 1)(5v - 12)(0,33h - 6) + 0,644941(5v - 12)^2 + 1,242893(0,33h - 6)^2 \quad (4.4)$$

Проведя ряд математических преобразований уравнение (4.4) принимает вид:

$$P(\alpha, v, h) = 145,9 - 75,45v + 0,04v\alpha h + 16v^2 + 0,135h^2 -$$

$$-0,0165hv + 0,99h\alpha \quad (4.5)$$

При фиксированном значении угла наклона рамы бороны $\alpha = 4$ град силовая нагрузка на задние движители трактора определяется уравнением (4.6).

$$P(v, h) = 151,2 + 16v^2 - 75,45v + 0,143vh - 4,96h + 0,135h^2 \quad (4.6)$$

Графическая визуализация уравнения (4.6) представлена на рисунке 4.20.

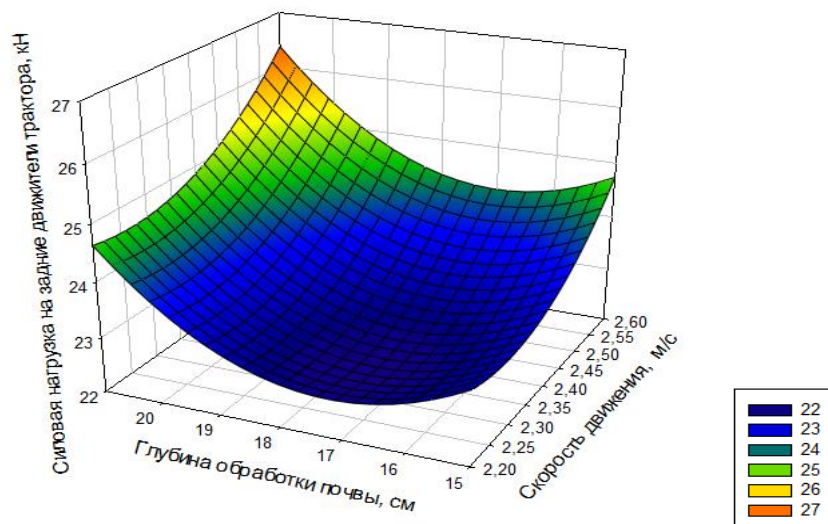


Рисунок 4.20 – Поверхность отклика силовой нагрузки на задние движители трактора при фиксированном значении угла наклона рамы бороны $\alpha = 4$ град от скорости движения и глубины обработки почвы

Экспериментальные исследования показали (рисунок 4.20), что наибольшее увеличение нагрузки на задние движители трактора фиксируется при скорости движения 2,55 м/с и может превышать исходное значение на 18%. Увеличение глубины обработки почвы в заданном диапазоне позволяет повышать силовую нагрузку на задние движители трактора от 22,6 кН до 25,4 кН. Одновременное увеличение воздействующих факторов приводит к повышению силовой нагрузки на задние движители трактора до 22,9%.

Силовая нагрузка на задние движители трактора при фиксированном значении скорости движения ($v = 2,4$ м/с) имеет зависимость (4.7)

$$P(\alpha, h) = 56,98 + 0,096\alpha h + 0,135h^2 - 0,0396h + 0,99h\alpha \quad (4.7)$$

Геометрическая интерпретация уравнения (4.7) представлена на рисунке 4.21.

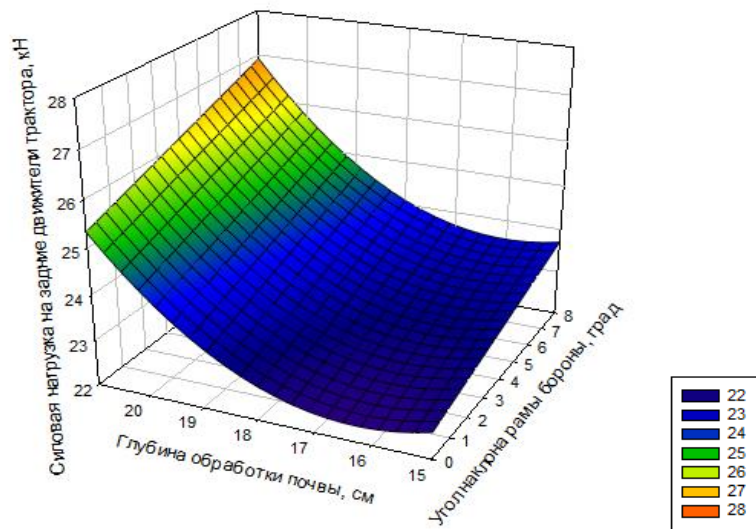


Рисунок 4.21 – Поверхность отклика силовой нагрузки на задние движители трактора при фиксированном значении скорости движения ($v = 2,4$ м/с) от угла наклона рамы бороны и глубины обработки почвы

При фиксированной скорости движения эксплуатация предлагаемого устройства позволяет увеличить силовое воздействие на задние движители трактора - 22,4 кН до 25,5 кН при изменении глубины обработки почвы от 15 см до 21 см. Повышение угла наклона рамы бороны в исследуемом интервале имеет параболическую зависимость и позволяет увеличить силовую нагрузку на задние движители трактора до 19 %.

Уравнение регрессии силовой нагрузки на задние движители трактора при фиксированном значении глубины обработки почвы ($h = 18$ см) имеет вид [12]:

$$P(\alpha, v) = 85,64 + 0,0022\alpha v - 79,35v + 16v^2 + 0,192\alpha \quad (4.8)$$

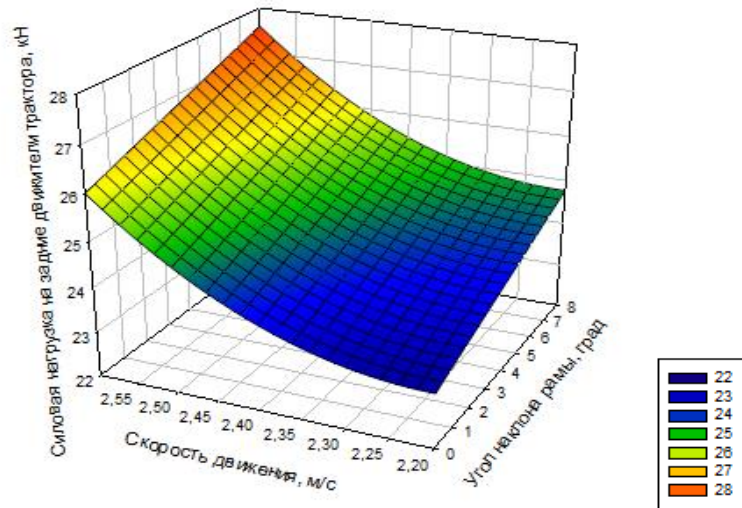


Рисунок 4.22 – Поверхность отклика силовой нагрузки на задние движители трактора при фиксированном значении глубины обработки почвы ($h = 18$ см) от угла наклона рамы бороны и скорости движения

Анализируя полученные данные, необходимо отметить, что при фиксированном значении глубины обработки почвы увеличение скорости движения до 2,6 м/с позволяет повысить нагрузку на задние движители трактора на 11% и регулировать глубину обработки почвы в заданном диапазоне.

Для выявления воздействия конструктивно–технологических параметров предлагаемого технического решения на сцепной вес, приходящийся на задние опорные поверхности (движители) трактора МТЗ-82, построены и проанализированы эмпирические полиномиальные математические модели второго порядка, удовлетворяющие критериям ортогональности.

При трех сериях опытов с помощью ортогонального центрального композиционного эксперимента установили влияние конструктивно–технологических факторов на силовое воздействие, приходящегося на задние движители трактора МТЗ-82 (таблица 4.5):

- x_1 – L – длина выхода штока гидроцилиндра, м;
- x_2 – v – скорость движения, м/с;
- x_3 – h – глубина обработки почвы, см.

Результирующей функцией является

- $Y_1 - P$ – силовая нагрузка на задние движители трактор, кН.

Таблица 4.5 – Условия проведения опытов при ортогональном центральном композиционном эксперименте

Факторы	x_1	x_2	x_3
Верхний уровень (+1)	0,33	2,6	21
Основной уровень (0)	0,27	2,4	18
Нижний уровень (-1)	0,21	2,2	15

Для проверки предположения о равенстве дисперсий применялся тест Кохрена (рисунок 4.23).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	X0	X1	X2	X3	X1 X2	X1 X3	X2 X3	X1 X2 X3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y_1	Y_2	Y_3	$<Y_i>$	S_e^2
2	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	22,1	22,08	22,09	22,085	5E-05
3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	30,2	30,1	30,3	30,2	0,01
4	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	24,1	24	24,2	24,1	0,01
5	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	31,3	31,4	31,2	31,3	0,01
6	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	24,4	24,5	24,3	24,4	0,01
7	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	30,5	30,4	30,6	30,5	0,01
8	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	25,4	25,3	25,4	25,36667	0,003333
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	33,2	33,1	33,1	33,13333	0,003333
10	1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	22,7	22,8	22,6	22,7	0,01
11	1	1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	23,8	23,8	23,7	23,76667	0,003333
12	1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	21,4	21,3	21,4	21,36667	0,003333
13	1	0	1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	24,1	24	24,2	24,1	0,01
14	1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	23,1	23	23,1	23,06667	0,003333
15	1	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	24,2	24,1	24,2	24,16667	0,003333
16	1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	21,9	21,8	21,9	21,86667	0,003333
17	382,1183	30,47767	10,036	7,0515	0,751667	-1,44833	3,15425	2,581667	10,90928	9,429283	12,04395	$\sum x_i \cdot y_{\text{ср}}$			$\sum S_j^2$	0,003333
18	15	10,95245	10,95245	10,95245	8	8	8	8	4,3727	4,3727	4,3727	$\sum x_i^2$			$S_j^2 \text{ max}$	0,01
19	22,7641	2,782726	0,916325	0,643829	0,093958	-0,18104	0,394281	0,322708	2,494862	2,156398	2,754351	bi			G	0,107085
20									0,000667	0,000667	0,000667				n-1	2
21	S_e^2	0,006226	$S^2\{b_{ij}\}$	0,008301	0,005684	0,011368	0,005684	0,007782	0,015564	0,007782	0,062256	0,014237	0,001424	0,001424	N	15
22	γ	0,95	$S\{b_{ij}\}$	0,091108	0,075393	0,106622	0,075393	0,088215	0,124755	0,088215	0,249511	0,11932	0,037732	0,037732	$G_{\text{ср}}$	0,3346
23	f_1	30	t_i	249,8573	36,9094	8,594111	8,539586	8,539586	0,10651	1,451174	4,469532	1,293365	20,90895	57,14981	$G - G_{\text{ср}}$	-0,22751
24	$t_{\text{кр}}$	2,04	$t_i - t_{\text{ср}}$	247,8173	34,8694	6,554111	6,499586	-1,93349	-1,93349	-0,58883	2,429532	-0,74663	18,86895	55,10981	Выход	дисп.
25															$(G < G_{\text{ср}})$	однор.
26																
27																

Рисунок 4.23 – Проверка воспроизводимости результатов исследования с помощью критерия Кохрена

Значимость коэффициентов регрессионной модели определялась с использованием t-критерия Стьюдента, а соответствие модели экспериментальным данным оценивалось посредством F-теста Фишера (таблица 4.6) [12].

Таблица 4.6 – Проверка значимости коэффициентов регрессии

Коэффициенты регрессии	Численное значение	Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента			
		t_i	Табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{кр}$	$t_i - t_{кр}$	Проверка значимости
b'_0	22,7641	249,8573	2,0400	247,8173	Значимый
b_1	2,782726	36,9094	2,0400	34,8694	Значимый
b_2	0,916325	8,594111	2,0400	6,554111	Значимый
b_3	0,643829	8,539586	2,0400	6,499586	Значимый
b_{12}	0,093958	8,539586	2,0400	-1,93349	Незначимый
b_{13}	-0,18104	0,10651	2,0400	-1,93349	Незначимый
b_{23}	0,394281	1,451174	2,0400	-0,58883	Незначимый
b_{123}	0,322708	4,469532	2,0400	2,429532	Значимый
b_{11}	2,494862	20,90895	2,0400	-0,74663	Незначимый
b_{22}	2,156398	1,293365	2,0400	18,86895	Значимый
b_{33}	2,754351	57,14981	2,0400	55,10981	Значимый

На основе статистического анализа данных рандомизированных экспериментов было построено итоговое регрессионное уравнение

$$Y(X_1, X_2, X_3) = b'_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (4.9)$$

С учетом значимости коэффициентов полинома уравнение (4.9) принимает вид:

$$Y(X_1, X_2, X_3) = 22,7641 + 2,782726X_1 + 0,916325X_2 + 0,643829X_3 + 0,322708X_1X_2X_3 + 2,156398X_2^2 + 2,754351X_3^2 \quad (4.10)$$

Проведем раскодирование переменных факторов уравнения (4.10) с учетом

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{L-0,27}{0,06} = 16,67L - 0,21 \\ X_2 &= \frac{v-2,4}{0,2} = 5v - 12 \\ X_3 &= \frac{h-18}{3} = 0,33h - 6 \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

$$Y(L, v, h) = 22,7641 + 2,782726(16,67L - 0,21) + 0,916325(5v - 12) + 0,643829(0,33h - 6) + 0,322708(16,67L - 0,21)(5v - 12)(0,33h - 6) + 2,156398(5v - 12)^2 + 2,754351(0,33h - 6)^2 \quad (4.12)$$

Путем ряда выкладок уравнение сводится к следующему выражению

$$Y(L, v, h) = 101,7081 + 416,2476L + 6,6146v - 10,4263h + 693,2955L^2 + 0,2999h^2 - 161,3863Lv - 21,3030Lh - 0,1118vh + 8,8762Lvh. \quad (4.13)$$

Зависимость силовой нагрузки, приходящейся на задние движители трактора, от рассматриваемых факторов при постоянной скорости ($v=2,4$ м/с) представлена формулой (4.14).

$$Y(L, v) = 10,9141 + 32,7976L + 4,6146v + 693,2955L^2 - 1,6183Lv \quad (4.14)$$

Графическая визуализация уравнения (4.14) представлена на рисунке 4.24.

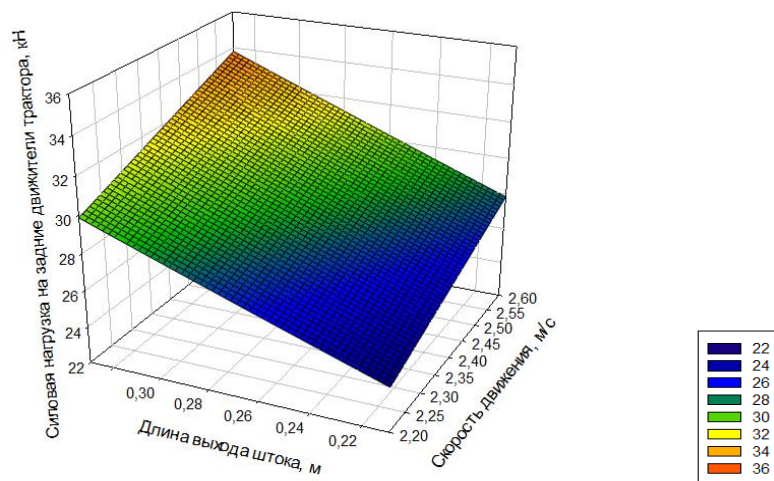


Рисунок 4.24 – Влияние скорости движения и рабочего хода штока гидроцилиндра на тяговое усилие задних движителей трактора при глубине обработки почвы $h=18$ см

Согласно результатам экспериментальных исследований (рисунок 4.24), максимальный рост нагрузки на задние движители трактора наблюдается при скорости движения 2,60 м/с и достигает 17 % относительно базового значения. При увеличении длины выхода штока в пределах изученного диапазона силовая нагрузка на задние движители возрастает с 22,9 кН до 30,1 кН. Совместное действие рассматриваемых факторов способствует дополнительному повышению

нагрузки на задние движители — до 32,9% по сравнению с исходными показателями.

При скорости движения, составляющей $v=2,4$ м/с, зависимость (регрессионная модель) силовой нагрузки на задние движители трактора описывается следующим уравнением:

$$Y(L, h) = 117,5817 + 28,92048L - 10,6946h + 693,2955L^2 + 0,2999h^2 + 0,10302Lh \quad (4.15)$$

На рисунке 4.25 показано графическое представление уравнения (4.15).

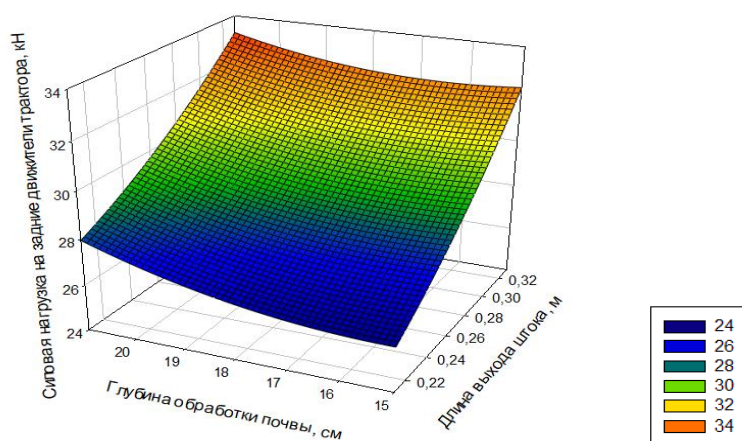


Рисунок 4.25 – Влияние глубины обработки и рабочего хода штока гидроцилиндра на тяговое усилие задних движителей трактора при постоянной скорости $v=2,4$ м/с

При фиксированной скорости (2,4 м/с) увеличение глубины обработки с 15 см до 21 см обеспечивает рост нагрузки с 24,8 кН до 25,5 кН. В исследуемом диапазоне увеличение длины выхода штока гидроцилиндра носит параболический характер, что позволяет повысить нагрузку на задние движители трактора на величину до 20 %.

При зафиксированной значении длины выхода штока гидроцилиндра $L=0,27$ м регрессионная зависимость (4.13) для определения силовой нагрузки на задние движители трактора имеет следующую математическую форму [12]:

$$Y(v, h) = 264,6362 - 36,9597v - 16,1781h + 0,2999h^2 + 2,2848vh. \quad (4.16)$$

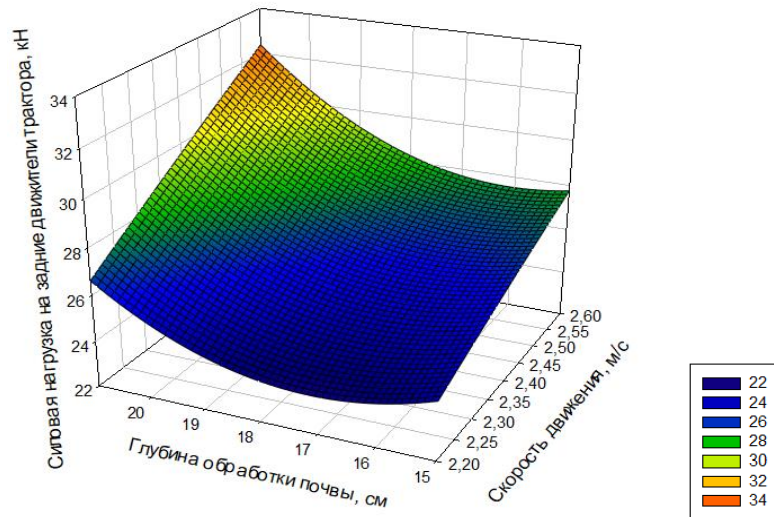


Рисунок 4.26 – Влияние глубины обработки и скорости движения на силовую нагрузку задних движителей трактора при фиксированном выходе штока гидроцилиндра

При фиксированном ходе штока (0,27 м) увеличение скорости до 2,6 м/с повышает нагрузку на задние движители на 17%, при этом сохраняется возможность регулирования глубины хода рабочих органов в заданном диапазоне.

Далее целесообразно провести регрессионно-дисперсионный анализ результатов исследований по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки на передние опорные поверхности энергетического средства (длина выхода штока гидроцилиндра) [16].

Для более детального анализа влияния конструктивно-технологических параметров на силовую нагрузку, приходящуюся на передний мост трактора, использовалась методика полного факторного эксперимента. При проведении опытов установили влияние конструктивно-технологических факторов (таблица 4.7):

- x_1 – a – длина выхода штока гидроцилиндра, м;
- x_2 – v – скорость движения, м/с;
- x_3 – h – глубина обработки почвы, м.

Результирующей функцией:

- Y_1 – P – силовая нагрузка на передние движители трактора, кН.

Таблица 4.7 – Условия проведения опытов при ортогональном центральном композиционном эксперименте

Факторы	x_1	x_2	x_3
Верхний уровень (+1)	0,37	2,6	0,21
Основной уровень (0)	0,29	2,4	0,18
Нижний уровень (-1)	0,21	2,2	0,15

Статистическая обработка полученных экспериментальных данных представлена в рисунок 4.27.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	X0	X 1	X 2	X 3	X 1 X 2	X 1 X 3	X 2 X 3	X 1 X 2 X 3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y_1	Y_2	Y_3	$< Y_r >$	S_r^2
2	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	15,6	15,5	15,7	15,6	0,02
3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	11,7	11,6	11,5	11,6	0,01
4	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	14,1	14	14,2	14,1	0,01
5	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	13,3	13,4	13,2	13,3	0,01
6	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	15,4	15,5	15,3	15,4	0,01
7	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	13,5	13,4	13,6	13,5	0,01
8	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	12,4	12,3	12,4	12,36667	0,003333
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	11,2	11,1	11,1	11,13333	0,003333
10	1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	14,7	14,8	14,6	14,7	0,01
11	1	1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	12,8	12,8	12,7	12,76667	0,003333
12	1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	13,4	13,3	13,4	13,36667	0,003333
13	1	0	1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	14,1	14,3	14,2	14,2	0,01
14	1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	13,1	13	13,1	13,06667	0,003333
15	1	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	14,2	14,1	14,2	14,16667	0,003333
16	1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	13,9	13,8	13,9	13,86667	0,003333
17	203,1333	-10,2823	-4,1875	-0,8635	3,866667	1,666667	1,05	-2,53333	-0,63667	-0,48867	-0,982	$\sum x_i \cdot y_{ср}$			$\sum S_j^2$	0,113333
18	15	10,95245	10,95245	10,95245	8	8	8	8	4,3727	4,3727	4,3727	$\sum x_i^2$			$S_j^2_{max}$	0,02
19	13,71861	-0,93882	-0,38233	-0,07884	0,483333	0,208333	0,13125	-0,31667	-0,1456	-0,11175	-0,22458	$\sum bi$			G	0,176471
20									0,000667	0,000667	0,000667				n-1	2
21	$S_{x_i}^2$	0,007556	$S^2\{b_i\}$	0,010074	0,006899	0,013797	0,006899	0,009444	0,018889	0,009444	0,075556	0,017279	0,001728	0,001728	N	15
22	γ	0,95	$S\{b_i\}$	0,10037	0,083057	0,117461	0,083057	0,097183	0,137437	0,097183	0,274874	0,131449	0,041568	0,041568	$G_{ср}$	0,3346
23	f_i	30	t_i	136,6808	11,30324	3,255	0,949234	0,949234	0,497346	1,515848	1,350551	1,152044	1,107654	2,688467	$G - G_{ср}$	-0,15813
24	$ткр$	2,04	$t_{f-ткр}$	134,6408	9,263237	1,215	-1,09077	-1,54265	-1,54265	-0,52415	-0,68945	-0,88796	-0,93235	0,648467	Выход	дисп.
25															$(G < G_{ср})$	одноф.
26																

Рисунок 4.27 – Проверка воспроизводимости результатов исследования с помощью критерия Кохрена

Однородность дисперсий подтверждена критерием Кохрена [12]. На основе регрессионного анализа построена математическая модель:

$$f(X_1, X_2, X_3) = b'_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 \quad (4.17)$$

Значимость регрессионных коэффициентов установлена по критерию Стьюдента (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Проверка значимости коэффициентов регрессии

Коэффициенты регрессии	Численное значение	Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента			
		t_i	Табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{кр}$	$t_i - t_{кр}$	Проверка значимости
b'_0	13,71861	136,6808	2,0400	134,6408	Значимый
b_1	-0,93882	11,30324	2,0400	9,263237	Значимый
b_2	-0,38233	3,255	2,0400	1,215	Значимый
b_3	-0,07884	0,949234	2,0400	-1,09077	Незначимый
b_{12}	0,483333	0,949234	2,0400	-1,54265	Незначимый
b_{13}	0,208333	0,497346	2,0400	-1,54265	Незначимый
b_{23}	0,13125	1,515848	2,0400	-0,52415	Незначимый
b_{123}	-0,31667	1,350551	2,0400	-0,68945	Незначимый
b_{11}	-0,1456	11,15204	2,0400	9,132044	Значимый
b_{22}	-0,11175	12,10765	2,0400	10,067654	Значимый
b_{33}	-0,22458	2,688467	2,0400	0,648467	Значимый

Адекватность модели – по критерию Фишера. В результате статистической обработки данных рандомизированных опытов выведено уравнение регрессии

$$f(X_1, X_2, X_3) = 13,71861 + 0,93882X_1 + 0,38233X_2 - 0,1456X_1^2 - 0,11175X_2^2 - 0,22458X_3^2 \quad (4.18)$$

В раскодированном виде

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{a-0,29}{0,08} = 12,5a - 3,625; \\ X_2 &= \frac{v-2,4}{0,2} = 5v - 12; \\ X_3 &= \frac{h-0,18}{0,03} = 33,3h - 6. \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

$$f(a, v, h) = 13,71861 + 0,93882(12,5a - 3,625) + 0,38233(5v - 12) - 0,1456(12,5a - 3,625)^2 - 0,11175(5v - 12)^2 - 0,22458(33,3h - 6)^2 \quad (4.20)$$

После выполнения соответствующих преобразований уравнение имеет вид

$$f(a, v, h) = -22,75a^2 + 24,93025a - 2,79375v^2 + 15,32165v - 249,03452h^2 + 89,74217h - 20,36273 \quad (4.21)$$

Функциональная зависимость силовая нагрузка на передние движители трактора, от исследуемых факторов при постоянной скорости ($v=2,4$ м/с) представлена формулой

$$f(a, h) = -22,75a^2 + 24,93025a - 249,03452h^2 + 89,74217h - 21,13308 \quad (4.22)$$

На рисунке 4.28 показано графическое представление уравнения (4.22) при фиксированной скорости движения трактора.

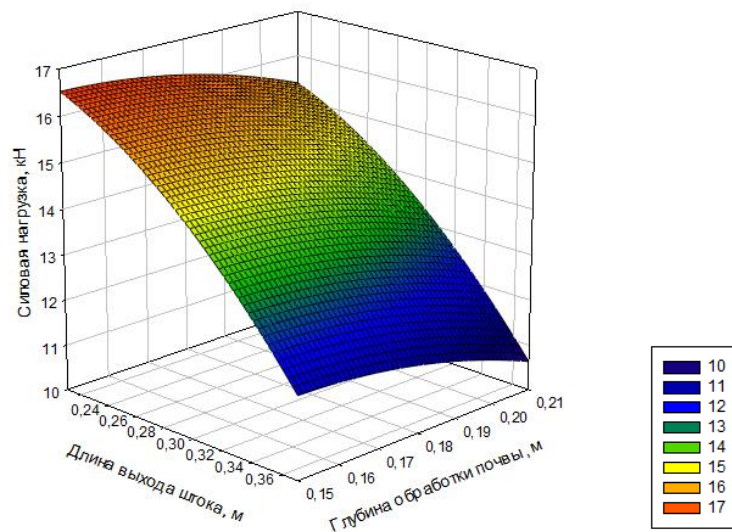


Рисунок 4.28 – Анализ изменения нагрузки на передние движители трактора в зависимости от глубины вспашки и степени выдвижения штока гидроцилиндра (скорость движения зафиксирована на уровне $v=2,4$ м/с)

Согласно результатам экспериментов (рисунок 4.28), максимальное снижение усилия на передние движители трактора наблюдается при длине выхода штока гидроцилиндра 0,36 м и достигает 37% относительно базовых показателей. Возможность регулирования глубины обработки почвы в заданных параметрах сохраняется при фиксированном значении этого показателя, при глубине обработки почвы в диапазоне от 0,15 м до 0,18 м фиксируется стабильная нагрузка на передние движители трактора.

При установленной длине выдвижения штока гидроцилиндра $a = 0,29$ м зависимость силовой нагрузки на передние движители трактора определяется выражением (4.23).

$$f(v, h) = -2,79375v^2 + 15,32165v - 249,03452h^2 + 89,74217h - 15,04603 \quad (4.23)$$

На рисунке 4.29 приведено визуальное отображение зависимости, описываемой уравнением (4.22).

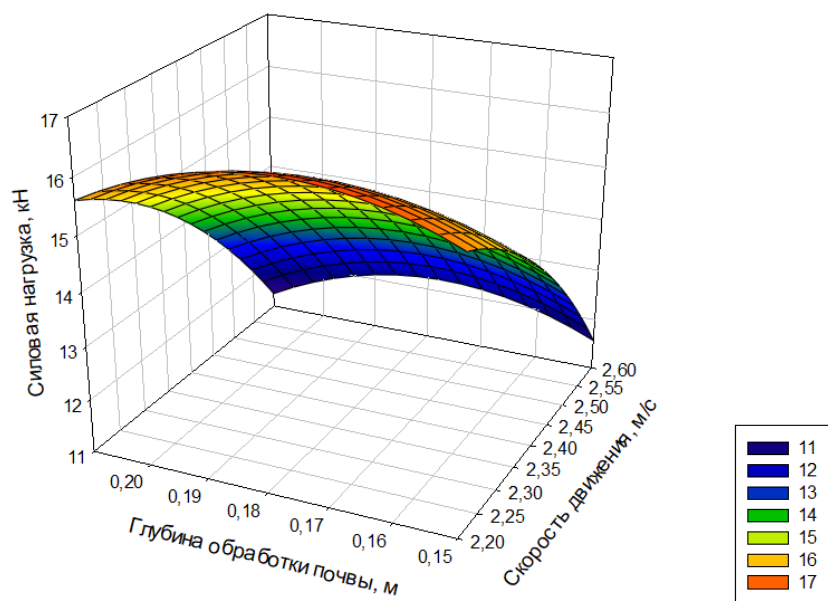


Рисунок 4.29 – Анализ изменения нагрузки на передние движители трактора в зависимости от глубины вспашки и скорости движения (степень выдвижения штока гидроцилиндра зафиксирована на уровне $a = 0,29$ м)

На основе проведённого анализа установлено, что при неизменной длине хода штока гидроцилиндра предлагаемого устройства повышение скорости движения трактора до 2,6 м/с способствует снижению нагрузки на передние движители трактора до 32% и обеспечивает возможность точной настройки глубины почвообработки в требуемых пределах.

Уравнение, аппроксимирующее влияние факторов на силовую нагрузку передних движителей трактора при неизменном значении глубины обработки почвы $h = 0,18\text{м}$, записывается следующим образом:

$$f(a, v) = -22,75a^2 + 24,93025a - 2,79375v^2 + 15,32165v - 12,2744 \quad (4.24)$$

На рисунке 4.30 показано графическое представление уравнения (4.24) при фиксированном значении глубины обработки почвы.

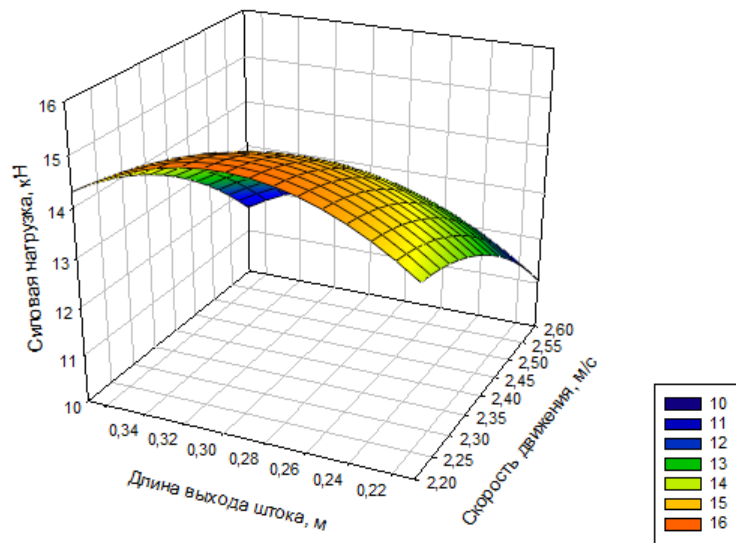


Рисунок 4.30 – Анализ изменения нагрузки на передние движители трактора в зависимости от степени выдвижения штока гидроцилиндра и скорости движения (глубина вспашки зафиксирована на уровне $h = 0,18\text{м}$)

Результаты исследования показывают: при неизменной глубине обработки увеличение скорости передвижения до 2,6 м/с даёт двоякий эффект - нагрузка на передние движители снижается на 18%, при этом сохраняется возможность регулирования глубины хода рабочих органов в заданном диапазоне. Увеличение степени выдвижения штока гидроцилиндра в исследуемом диапазоне дополнительно обеспечивает уменьшение нагрузки на передние движители трактора на 18%.

Для более детального анализа влияния конструктивно-технологических параметров на силовую нагрузку, приходящуюся на передний ведущий мост

трактора использовалась методика полного факторного эксперимента [12]. При проведении опытов установили влияние конструктивно–технологических факторов (таблица 4.9):

- x_1 – α – угол наклона рамы бороны, град;
- x_2 – v – скорость движения, м/с;
- x_3 – h – глубина обработки почвы, м.

Результирующей функцией:

- Y_1 – P – силовая нагрузка на передние ведущие движители трактора, кН.

Таблица 4.9 – Условия проведения опытов при ортогональном центральном композиционном эксперименте

Факторы	x_1	x_2	x_3
Верхний уровень (+1)	12	2,6	0,21
Основной уровень (0)	6	2,4	0,18
Нижний уровень (–1)	0,0	2,2	0,15

Статистическая обработка полученных экспериментальных данных представлена в рисунок 4.31.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	X0	X 1	X 2	X 3	X 1 X 2	X 1 X 3	X 2 X 3	X 1 X 2 X 3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y_1	Y_2	Y_3	$< Y_i >$	S_T^2
2	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	16,1	16,08	16,09	16,085	5E-05
3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	18,2	18,4	18,3	18,3	0,01
4	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	17,1	17	17,2	17,1	0,01
5	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	16,9	16,8	16,7	16,8	0,01
6	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	15,4	15,5	15,3	15,4	0,01
7	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	17,5	17,4	17,6	17,5	0,01
8	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	16,4	16,3	16,4	16,3667	0,003333
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	17,2	17,1	17,1	17,13333	0,003333
10	1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	15,7	15,8	15,6	15,7	0,01
11	1	1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	18,8	18,8	18,7	18,7667	0,003333
12	1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	16,4	16,3	16,4	16,3667	0,003333
13	1	0	1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	17,1	17	17,2	17,1	0,01
14	1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	17,1	17	17,1	17,0667	0,003333
15	1	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	16,8	16,7	16,9	16,8	0,01
16	1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	17,9	17,8	17,9	17,8667	0,003333
17	254,3517	8,507667	1,006	-2,209	-3,84833	0,951667	1,73425	1,181667	0,01895	-1,46105	-0,86905	Σxi^*ycp			ΣS_j^2	0,10005
18	15	10,95245	10,95245	10,95245	8	8	8	8	4,3727	4,3727	4,3727	Σxi^2			$S_j^2_{max}$	0,01
19	17,15022	0,776782	0,091852	-0,20169	-0,48104	0,118958	0,216781	0,147708	0,004334	-0,33413	-0,19874	bi			G	0,09995
20									0,000667	0,000667	0,000667				n-1	2
21	S_y^2	0,00667	$S^2\{b_i\}$	0,008893	0,00609	0,01218	0,00609	0,008337	0,016675	0,008337	0,0667	0,015254	0,001525	0,001525	N	15
22	γ	0,95	$S\{b_i\}$	0,094304	0,078038	0,110363	0,078038	0,09131	0,129132	0,09131	0,258263	0,123506	0,039056	0,039056	G_{xp}	0,3346
23	f_i	30	t_i	181,8601	9,953869	0,83227	2,584504	2,584504	0,526823	0,921217	2,374126	0,571929	0,035089	8,555144	$G - G_{xp}$	-0,23465
24	txp	2,04	$t_i - t_{xp}$	179,8201	7,913869	-1,20773	0,544504	-1,51318	-1,51318	-1,11878	0,334126	-1,46807	-2,00491	6,515144	$S_{выб}$	дисп.
25															$(G < G_{xp})$	однор.

Рисунок 4.31 – Проверка воспроизводимости результатов исследования с помощью критерия Кохрена

Адекватность модели определялась через F-критерий Фишера. Итогом статистического анализа данных, полученных в ходе рандомизированных экспериментов, стало построение регрессионного уравнения

$$Y(X_1, X_2, X_3) = a'_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{123}X_1X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 \quad (4.25)$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{\alpha-6}{6} = 0,167\alpha - 1; \\ X_2 &= \frac{v-2,4}{0,2} = 5v - 12; \\ X_3 &= \frac{h-18}{3} = 0,33h - 6. \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

Значимость коэффициентов для определения степени влияния различных факторов на выходной параметр оценивалось по критерию Стьюдента. Коэффициент является значимый при выполнении условия $t < t_{p,n}$ (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента

Коэффициенты регрессии	Численное значение	t_i	Табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{кр}$	$t_i - t_{кр}$	Проверка значимости
b'_0	17,15022	181,8601	2,0400	179,8201	Значимый
b_1	0,776782	9,953869	2,0400	7,913869	Значимый
b_2	0,091852	0,83227	2,0400	-1,20773	Незначимый
b_3	-0,20169	2,584504	2,0400	0,544504	Значимый
b_{12}	-0,48104	2,584504	2,0400	-1,51318	Незначимый
b_{13}	0,118958	0,526823	2,0400	-1,51318	Незначимый
b_{23}	0,216781	0,921217	2,0400	-1,11878	Незначимый
b_{123}	0,147708	2,374126	2,0400	0,334126	Значимый
b_{11}	0,4334	5,571929	2,0400	3,531929	Значимый
b_{22}	-0,33413	4,235089	2,0400	2,195089	Значимый
b_{33}	-0,19874	8,555144	2,0400	6,515144	Значимый

С учетом регрессионных коэффициентов уравнение (4.25) принимает вид

$$Y(X_1, X_2, X_3) = 17,15022 + 0,776782X_1 - 0,20169X_3 + 0,147708X_1X_2X_3 + 0,4334X_1^2 - 0,33413X_2^2 + -0,19874X_3^2 \quad (4.27)$$

В раскодированном виде:

$$Y(\alpha, v, h) = 17,15022 + 0,776782(0,167\alpha - 1) - 0,20169(0,33h - 6) + 0,147708(0,167\alpha - 1)(0,33h - 6)(5v - 12) + 0,4334(0,167\alpha - 1)^2 - 0,33413(5v - 12)^2 + -0,19874(0,33h - 6)^2 \quad (4.28)$$

После выполнения соответствующих преобразований уравнение (4.28) можно записать:

$$Y(\alpha, v, h) = 0,012087\alpha^2 - 0,021643h^2 - 8,35325v^2 + 0,040701\alpha hv - 0,097682\alpha h - 0,740017\alpha v - 0,243718hv + 1,761008\alpha + 1,305376h + 44,52684v - 47,887358. \quad (4.29)$$

Уравнение (4.29) имеет вид:

- при фиксированном угле наклона рамы бороны $\alpha = 6$ град

$$Y(v, h) = -0,021643h^2 - 8,35325v^2 + 0,7192h + 40,08673v - 36,886; \quad (4.30)$$

- при фиксированной скорости движения трактора $v=2,4$ м/с

$$Y(\alpha, h) = 0,01208\alpha^2 - 0,02164h^2 - 8,3532v^2 + 0,0407\alpha hv - 0,0976\alpha h - 0,74001\alpha v - 0,24371hv + 1,76101\alpha + 1,3056h + 44,526v - 47,887 \quad (4.31)$$

- при фиксированной глубине обработки почвы $h=0,18$ м

$$Y(\alpha, v) = 0,01208\alpha^2 - 8,353v^2 - 0,7326\alpha v + 1,743\alpha + 44,48v - 47,653 \quad (4.32)$$

Рисунок 4.32 иллюстрирует результаты расчёта по уравнениям (4.30-4.32)

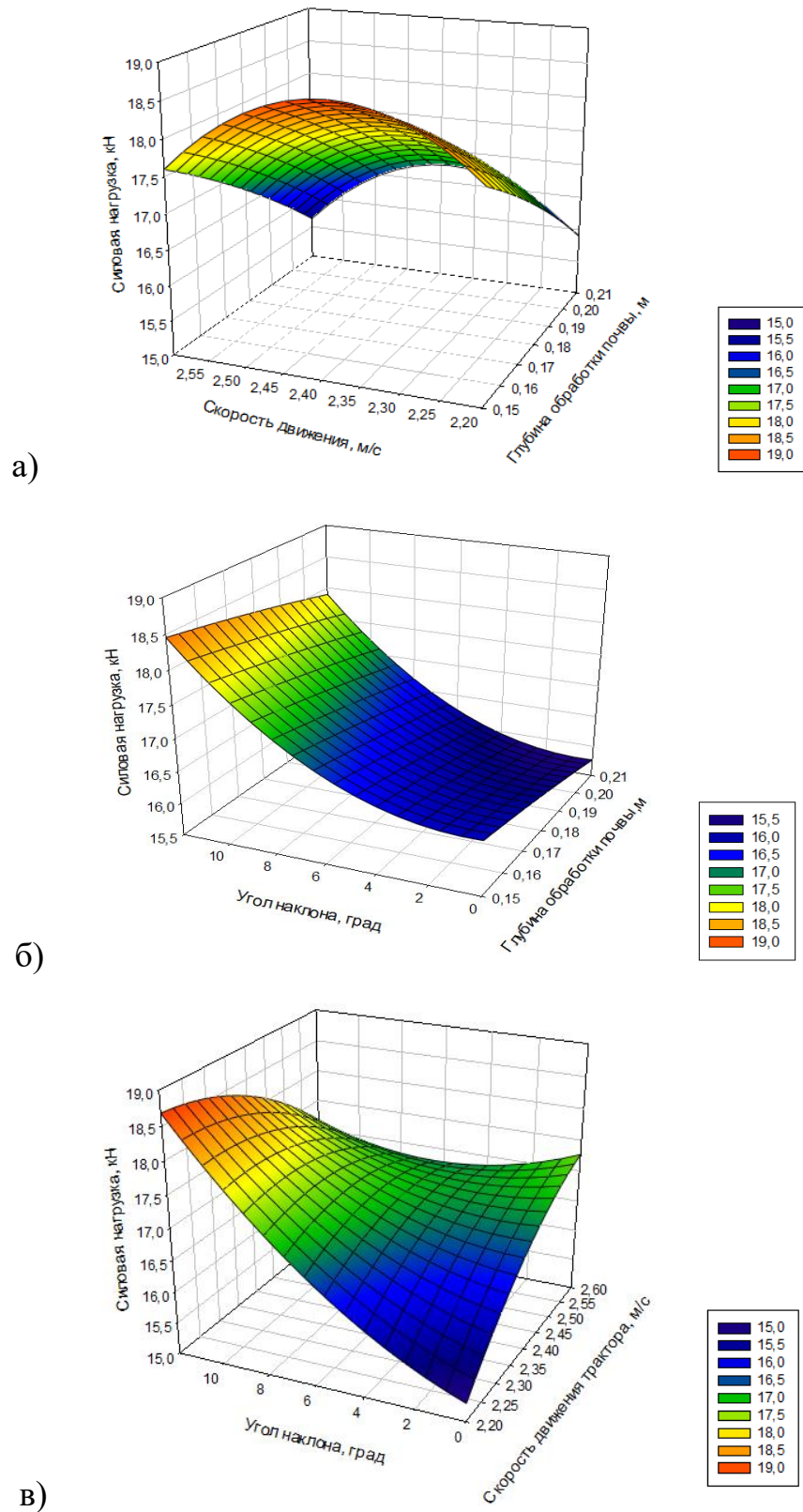


Рисунок 4.32 – Графическая интерпретация зависимости силового воздействия на передние колеса трактора «Беларус-82.1»

На рисунке 4.32 отображены следующие зависимости силового воздействия на передние колеса трактора «Беларус-82.1»:

а) от скорости движения трактора и глубины обработки почвы при угле наклона рамы бороны ($\alpha=6$ град);

б) от угла наклона рамы бороны и глубины обработки почвы при скорости перемещения агрегата ($v=2,4$ м/с);

в) от скорости перемещения трактора и угла наклона рамы бороны при глубине хода рабочих органов ($h=0,18$ м).

Анализ графиков, представленных на рисунке 4.32, позволяет выявить ключевые закономерности, характерные для исследуемого процесса:

- при фиксированном угле наклона рамы бороны $\alpha=6$ град силовое воздействие на передние колеса трактора «Беларус-82.1» возрастает с 17,3 кН при скорости движения трактора 2,2 м/с и достигает максимального значения 18,3 кН при скорости движения 2,45 м/с. Дальнейшее увеличение скорости движения трактора в исследуемом диапазоне приводит к снижению силового воздействия на передние колеса трактора «Беларус-82.1» на 7%. Силовое воздействие на передние колеса трактора «Беларус-82.1» снижается на 11% параболически при увеличении глубины обработки почвы;

- при условии постоянной скорости перемещения агрегата ($v=2,4$ м/с) внедрение разработанного устройства позволяет нарастить усилие на передних движителях на 16 %. Абсолютные значения изменились с 15,8 до 18,4 кН при варьировании глубины вспашки в пределах 0,15–0,21 м. В то же время, увеличение скоростного режима в заданных границах демонстрирует обратную зависимость: нагрузка на переднюю ось трактора «Беларус-82.1» уменьшается на 6%.

- В ходе экспериментальных исследований при стабилизированной глубине хода рабочих органов ($h=0,18$ м) было выявлено, что максимальный прирост нагрузки на передние опорные элементы трактора (достигающий 20%) наблюдается в режиме движения со скоростью 2,2 м/с и угле наклона рамы, равном 12° . Дальнейшее увеличение скорости движения трактора и угла наклона рамы бороны приводят к суммарному снижению нагрузки до 7%. В исследуемом

интервале рост скорости движения трактора подчиняется параболической зависимости.

Для определения влияния конструктивно–технологических параметров корректора-распределителя силовой нагрузки на величину нагрузки приходящейся на рабочие органы бороны определены основные факторы, влияющие на критерии оптимизации изучаемого процесса, а также уровни их варьирования (от угла наклона секции бороны).

Факторами были выбраны $x_1 - \alpha$, $x_2 - v$ и $x_3 - h$. Результирующей функцией выбрана $Y_1 - P$, где:

- α – угол наклона рамы бороны, град;
- v – скорость движения, м/с;
- h – глубина обработки почвы, см.
- P – силовая нагрузка на исполнительные (рабочие) органы бороны, кН.

Предварительные исследования показали, что функции отклика исследуемых входных факторов имеют три уровня варьирования (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Факторы и уровни их варьирования

Факторы	x_1	x_2	x_3
Верхний уровень (+1)	12	2,6	21
Основной уровень (0)	6	2,4	18
Нижний уровень (–1)	0	2,2	15

Точность прогнозирования и моделирования нагрузочных характеристик корректора-распределителя силовой нагрузки прицепной бороны обеспечивается применением регрессионных зависимостей, установленных экспериментальным путем. Данный подход эффективен благодаря возможности всестороннего описания объекта исследования при неукоснительном следовании протоколу активного эксперимента. Для выработки дальнейшей стратегии исследований и построения математической модели процесса был применен метод полного факторного эксперимента. В ходе исследования проверка гипотезы о гомогенности дисперсий осуществлялась с применением критерия Кохрена (рисунок 4.33).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y ₁	Y ₂	Y ₃	<Y _r >	S _r ²
2	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	8,1	8,08	8,09	8,09	1E-04
3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	10,2	10,1	10,3	10,2	0,01
4	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	9,1	9	9,2	9,1	0,01
5	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	10,3	10,4	10,2	10,3	0,01
6	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	10,4	10,5	10,3	10,4	0,01
7	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	8,5	8,4	8,6	8,5	0,01
8	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	11,4	11,3	11,4	11,36667	0,003333
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	11,7	11,6	11,65	11,65	0,0025
10	1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	8,7	8,8	8,6	8,7	0,01
11	1	1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	9,8	9,8	9,7	9,766667	0,003333
12	1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	7,4	7,3	7,4	7,366667	0,003333
13	1	0	1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	10,1	10	10,2	10,1	0,01
14	1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	9,1	9	9,1	9,066667	0,003333
15	1	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	8,2	8,1	8,2	8,166667	0,003333
16	1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	7,9	7,8	7,9	7,866667	0,003333
17	140,64	2,989333	8,547667	3,133167	1,273333	-4,92667	1,180333	3,093333	4,270133	2,790133	2,4448	Σxi*ycp				ΣSj ²
18	15	10,95245	10,95245	10,95245	8	8	8	8	4,3727	4,3727	4,3727	Σxi ²				Sj ² max
19	8,580415	0,272937	0,780434	0,28607	0,159167	-0,61583	0,147542	0,386667	0,976544	0,63808	0,559105	bi				G
20									0,000667	0,000667	0,000667					n-1
21	S _r ²	0,006173	S _r ² {b _{i,j} }	0,008231	0,005636	0,011273	0,005636	0,007717	0,015433	0,007717	0,061733	0,014118	0,001412	0,001412	N	15
22	γ	0,95	S{b _{i,j} }	0,090725	0,075077	0,106174	0,075077	0,087845	0,124231	0,087845	0,248462	0,118819	0,037574	0,037574	G _{cp}	0,3346
23	f _i	30	t _i	94,57559	3,635456	7,350503	3,810377	3,810377	0,181191	4,957164	1,679577	1,556241	8,218768	16,98206	G - G _{cp}	-0,22661
24	кр	2,04	t _i -t _{кр}	92,53559	1,595456	5,310503	1,770377	-1,85881	-1,85881	2,917164	-0,36042	-0,48376	6,178768	14,94206	Выход	дисп.
25															(G < G _{cp})	однор.
26																
27																

Рисунок 4.33 – Проверка воспроизводимости результатов исследования с помощью критерия Кохрена

В результате регрессионного анализа получено уравнение, описывающее зависимость силовой нагрузки на исполнительные (рабочие) органы бороны от исследуемых факторов.

$$Y(X_1, X_2, X_3) = b'_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2. \quad (4.33)$$

Значимость коэффициентов регрессии определялась с помощью t-критерия Стьюдента (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента

Коэффициенты регрессии	Численное значение	Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента			
		t_i	Табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{кр}$	$t_i - t_{кр}$	Проверка значимости
1	2	3	4	5	6
b'_0	8,580415	94,57559	2,0400	92,53559	Значимый
b_1	0,272937	3,635456	2,0400	1,595456	Значимый
b_2	0,780434	7,350503	2,0400	5,310503	Значимый

Продолжение таблицы 4.12

1	2	3	4	5	6
b_3	0,28607	3,810377	2,0400	1,770377	Значимый
b_{12}	0,159167	3,810377	2,0400	-1,85881	Незначимый
b_{13}	-0,61583	0,181191	2,0400	-1,85881	Незначимый
b_{23}	0,147542	4,957164	2,0400	2,917164	Значимый
b_{123}	0,386667	1,679577	2,0400	-0,36042	Незначимый
b_{11}	0,976544	1,556241	2,0400	-0,48376	Незначимый
b_{22}	0,63808	8,218768	2,0400	6,178768	Значимый
b_{33}	0,559105	16,98206	2,0400	14,94206	Значимый

В раскодированном виде учитывая систему уравнений (4.35), выражение (4.34) принимает вид:

$$P(X_1, X_2, X_3) = 8,580415 + 0,272937X_1 + 0,780434X_2 + 0,28607X_3 + 0,147542X_2X_3 + 0,63808X_2^2 + 0,559105X_3^2 \quad (4.34)$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{\alpha-6}{6} = 0,17\alpha - 1; \\ X_2 &= \frac{v-2,4}{0,2} = 5v - 12; \\ X_3 &= \frac{h-18}{3} = 0,33h - 6. \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

$$P(\alpha, v, h) = 8,580415 + 0,272937(0,17\alpha - 1) + 0,780434(5v - 12) + 0,28607(0,33h - 6) + 0,147542(5v - 12)(0,33h - 6) + 0,63808(5v - 12)^2 + 0,559105(0,33h - 6)^2 \quad (4.36)$$

Проведя математические вычисления уравнение (4.36), получаем

$$P(\alpha, v, h) = 119,85 + 0,0464\alpha - 77,085v - 2,6996h + 0,243vh + 15,95v^2 + 0,061h^2 \quad (4.37)$$

Используя моделирование (рисунки 4.34-4.36), установим зависимость нагрузки на рабочий орган дисковой бороны БДТ-3 от изменения конструктивно-технологических параметров разработанного устройства. Результаты моделирования лягут в основу определения оптимальных режимов его работы.

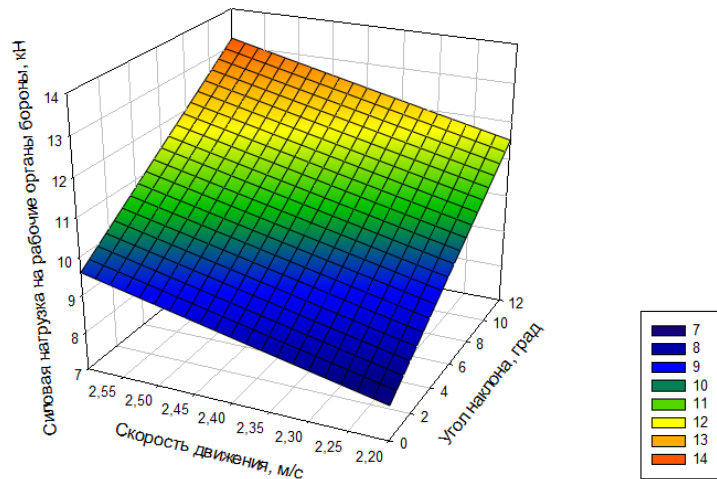


Рисунок 4.34 – Зависимость силовой нагрузки на исполнительные (рабочие) органы борона при фиксированном значении глубины обработки почвы $h = 18\text{см}$ от скорости движения и угла наклона борона

Экспериментальные исследования показали (рисунок 4.34), что наибольшее увеличение силовой нагрузки на исполнительные (рабочие) органы борона фиксируется при угле наклона борона 12 град. и может превышать исходное значение на 47%. Увеличение скорости движения почвообрабатывающего агрегат в исследуемом диапазоне позволяет повысить силовую нагрузку на исполнительные (рабочие) органы борона до 13.2кН.

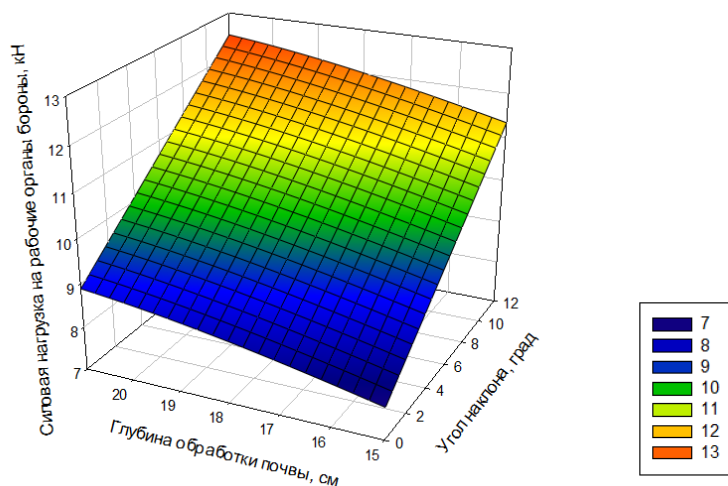


Рисунок 4.35 – Зависимость силовой нагрузки на исполнительные (рабочие) органы борона при фиксированном значении скорости движения $v = 2,4\text{ м/с}$ от глубины обработки почвы и угла наклона борона

При фиксированной скорости движения эксплуатация предлагаемого устройства позволяет увеличить силовое воздействие на рабочий орган дисковой бороны БДТ–3 до 12,5 кН при угле наклона бороны 12 град, что позволяет увеличить глубину обработки почвы до 0,21 м. Дальнейшее увеличение угла наклона бороны не приводит к повышению нагрузки на исполнительные (рабочие) органы бороны.

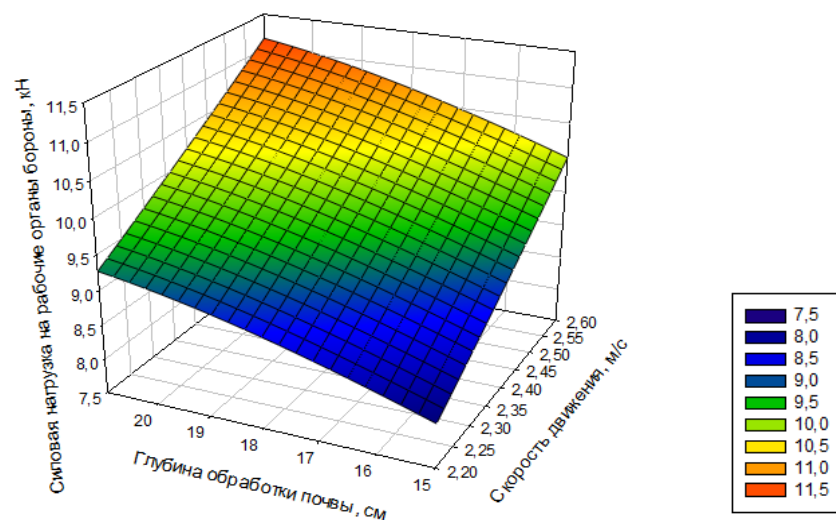


Рисунок 4.36 – Зависимость силовой нагрузки на исполнительные (рабочие) органы бороны при фиксированном значении угла наклона рамы бороны $\alpha = 4^\circ$ от скорости движения и глубины обработки почвы

Анализируя полученные данные необходимо отметить, что при фиксированном значении угла наклона рамы бороны увеличение скорости движения до 2,6 м/с позволяет повысить нагрузку на рабочий орган дисковой бороны БДТ–3 до 23% и регулировать глубину обработки почвы в заданном диапазоне.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ТОПЛИВНО - ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При оценке эффективности проведенных исследований за основу чаще всего используются два подхода которые опираются на следующие источники:

- при экономической оценке за основу берётся - ГОСТ 23730-88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки универсальных машин и технологических комплексов [3];
- при топливно-энергетической оценка за основу берутся- Методические рекомендации, по топливно-энергетической оценке, сельскохозяйственной техники, технологических процессов и технологий в растениеводстве.

Использование выше названных подходов позволяет определить эффективность проведенных исследований:

- при экономической оценке в рублёвом эквиваленте;
- при топливно-энергетической оценке в МДж.

При этом необходимо отметить, что при использовании рублёвого эквивалента не всегда возможно оценить влияние рыночных отношений, которые существенно влияют на конечный результат.

Использование энергетического показателя в качестве критерия дает следующие преимущества:

- отсутствие прямой зависимости от политики ценообразования;
- позволяет переход к оценке эффективности производства в денежном выражении.

Энергетический анализ в конечном итоге не заменяет, а дополняет и расширяет возможности более детального экономического анализа, что позволяет находить новые способы экономии энергозатрат, за счет применения энергосберегающих технологий и средств механизации.

Исходные данные для расчёта взяты из проведенных хронометражных наблюдений за работой МТА. Исходя из вышеизложенного, расчёт эффективности выполнен по методике [3].

Для затрат живого труда:

$$E_{\text{ж}} = \frac{a_{\text{ж}} \cdot n_{\text{ч}}}{W_{\text{см}}} \quad (5.1)$$

где $a_{\text{ж}}$ – энергетический эквивалент живого труда, МДж/ч;

$n_{\text{ч}}$ – число основных трактористов, чел;

$W_{\text{см}}$ – производительность МТА, га/ч.

Для прямых затрат энергии:

$$E_{\text{п}} = H_{\text{т}} \cdot (a_{\text{т}} + f_{\text{т}}) \quad (5.2)$$

где $H_{\text{т}}$ – расход топлива, кг/га;

$a_{\text{т}}$ – теплосодержание топлива, МДж/кг;

$f_{\text{т}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты энергии на производство топлива, МДж/кг.

Удельная энергоёмкость трактора в расчёте на 1 час работы трактора рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{т}} = \frac{M_{\text{т}} \cdot C_{\text{тр}} \cdot (K_{\text{т}} + K_{\text{тк}} + K_{\text{тр}})}{100 \cdot T_{\text{нт}}} \quad (5.3)$$

где $K_{\text{т}}$, $K_{\text{тк}}$, $K_{\text{тр}}$ – отчисления на реновацию, капитальный и текущий ремонт энергетического средства;

$M_{\text{т}}$ – масса энергетического средства, кг;

$C_{\text{тр}}$ – энергетический эквивалент энергетического средства, МДж/кг;

$T_{\text{нт}}$ – годовая загрузка тракторов, ч.

Удельная энергоёмкость сельскохозяйственной машины [3]:

$$E_{\text{м}} = \frac{M_{\text{м}} \cdot \Pi_{\text{м}} \cdot (\Phi_{\text{м}} + \Phi_{\text{мк}})}{100 \cdot T_{\text{нт}}} \quad (5.4)$$

где $M_{\text{м}}$ – масса сельскохозяйственной машины, кг;

$\Pi_{\text{м}}$ – энергетический эквивалент сельскохозяйственной машины, МДж/кг;

$\Phi_{\text{м}}$, $\Phi_{\text{мк}}$ – отчисления на реновацию, капитальный и текущий ремонт тракторов, %;

$T_{\text{нт}}$ – годовая загрузка сельскохозяйственной машины, ч.

Суммарная энергоёмкость энергетического средства и сельскохозяйственной машины в расчёте на 1 га:

$$E_{TM} = \frac{E_T + E_M}{W_{cc}} \quad (5.5)$$

Совокупные или полные энергозатраты:

$$E_{ТП} = E_{п} + E_{ж} + E_{TM} \quad (5.6)$$

Экономия полных энергозатрат предлагается рассчитать по формуле:

$$\Delta E_{ТП} = E_{ТНБ} - E_{ТПП} \quad (5.7)$$

где $E_{ТНБ}$ – совокупные энергозатраты новой машины, МДж/га;

$E_{ТПП}$ – совокупные энергозатраты базовой машины, МДж/га.

Произведем расчеты эффективности использования на подготовке почвы к посевным работам машинно-тракторным агрегатом в серийном исполнении и экспериментального с установленным корректором-распределителем силовой нагрузки.

Для серийного машинно-тракторного агрегата в составе трактора МТЗ-82 и бороны БДТ-3:

1. $E_{пс} = 7,4 \cdot (42,7 + 10) = 389,98$ МДж/га;
2. $E_{жс} = \frac{1 \cdot 1,26}{2,7} = 0,47$ МДж/га;
3. $E_{тс} = \frac{3160 \cdot 86 \cdot (10 + 14,9)}{100 \cdot 1095} = 61,8$ МДж/га;
4. $E_{мс} = \frac{195 \cdot 1328 \cdot (14,2 + 7)}{100 \cdot 150} = 366,0$ МДж/га;
5. $E_{тпрс} = \frac{E_{мс} + E_{прс}}{W} = \frac{61,8 + 366,0}{2,7} = 158,4$ МДж/га;
6. $E_{тпс} = E_{пс} + E_{жс} + E_{тпрс} = 389,98 + 0,47 + 158,4 = 548,85$ МДж/га.

Для экспериментального машинно-тракторного агрегата:

1. $E_{пэ} = 6,8 \cdot (42,7 + 10) = 358,36$ МДж/га;
2. $E_{жэ} = \frac{1 \cdot 1,26}{2,93} = 0,43$ МДж/га;
3. $E_{тэ} = \frac{3200 \cdot 86 \cdot (10 + 14,9)}{100 \cdot 1095} = 61,8$ МДж/га;
4. $E_{прсн} = \frac{195 \cdot 1328 \cdot (14,2 + 7)}{100 \cdot 150} = 366,0$ МДж/га;
5. $E_{тпрс} = \frac{E_{мс} + E_{прс}}{W} = \frac{61,8 + 360,0}{2,93} = 143,95$ МДж/га;
6. $E_{тпн} = E_{пн} + E_{жн} + E_{тпрн} = 358,36 + 0,43 + 143,95 = 502,74$ МДж/га;

Следовательно, $\Delta E_{\text{п}} = 548,85 - 502,74 = 46,11$ МДж/га;

Полученные результаты топливно-энергетической оценки проведённых исследований представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Топливно-энергетическая оценка проведённых исследований

Параметры, МДж	МТА класс 1,4	
	Серийный	предлагаемый
Прямые затраты	389,98	358,36
Затраты живого труда	0,47	0,43
Суммарная энергоёмкость МТА	208,2	191,11
Совокупные энергозатраты	158,4	143,95
Экономия полных энергозатрат		46,11

На основании приведенных расчетов (таблица 5.1) установлено, что использование бороновального агрегата составе трактора МТЗ-82 и бороны БДТ-3 с предлагаемым устройством позволяет снизить энергозатраты на 46,11 МДж/га по сравнению с серийным вариантом. Использование предлагаемого бороновального агрегата позволяет получить годовой экономический эффект в перерасчёте на рублёвый эквивалент 92,4 руб/га. Для КФХ с посевной площадью 500 га общая экономия от использования бороновального агрегата в составе трактора МТЗ-82 и бороны БДТ-3 с предлагаемым устройством составит экономию:

- прямые затраты - 15819 МДж;
- затраты живого труда - 20 МДж;
- суммарная энергоёмкость МТА - 8545 МДж;
- экономия полных энергозатрат - 23055 МДж;
- годовой экономический эффект - 46200 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований сформированы следующие обоснованные выводы:

1. На основании проведенных исследований установлено, что доля КФХ в производство сельскохозяйственной продукции составляет до 25 %, при этом основным энергетическим средством остаются тракторы класс 1,4...2. Подготовка почвы к посевным работам осуществляется в основном бороновальными агрегатами в составе колёсного трактора Беларусь и дисковой бороны БДТ-3.

2. В результате проведённого анализ ранее проведенных исследований установлено, что повысить эффективность использования бороновальных агрегатов и качество проводимых работ возможно за счёт регулирования силовой нагрузки, приходящейся на опорные поверхности энергетического средства и рабочие органы бороны.

3. С учётом специфических условий региона предложено техническое решение позволяющее при необходимости перераспределять нагрузку внутри бороновального агрегата в зависимости физико-механических характеристик почвы.

4. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что при установке предлагаемого устройства произошло перераспределение нагрузки между опорными основаниями энергетического средства и рабочими органами бороны. При увеличении длины выхода штока от среднего положения (устройство не работает) в пределах 0,21...0,37 м увеличение нагрузки на задние движители трактора составило 50,5 %, что повышает тягово-сцепные свойства трактора. При этом силовая нагрузка на задние секции бороны увеличилась с 5225 Н до 11500 Н и снизилась на передние секции бороны с 13025 Н до 6000 Н.

При уменьшении длины выхода штока от среднего положения (устройство не работает) в пределах 0,21... 0,09 м увеличение нагрузки на передние движители трактора составило 17,63 %, что позволяет повысить продольную устойчивость

трактора. При этом силовая нагрузка на задние секции бороны снизилась на 3525 Н и увеличилась на передние секции бороны на 11275 Н.

При изменении угла наклона рамы в сторону задних секций в пределах $0^{\circ} \dots 12^{\circ}$ нагрузка на задние движители трактора увеличилась на 51,23 %. При этом силовая нагрузка на задние секции бороны увеличилась на 5825 Н и снизилась на передние секции бороны на 7175 Н.

При изменении угла наклона рамы в сторону передних секций в пределах $0^{\circ} \dots 12^{\circ}$ нагрузка на передние движители трактора увеличилась на 17,31 %. При этом силовая нагрузка на задние секции бороны снизилась на 3325 Н и увеличилась на передние секции бороны на 10875 Н.

5. Экономическая и топливно-энергетическая оценка проведённых исследований показала, что при работе бороновального агрегата в составе трактора МТЗ-82 и бороны БДТ-3 с предлагаемым устройством позволяет снизить энергозатраты на 46,11 МДж/га по сравнению с серийным вариантом. Использование предлагаемого бороновального агрегата позволяет получить годовой экономический эффект в перерасчёте на рублёвый эквивалент 92,4 руб/га. Для КФХ с посевной площадью 500 га общая экономия от использования бороновального агрегата в составе трактора МТЗ-82 и бороны БДТ-3 с предлагаемым устройством составит:

- прямые затраты - 15819 МДж;
- затраты живого труда - 20 МДж;
- суммарная энергоёмкость МТА - 8545 МДж;
- экономия полных энергозатрат - 23055 МДж;
- годовой экономический эффект - 46200 руб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 12.2.002-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности. Сб. ГОСТов. - М.: ИПК Издательство стандартов, 1992. - 61 с.
2. ГОСТ 20915-2011. Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2013. – 27 с.
3. ГОСТ 23730-88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки универсальных машин и технологических комплексов. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 14 с.
4. ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90) Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. - 15 с.
5. ГОСТ 30746-2001 (ИСО-789-2-93) Тракторы сельскохозяйственные. Определение мощности и грузоподъемности гидравлической навесной системы. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. - 11 с.
6. ГОСТ 30750-2001 Тракторы сельскохозяйственные. Определение положения центра тяжести. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.- 9 с.
7. ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 11 с.
8. ГОСТ Р 54784-2011 Испытания сельскохозяйственной техники. Методы оценки технических параметров. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2012. – 23 с.
9. ГОСТ 26244-84 Обработка почвы предпосевная. Требования к качеству и методы определения. - М.: Издательство стандартов, 1986. - 7 с.
10. ГОСТ 30746-2001 (ИСО-789-2-93) Тракторы сельскохозяйственные. Определение мощности и грузоподъемности гидравлической навесной системы. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.- 11 с.

11. ГОСТ 26953-86 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. - М.: ИПК Издательство стандартов, 1987.- 11 с.

12. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. — Москва : Стандартиформ, 2002. — 50 с.

13. ГОСТ 33687-2015. Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний. — М.: Стандартиформ, 2017. — 46 с.

14. Патент № 2145321 С1 Российская Федерация, МПК А01В 35/26. Устройство для регулировки глубины обработки почвы дисковым орудием / С. В. Щитов, Е. Е. Кузнецов, А. Е. Слепенков. — № 99112345/13 ; заявл. 15.06.1999 ; опубл. 10.02.2000, Бюл. № 4. — 5 с.

15. Патент № 2821900 С1 Российская Федерация, МПК А01В 21/00. Распределяюще-догружающее устройство для прицепной рамной дисковой бороны / Д. В. Ермаков, Е. Е. Кузнецов, С. В. Щитов [и др.] ; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет». — № 2023131290 ; заявл. 30.11.2023 ; опубл. 27.06.2024. — EDN LCJSCM.

16. Патент № 2812473 С1 Российская Федерация, МПК А01В 71/02, А01В 63/11, А01В 21/08. Догрузочно-распределяющее устройство для прицепной рамной дисковой бороны / Д. В. Ермаков, Е. Е. Кузнецов, С. В. Щитов [и др.] ; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет». — № 2023124750 ; заявл. 27.09.2023 ; опубл. 30.01.2024. — EDN TEEFBC.

17. Патент № 2833701 С1 Российская Федерация, МПК А01В 63/11, А01В 76/00, В62Д 53/04. Корректор-догрузатель задних ведущих колёс трактора при работе с прицепными сельскохозяйственными агрегатами : заявл. 11.09.2024 : опубл. 28.01.2025 / С. В. Щитов, З. Ф. Кривуца, Е. С. Поликутина [и др.] ; заявитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет».

18. Патент на полезную модель № 244122. Корректор-распределитель силовой нагрузки в бороновальном агрегате / С. В. Щитов, З. Ф. Кривуца, Е. С. Поликутина, Д. В. Ермаков, В. А. Щитова, М. Д. Корольков. — Заявка № 2026106648 ; заявл. 13.03.2026 ; дата регистрации: 17.06.2026.

19. Патент на полезную модель № 64844 U1 Российская Федерация, МПК А01В 23/06. Рабочий орган дисковой бороны с системой очистки : № 2007100238/22 : заявл. 09.01.2007 : опубл. 27.07.2007 / Н. З. Зелинский.

20. Авторское свидетельство № 934929 А1 СССР, МПК А01В 23/00. Рабочий орган дисковой бороны : № 3214163 : заявл. 10.12.1980 : опубл. 15.06.1982 / А. К. Кириченко, К. А. Сохт ; заявитель Краснодарский ордена ленина и ордена трудового красного знамени научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. П.П. Лукьяненко.

21. Патент № 2329627 С2 Российская Федерация, МПК А01В 21/08. дисковая борона : № 2006112198/12 : заявл. 12.04.2006 : опубл. 27.07.2008 / К. А. Сохт, А. К. Кириченко, Д. Г. Мельников [и др.] ; заявитель Краснодарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. П.П. Лукьяненко.

22. Патент № 2366138 С1 Российская Федерация, МПК А01В 21/00, А01В 7/00. Борона дисковая : № 2008109513/12 : заявл. 12.03.2008 : опубл. 10.09.2009 / В. И. Богатырев, И. Н. Рябцев ; заявитель Закрытое акционерное общество "Техсервис".

23. Патент № 2123245 С1 Российская Федерация, МПК А01В 21/04, А01В 23/04, А01В 73/02. Навесная дисковая борона : № 94045502/13 : заявл. 28.12.1994 : опубл. 20.12.1998 / В. П. Тарасов, В. К. Загурский ; заявитель Новосибирское производственное объединение «Сибсельмаш».

24. Патент № 2041578 С1 Российская Федерация, МПК А01В 21/08. Дисковая борона : № 93054363/15 : заявл. 08.12.1993 : опубл. 20.08.1995 / С. А. Инаекян, В. В. Коломиец, В. М. Гончаренко [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Красный Аксай».

25. Авторское свидетельство № 1 234 567 СССР, МКИ2 А01В 49/04. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат / В. И. Вершинин, П. С. Нартов ; заявитель и патентообладатель не указаны. — № 3 456 789/30-15 ; заявл. 12.03.1978 ; опубл. 15.05.1980, Бюл. № 18. — 3 с.

26. Авторское свидетельство № 247 667 СССР, МКИ2 А01В 21/08. Дисковая борона / Н. И. Герасимов, Я. З. Жилицкий и др. ; заявитель и патентообладатель не указаны. — № 875 007/30-15 ; заявл. 07.01.1964 ; опубл. 04.07.1969, Бюл. № 22. — 1 с.

27. Авторское свидетельство № 288 817 СССР, МКИ2 А01В 23/06. Рабочий орган дискового орудия / Т. Г. Ботов и др. ; заявитель и патентообладатель не указаны. — № 1 203 609/30-15 ; заявл. 11.12.1967 ; опубл. 08.12.1970, Бюл. № 1. — 1 с.

28. Авторское свидетельство № 873 902 СССР, МКИЗ А01В 23/04. Дисковое орудие / В. Я. Акулов, Ф. Н. Салеев ; заявитель и патентообладатель не указаны. — № 2 925 289/30-15 ; заявл. 06.05.1980 ; опубл. 23.10.1981, Бюл. № 39. — 1 с.

29. Авторское свидетельство № 929 023 СССР, МКИЗ А01В 21/02. Почвообрабатывающее орудие / Н. К. Мазитов и др. ; заявитель и патентообладатель не указаны. — № 2 801 064/30-15 ; заявл. 23.07.1979 ; опубл. 23.05.1982, Бюл. № 19. — 1 с. Абаев В. В. Параметры технологического процесса обработки почвы дисковым почвообрабатывающим орудием: дис. ... канд. техн. наук. — Краснодар, 2004. — 177 с.

30. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — Москва : Наука, 1976. — 280 с.

31. Аленицин, А. Г. Краткий физико-математический справочник / А. Г. Аленицин. — Москва : Наука, 1990. — 364 с.

32. Анализ данных. Статические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. — Москва : Мир, 2003. — 686 с.

33. Апажев, А. К. Повышение урожайности зерновых культур на основе усовершенствованной технологии и оптимизированного комплекса машин для предпосевной подготовки почвы и посева в условиях центральной части Северного Кавказа : дис. ... д-ра техн. наук / А. К. Апажев. — Волгоград : Волгоградский ГАУ, 2018. — 415 с.
34. Аржаных, А. И. Исследование и обоснование параметров рабочих органов дисковых луцильников для работы на повышенных скоростях : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. И. Аржаных. — Челябинск, 1968. — 24 с.
35. Аушев, М. Х. Параметры и режимы работы комбинированного почвообрабатывающего агрегата для предпосевной обработки почвы : дис. ... канд. техн. наук / М. Х. Аушев. — Краснодар : Кубанский ГАУ, 2018. — 141 с.
36. Ашмарин, И. П. Быстрые методы статистической обработки и планирование эксперимента / И. П. Ашмарин, П. П. Васильев, В. А. Амбросов. — Ленинград : Изд-во Ленинградского университета, 1975. — 77 с.
37. Багманов, Р. С. Улучшение качества предпосевной обработки почвы и снижение энергозатрат путём обоснования параметров культиватора с упругими рабочими органами : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. С. Багманов. — Москва, 2012. — 18 с.
38. Байбаков, А. В. Исследование трения и прилипания почвы — металл / А. В. Байбаков // Бюллетень НТИ по агрофизике. — Ленинград : Агрофизический институт, 1956. — С. 410.
39. Бартенев, И. М. Борона дисковая клавишная БДК-2,5 (3,0) / И. М. Бартенев, В. И. Вершинин, И. В. Сухов // Лесное хозяйство. — 1996. — № 6. — С. 44–45.
40. Башкатов, Б. И. Статистика сельского хозяйства с основами общей теории статистики / Б. И. Башкатов. — Москва : ЭКМОС, 2001. — 352 с.
41. Беляев, А. Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колёсных тракторов : дис. ... д-ра с.-х. наук / А. Н. Беляев. — Мичуринск : Мичуринский ГАУ, 2019. — 440 с.

42. Бидий, А. И. Сельскохозяйственная статистика с основами общей теории статистики / А. И. Бидий. — Москва : Статистика, 1976. — 280 с.
43. Благуш, П. Факторный анализ с обобщениями / П. Благуш ; пер. с чеш. — Москва : Финансы и статистика, 1989. — 310 с. : ил.
44. Блохин, В. Д. Научные основы земледелия на Дальнем Востоке России / В. Д. Блохин, А. А. Моисеенко, В. М. Ступин. — Владивосток : Дальнаука, 2011. — 216 с.
45. Босой, С. С. Теория, конструкция и расчёт сельскохозяйственных машин / С. С. Босой. — Москва : Машиностроение, 1978. — 567 с.
46. Боровков, А. А. Математическая статистика. Оценка параметров. Проверка гипотез / А. А. Боровков. — Москва : Наука, 1984. — 472 с.
47. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — Москва : Наука, 1967. — 608 с.
48. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — Москва : Наука, 1986. — 544 с.
49. Булавин, С. А. Тяговое сопротивление дискового почвообрабатывающего агрегата / С. А. Булавин, В. Н. Любин, О. М. Мякотина // Бюллетень научных работ ФГОУ ВПО «Белгородская ГСХА». — Белгород, 2005. — С. 21–29.
50. Булавин, С. А. Резание почвы дисковым рабочим органом / С. А. Булавин, В. Н. Любин, А. В. Рыжков // Бюллетень научных работ ФГОУ ВПО «Белгородская государственная сельскохозяйственная академия». — Белгород, 2004. — С. 32–40.
51. Булатов, Р. Н. К обоснованию диаметра дисковых рабочих органов / Р. Н. Булатов // Труды Казанской государственной сельскохозяйственной академии. — 2002. — Т. 71. — С. 356–360.
52. Бурченко, П. М. Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения / П. М. Бурченко. — Москва : ВИМ, 2002. — 292 с.

53. Бурченко, П. Н. Принципы создания комбинированных агрегатов для возделывания сельскохозяйственных культур на базе пассивных рабочих органов / П. Н. Бурченко // Труды ВИМ. — Москва, 1973. — Вып. 63. — С. 14–16.
54. Валиев, А. Р. Повышение эффективности обработки почвы в условиях Среднего Поволжья путём совершенствования машин с ротационными рабочими органами : дис. ... д-ра с.-х. наук / А. Р. Валиев. — Казань : Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2018. — 472 с.
55. Василенко, П. М. Элементы методики математической обработки результатов экспериментальных исследований / П. М. Василенко. — Москва : ВИМ, 1958.
56. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. — 3-е изд., доп. и перераб. — Москва : Колос, 1973. — 199 с.
57. Владимиров, А. И. Методы и устройства для замера тягового сопротивления навесных сельскохозяйственных орудий / А. И. Владимиров, Д. З. Стародинский. — Москва : ЦНИИТЭИ тракторсельхозмашин, 1974. — 32 с.
58. Воронкин, Е. В. Влияние способов предпосевной обработки на структурный состав почвы в условиях Алтайского края / Е. В. Воронкин, Ю. А. Быковский // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2009. — № 5 (55). — С. 8–11.
59. Гильштейн, П. М. Почвообрабатывающие машины и агрегаты. Конструирование и расчёт / П. М. Гильштейн. — Москва : Машиностроение, 1969. — 191 с.
60. Гоберман, В. А. Технология научных исследований: методы, модели, оценки : учеб. пособие / В. А. Гоберман, Л. А. Гоберман. — Москва : МГУЛ, 2002. — 96 с.
61. Голубев, В. В. Совершенствование технологических процессов и технических средств для предпосевной обработки почвы, посева льна и других мелкосеменных культур : дис. ... д-ра техн. наук / В. В. Голубев. — Москва : Российский ГАУ, 2017. — 421 с.

62. Горячкин, В. П. Собрание сочинений : в 6 т. / В. П. Горячкин. — Москва : Колос, 1965. — Т. 1. — 720 с.; Т. 2. — 459 с.; Т. 3. — 384 с.; Т. 4. — 512 с.; Т. 5. — 569 с.; Т. 6. — 500 с.
63. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях : учеб. пособие / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. — 288 с.
64. Грядунов, С. С. Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон / С. С. Грядунов, В. В. Сиваков // Инженерные технологии и системы. — 2021. — Т. 31, № 4. — С. 544-558. — DOI 10.15507/2658-4123.031.202104.544-558. — EDN SERBZY.
65. Дайчик, М. Л. Методы и средства натурной тензометрии : справочник / М. Л. Дайчик, Н. И. Пригоровский, Г. Х. Хуршудов. — Москва : Машиностроение, 1989. — 240 с.
66. Дегтярёв, Ю. И. Методы оптимизации : учеб. пособие / Ю. И. Дегтярёв. — Москва : Сов. радио, 1980. — 272 с.
67. Демко, А. Н. Повышение эффективности использования почвообрабатывающего агрегата на базе колёсного трактора класса 1,4 в технологии биологизированного земледелия : дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Демко. — Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2019. — 160 с.
68. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учеб. пособие / Б. А. Доспехов. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : Колос, 1979. — 416 с.
69. Ермаков, Д. В. Повышение производительности прицепных агрегатов почвообрабатывающих машин / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. — 2024. — № 3 (51). — С. 71–77.
70. Ермаков, Д. В. Повышение эффективности использования дисковых борон / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // Актуальные вопросы развития естественных и технических наук : материалы XXX Всероссийской научно-практической конференции, Ставрополь, 20 ноября 2023 года. —

Ставрополь : ООО «Ставропольское издательство „Параграф“», 2023. — С. 217–219.

71. Ермаков, Д. В. Повышение эффективности использования колёсных машинно-тракторных агрегатов на предпосевной обработке почвы / Д. В. Ермаков [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2023. — № 12 (230). — С. 83–88. — DOI 10.53083/1996-4277-2023-230-12-83-88.

72. Ермаков, Д. В. Повышение эффективности процесса боронования почвы / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов : сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Москва, 19–20 декабря 2023 г. — Москва : РГАУ — МСХА им. К. А. Тимирязева, 2024. — С. 19–23.

73. Ермаков, Д. В. Повышение эффективности подготовки почвы к посевным работам в весенний период / Д. В. Ермаков [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2026. — № 215. — С. 169–183. — DOI 10.21515/1990-4665-215-025.

74. Ермаков, Д. В. Повышение эффективности работы колёсных машинно-тракторных агрегатов / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // АгроЭкоИнфо. — 2023. — № 5 (59). — DOI 10.51419/202135516.

75. Ермаков, Д. В. Результаты экспериментальных исследований по определению влияния догружающе-распределяющего устройства дисковой бороны на физико-механические свойства почвы / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников // Актуальные вопросы энергетики в АПК : материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Благовещенск, 19 декабря 2024 года. — Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2025. — С. 154–160.

76. Ермаков, Д. В. Результаты исследований по определению влияния догрузочно-распределяющего устройства на агротехнологические показатели

бороновального агрегата / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // Сборник статей XI Международной научно-практической конференции. — Москва : МЦ «Новые научные исследования», 2026. — С. 185–199.

77. Ермаков, Д. В. Снижение техногенного воздействия на почву при выполнении бороновальных работ / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. — 2025. — № 2 (112). — С. 119–124.

78. Ермаков, Д. В. Теоретические исследования силовых реакций и устойчивости движения системы при выравнивании вертикальной нагрузки тяжёлой рамной дисковой бороны в условиях внешнего догружения / Д. В. Ермаков [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. — 2022. — № 5 (97). — С. 111–118.

79. Егоров, А. С. Разработка орудия для прикатывания почвы с обоснованием его оптимальных параметров и режимов работы : дис. ... канд. техн. наук / А. С. Егоров. — Ульяновск : Ульяновский ГАУ им. П. А. Столыпина, 2020. — 169 с.

80. Желиговский, В. А. Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии сельскохозяйственных материалов / В. А. Желиговский. — Тбилиси : Грузинский СХМ, 1970. — 148 с.

81. Зональная система технологий и машин для растениеводства Дальнего Востока на 2001–2005 годы / под общ. ред. Ю. В. Терентьева, Б. И. Кашпуры. — Благовещенск : ДальГАУ, 2002. — 473 с.

82. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла ; пер. с нем. — Москва : Статистика, 1980.

83. Иофинов, С. А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / С. А. Иофинов. — Москва : Колос, 1974. — 480 с.

84. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки. — Москва : Изд-во стандартов, 2003. — 106 с. — (ОСТ 10 4.2 2).

85. Капуста, П. П. Проектная оценка нагруженности многолистных рессор с использованием имитационного моделирования / П. П. Капуста, Д. В. Вихренко, П. П. Цвирко // Грузовик. — 2002. — № 8. — С. 28–29.
86. Карпенко, А. Н. Сельскохозяйственные машины / А. Н. Карпенко, В. М. Халанский, И. В. Казаков. — Москва : Россельхозиздат, 1980. — 527 с.
87. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н. И. Кленин, В. А. Сакун. — Москва : Колос, 1980. — 671 с.
88. Клокова, М. П. Тензодатчики для экспериментальных исследований / М. П. Клокова. — Москва : Машиностроение, 1972. — 152 с.
89. Кобяков, И. Д. Механико-технологические основы работы шестиугольных дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / И. Д. Кобяков ; [Место защиты: Сиб. науч.-исслед. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва СО РАСХН]. — Новосибирск, 2012. — 39 с.
90. Котов, П. М. Орудие для предпосевной обработки почвы по стерневым фонам / П. М. Котов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. — 1987. — № 5. — С. 32–33.
91. Корн, Г. Н. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Н. Корн, Т. В. Корн. — Москва : Наука, 1984. — 831 с.
92. Краснощёков, И. В. Дисковые орудия для работы на повышенных скоростях / И. В. Краснощёков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 1962. — № 4. — С. 30–34.
93. Курицкий, Б. Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0 / Б. Я. Курицкий. — Санкт-Петербург : ВН Санкт-Петербург, 1997. — 384 с.
94. Кузнецов, Е. Е. Пути повышения эффективности использования мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных агрегатов на полевых и транспортных работах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е. Е. Кузнецов. — Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2017. — 43 с.
95. Кузнецов, Е. Е. Повышение эффективности применения колесных энергетических средств на полевых работах в условиях Амурской области / Р. О.

Сурин, С. Г. Степанов, С. В. Щитов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 8. – С. 147-151. – DOI 10.28983/asj.y2025i8pp147-151. – EDN QHTNRV.

96. Леонов, В. В. Повышение эффективности использования тракторов с шарнирно-сочленённой рамой при работе с дисковыми боровами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 4.3.1 / В. В. Леонов ; [Место защиты: Дальневосточный государственный аграрный университет ; Диссовет 35.2.013.03]. — Благовещенск, 2025.

97. Леонов, В. В. Влияние конструктивно-технологических параметров «корректора распределителя сцепного веса» на распределение нагрузки бороновального агрегата / В. В. Леонов [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. — 2025. — № 1. — С. 34–39.

98. Леонов, В. В. Исследование по оптимизации глубины обработки почвы / В. В. Леонов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2024. — № 204. — С. 143–151.

99. Леонов, В. В. Результаты исследований по регулированию нагрузки на рабочие органы дисковой бороны / В. В. Леонов [и др.] // Вестник Брянской ГСХА. — 2025. — № 2 (108). — С. 57–61.

100. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины: теория, расчёт, проектирование и испытание / М. Н. Летошнев. — Москва : Гос. издательство с.-х. литературы, 1955. — 764 с.

101. Листопад, Г. Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Г. Е. Листопад и др. ; под общ. ред. Г. Е. Листопада. — Москва : Агропромиздат, 1986. — 688 с.

102. Лурье, А. Б. Расчёт и конструирование сельскохозяйственных машин / А. Б. Лурье. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 527 с.

103. Лурье, А. Б. Расчёт и конструирование сельскохозяйственных машин / А. Б. Лурье, А. А. Громбчевский. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 528 с.

104. Лучинский, Н. Д. Воздействие почвы на плоский и сферический диск / Н. Д. Лучинский // Доклады ВАСХНИЛ. — 1976. — № 11. — С. 40–42.

105. Лучинский, Н. Д. О расчёте воздействия почвы на плоский и сферический диски / Н. Д. Лучинский // Доклады ВАСХНИЛ. — 1983. — № 5. — С. 38–39.
106. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие / Е. Н. Львовский. — Москва : Высшая школа, 1982. — 224 с.
107. Мазитов, Н. К. Комплексная оценка орудий для поверхностной обработки почвы / Н. К. Мазитов // Земледелие. — 1987. — № 10. — С. 59–60.
108. Макеева, Ю. Н. Повышение эффективности использования почвообрабатывающих агрегатов при балластировании энергонасыщенных колёсных тракторов : дис. ... канд. техн. наук / Ю. Н. Макеева. — Красноярск : Красноярский ГАУ, 2017. — 193 с.
109. Мамедов, Ф. А. Исследование отброса почвы сферическим диском / Ф. А. Мамедов // Аграрная наука.
110. Мезникова, М. В. Совершенствование технологического процесса полосной глубокой обработки почвы за счёт оптимизации конструктивных параметров рабочего органа : дис. ... канд. техн. наук / М. В. Мезникова. — Волгоград : Волгоградский ГАУ, 2018. — 185 с.
111. Мударисов, С. Г. Совершенствование конструкции дисковых орудий / С. Г. Мударисов // Международная научно-практическая конференция, посвящённая памяти академика В. П. Горячкина : докл. и тез. — Москва, 1998. — Т. 1. — С. 123–126.
112. Мударисов, С. Г. Совершенствование конструкции и управление качеством работы почвообрабатывающих дисковых рабочих органов в целях повышения их эффективности : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. Г. Мударисов. — Уфа, 1996. — 188 с.
113. Мякотина, О. М. Совершенствование технологического процесса предпосевной обработки почвы дисковым комбинированным орудием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / О. М. Мякотина ; Воронеж. гос. аграр. ун-т им. К. Д. Глинки. — Воронеж, 2005. — 19 с.

114. Нартов, П. С. Дисковые почвообрабатывающие машины / П. С. Нартов. — Москва : Машиностроение, 1978. — 135 с.
115. Нартов, П. С. Расчёт силовых характеристик дисковых рабочих органов / П. С. Нартов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 1967. — № 9. — С. 52–54.
116. Нестяк, В. С. Деформация почвы плужным дисковым ножом / В. С. Нестяк, И. Д. Кобяков, А. С. Союнов // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. — Новосибирск, 2012. — Т. 2, № 23-2. — С. 112–115.
117. Нестяк, В. С. Тяговое сопротивление дискового лущильника / В. С. Нестяк, И. Д. Кобяков, А. С. Союнов // Тракторы и сельхозмашины. — 2012. — № 12. — С. 32–33.
118. Николаев, В. А. Научное обоснование и разработка энергосберегающих технических средств обработки почвы : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Николаев. — Ярославль : Ярославская ГСА, 2011. — 43 с.
119. Никитин, В. В. Улучшение качества обработки междурядий ягодных кустарников в условиях суглинистых почв повышенной влажности путем совершенствования конструктивно-режимных параметров дисковой бороны : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Никитин Виктор Васильевич; [Место защиты: Воронеж. гос. аграр. ун-т им. К.Д. Глинки]. — Воронеж, 2009. — 20 с.
120. Осипенко М.А. Новый итерационный метод расчета многолистовой рессоры/ Осипенко М.А., Няшин Ю.И.// Вычислительная механика сплошных сред. — 2012. — Т. 5, № 4. — С. 371-376.
121. Ожерельев, В. Н. Совершенствование конструкции дисковых почвообрабатывающих орудий / В. Н. Ожерельев, В. В. Никитин, А. М. Гринь // Наука в центральной России. — 2020. — № 5(47). — С. 5-11. — DOI 10.35887/2305-2538-2020-5-5-11.

122. Ознобихин, В. И. Классификация и агропроизводственная группировка почв Приморского края / В. И. Ознобихин, Э. П. Синельников, Н. А. Рабачук. — Владивосток : ДВО РАН, 1994. — 94 с.

123. Панов, И. М. Современные тенденции развития, состояния разработки и производства комбинированных машин для обработки почвы и посева / И. М. Панов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1978. — № 1. — С. 14–16.

124. Пархиловский, И. Г. Автомобильные листовые рессоры (конструкция, теория и расчёт) / И. Г. Пархиловский. — Москва : МАШГИЗ, 1954. — 256 с.

125. Пегова, Н. А. Влияние систем основной обработки почвы, вида пара и соломы на урожайность культур звена севооборотов / Н. А. Пегова // Пермский аграрный вестник. — 2019. — № 4 (28). — С. 65–73.

126. Поликутина, Е. С. Повышение эффективности использования и снижение техногенного воздействия на почву средств механизации на полевых и транспортных работах : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Поликутина Елена Сергеевна; [Место защиты: Дальневост. гос. аграр. ун-т]. — Благовещенск, 2017. — 20 с..

127. Редкокашин, А. А. Обоснование конструктивно-технологических параметров работы дисковой бороны с рабочими органами типа "качающаяся шайба" в условиях Приморского края : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Редкокашин Александр Анатольевич; [Место защиты: Дальневост. гос. аграр. ун-т]. — Благовещенск, 2013. — 14 с.

128. Третьяков, А. И. Повышение эффективности дискового культиватора при уходе за лесными культурами на вырубках : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.21.01 / Третьяков Александр Иванович; [Место защиты: Воронеж. гос. лесотехн. акад.]. - Воронеж, 2012. - 16 с. Синеоков Г. Н. Дисковые рабочие органы почвообрабатывающих машин. — Москва: Машгиз, 1949. — 86 с.

129. Сергунцов, А. С. Оптимизация процессов боронования посевов озимой пшеницы с одновременной подкормкой : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Сергунцов Александр Сергеевич; [Место защиты:

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина]. — Краснодар, 2020. — 24 с.

130. Синеоков Г. Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. — Москва: Машиностроение, 1965. — 311 с.

131. Синеоков, Г. Н. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. — Москва : Машиностроение, 1977. — 311 с.

132. Слепенков, А. Е. Повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата при подготовке почвы под посев : дис. ... канд. техн. наук / А. Е. Слепенков. — Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2021. — 178 с.

133. Слепенков, А. Е. Расширение технологических характеристик бороновального агрегата / А. Е. Слепенков, С. Н. Кулинченко, С. В. Щитов, Е. Е. Кузнецов // Технический сервис машин. — 2021. — № 1 (142). — С. 83–88.

134. Слепенков, А. Е. Повышение эффективности использования колёсного пропашного трактора при бороновании / А. Е. Слепенков, О. А. Кузнецова, Е. Е. Кузнецов, С. В. Щитов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. — 2020. — № 3 (83). — С. 206–210.

135. Соболевский И. В. Исследования качества поверхностной обработки почвы рабочими органами гибко-ударной ротационной бороны в условиях зоны рискованного земледелия Республики Крым // Известия сельскохозяйственной науки Тавридии. — 2021. — № 28 (191). — С. 42–52.

136. Союнов, А. С. Обоснование параметров дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. С. Союнов. — Новосибирск, 2011. — 19 с.

137. Союнов, А. С. Рабочий процесс дискового почвообрабатывающего орудия / А. С. Союнов, Е. В. Демчук // Международный научно-исследовательский журнал. — 2014. — № 10 (29). — URL: <https://research-journal.org/archive/10-29-2014-october/ef-bb-bfrabochij-process-diskovogo-pochvoobratyvayushhego-orudiya> (дата обращения: 07.02.2026).

138. Стрельбицкий, В. Ф. Семейство несимметричных дисковых борон / В. Ф. Стрельбицкий // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1978. — № 4. — С. 26–28.
139. Стрельбицкий, В. Ф. Силовые характеристики плоских и сферических дисков луцильников / В. Ф. Стрельбицкий // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1970. — № 8. — С. 28–31.
140. Стрельбицкий, В. Ф. Дисковая навесная борона БДТ 3,0 / В. Ф. Стрельбицкий, А. А. Кордубайло // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1972. — № 6. — С. 38–39.
141. Трубилин, Е. И. Рабочие органы дисковых борон и луцильников / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2013. — № 91. — С. 752–771. — EDN RKNLAD.
142. Хаецкий, Г. В. Комплекс блочно-модульных культиваторов к трактору кл. 1,4 / Г. В. Хаецкий, Э. И. Липкович, А. Я. Куликов и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2005. — № 3.1. — С. 3–4.
143. Цыбань, А. А. Совершенствование процесса боронования посевов сои с разработкой прополочной бороны / А. А. Цыбань, Г. И. Орехов, В. А. Маковский // Современные научные исследования и инновации. — 2016. — № 4. — URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/04/67339> (дата обращения: 23.04.2026).
144. Шакирзянов, Р. А. Динамика и устойчивость сооружений : учеб. пособие / Р. А. Шакирзянов, Ф. Р. Шакирзянов. — 2-е изд., перераб. — Казань : Изд-во Казан. гос. архитект.-строит. ун-та, 2015. — 120 с.
145. Щетинин, Ю. С. Влияние вертикальной нагрузки на тяговые свойства пневматического колеса / Ю. С. Щетинин, В. В. Никитин // Тракторы и сельхозмашины. — 2003. — № 6. — С. 18–21.
146. Шевкун, В. А. Борона дисковая садовая для обработки почвы в рядах плодовых деревьев : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 05.20.01 / В. А. Шевкун ; [Место защиты: Всерос. селекц.-технол. ин-т садоводства и питомниководства]. — Москва, 2008. — 22 с.

147. Шеффе, Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. — М. : Наука, 1980. — 512 с.
148. Щитов, С. В. Повышение производительности колёсных тракторов / С. В. Щитов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2004. — № 1. — С. 18.
149. Щитов, С. В. Пути повышения агротехнической проходимости колёсных тракторов в технологии возделывания сельскохозяйственных культур Дальнего Востока : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / С. В. Щитов. — Благовещенск, 2009. — 325 с.
150. Юнусов, Р. Б. Повышение эффективности работы почвообрабатывающих агрегатов в условиях повышенной влажности почвы : дис. ... канд. техн. наук / Р. Б. Юнусов. — Казань : Казанский ГАУ, 2020. — 156 с.
151. Якимов, Ю. А. Оптимизация параметров дисковых борон для различных типов почв / Ю. А. Якимов, В. П. Иванов, С. М. Петров // Тракторы и сельхозмашины. — 2018. — № 7. — С. 22–26.
152. Яковлев, Н. С. Обоснование параметров и режимов работы комбинированных почвообрабатывающе-посевных агрегатов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н. С. Яковлев. — Новосибирск : СибНИИМЭСХ, 2015. — 38 с.
153. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Амурской области (Амурстат). — Официальный сайт. — URL: <https://28.rosstat.gov.ru/ofstatistics> (дата обращения: 21.08.2026).
154. Амурская область в цифрах : статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Амурской области (Амурстат). — Благовещенск, 2025. — Текст : электронный. — URL: https://28.rosstat.gov.ru/storage/2025/05-30/1sEgRJAS/AO_2025.pdf (дата обращения: 20.08.2026).
155. Об охране окружающей среды в Амурской области в 2025 году : информационный материал / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Амурской области (Амурстат). — Благовещенск, 2025. — Текст : электронный. — URL:

<https://28.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/pres03062026.pdf> (дата обращения: 21.08.2026).

156. Боронование как способ обработки почвы. — Текст электронный // Исток РТРС. — URL: <https://istokrtps.ru/stati/boronovanie?ysclid=mt8clsxdp7875176912> (дата обращения: 21.08.2026).

157. Двухрядные дисковые бороны. — Текст электронный // ДИАС-Агро. — URL: <https://dias-agro.ru/product/dvuhryadnaya-diskovaya-borona-navesnaya/?ysclid=mt8ctjl7a953989890> (дата обращения: 20.08.2026).

158. Двухрядные прицепные дисковые бороны БДМ-Б-ПК. — Текст электронный // АГРАС ХТ. — URL: <https://agrasxt.ru/почвообрабатывающая-техника/дисковые-бороны/двухрядные-прицепные-дисковые-борон-3/> (дата обращения: 22.08.2026).

159. Бороны дисковые БДМ. — Текст электронный // БДМ Агроцентр. — URL: <https://бдм-агроцентр.рф/boroni?ysclid=mt8d6tk12c141544443> (дата обращения: 23.08.2026).

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ



Рисунок А.1 - Патент РФ на изобретение № 2812473 «Догрузочно-распределяющее устройство для прицепной рамной дисковой бороны»



Рисунок А.2 - Патент РФ на изобретение № 2821900 «Распределяюще-догружающее устройство для прицепной рамной бороны»



Рисунок А.3 - Патент на полезную модель № 244122 «Корректор-распределитель силовой нагрузки в бороновальном агрегате»



Рисунок А.4 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682338 «Программа расчета топливно-энергетической оценки трактора класса 1,4 на бороновании»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

«УТВЕРЖДАЮ»
Исполнительный директор
организации ООО «Казанское»
В.И. Ганжа
20__ г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

Мы, нижеподписавшиеся, соискатель - Ермаков Денис Владимирович, научный руководитель - Щитов Сергей Васильевич профессор кафедры транспортно-энергетических средств и механизации АПК, доктор технических наук, профессор, с одной стороны и исполнительный директор общества с ограниченной ответственностью «Казанское» Ганжа Виктор Иванович с другой стороны составили настоящий акт о том, что на основании научно-исследовательской работы соискателя Ермакова Дениса Владимировича и научного руководителя Щитова Сергея Васильевича в период с 20.04.2023 по 20.05.2023 была внедрена в работу и исследована конструкция догружающе-распределяющего устройства сцепного веса тяжёлой дисковой бороны.

Представители ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ

Соискатель	 (подпись)	<u>Ермаков Д.В.</u> (ФИО)
Научный руководитель	 (подпись)	<u>С.В. Щитов, д.т.н.,</u> <u>профессор</u> (И.О. Фамилия, должность, ученая степень)

Представители организации ООО «Казанское»

Исполнительный директор	 (подпись)	<u>Ганжа В. И.</u> (ФИО)
-------------------------	---	-----------------------------



Рисунок Б.1 – Акт внедрения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ООО «Казанское»

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО
Дальневосточный ГАУ

«03» сентября 2024 г.
М.П.



УТВЕРЖДАЮ
Глава Махмудов Сами Адилшах Оглы

С.А. Махмудов
«03» сентября 2024 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технических работ в высших учебных заведениях

Мы, нижеподписавшиеся, представители ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ
П.Н. Школьников, Д.В. Ермаков, С.Н. Школьников и представители КФХ С.А. Махмудов,
М.А. Федотов, С.Н. Русаков

Составили настоящий акт о том, что в 2024 г. в результате проведения научно-исследовательских работ по теме: «Повышение эффективности использования колёсных энергетических средств при подготовке почвы»

в процессе внедрения были выполнены следующие работы: внедрена в работу и исследована конструкция догружающе-распределяющего устройства сцепного веса тяжёлой дисковой бороны

На основании исследования установлено, что использование в составе трактора МТЗ-80 и бороны БДТ-3 с предлагаемым устройством позволяет снизить энергозатраты на 124,20 МДж/га по сравнению с серийным вариантом

Предложения по дальнейшему внедрению результатов:

Рекомендовать внедрить устройство для изменения нагрузки, приходящейся на рабочий орган за счёт использования предложенного технического решения

Представители ФГБОУ ВО
Дальневосточный ГАУ

П.Н. Школьников

Д.В. Ермаков

С.Н. Школьников

Представители КФХ
Махмудов Сами Адилшах Оглы

С.А. Махмудов

М.А. Федотов

С.Н. Русаков

Рисунок Б.2 – Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технических работ в ИП Глава КФХ Махмудов Сами-Адилшах
Оглы

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО
Дальневосточный ГАУ
«11» 11 2026 г.
М.П.

УТВЕРЖДАЮ
Глава КФХ
Усманов Машгял Муталибович
«11» 11 2026 г.
М.П.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технических работ в высших учебных заведениях

Мы, нижеподписавшиеся, представители ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ
П.Н. Школьников, Д.В. Ермаков, С.Н. Школьников и представители КФХ М.М. Усманов,
А.В. Рубан, А.А. Свистильников

Составили настоящий акт о том, что в 2026 г. в результате проведения научно-исследовательских работ по теме: «Повышение эффективности использования колёсных энергетических средств при подготовке почвы» в процессе внедрения были выполнены следующие работы: внедрена в работу и исследована конструкция догружающе-распределяющего устройства сцепного веса тяжёлой дисковой бороны

На основании исследования установлено, что использование в составе трактора МТЗ-80 и бороны БДТ-3 с предлагаемым устройством позволяет снизить энергозатраты на 168,18 МДж/га по сравнению с серийным вариантом

Предложения по дальнейшему внедрению результатов:
Рекомендовать внедрить устройство для изменения нагрузки, приходящейся на рабочий орган за счёт использования предложенного технического решения

Представители
ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ
П.Н. Школьников
Д.В. Ермаков
С.Н. Школьников

Представители КФХ
Усманов Машгял Муталибович
М.М. Усманов
А.В. Рубан
А.А. Свистильников

Рисунок Б.3 - Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технических работ в ИП Глава КФХ Усманов Машгял Муталибович

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО
Дальневосточный ГАУ
П.В. Тихончук
« 08 » сентября 2025 г.
М.П.



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «АГРО-С.Е.В.»
Е.В. Суздальцев
« 09 » сентября 2025 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технических работ в высших учебных заведениях

Мы, нижеподписавшиеся, представители ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ
П.Н. Школьников, Д.В. Ермаков, С.Н. Школьников и представители ООО «АГРО-С.Е.В.»
Е.В. Суздальцев, А.В. Попов, К.Ю. Кедя

Составили настоящий акт о том, что в 2025 году в результате проведения научно-исследовательских работ по теме: «Повышение эффективности использования колёсных энергетических средств при подготовке почвы» в процессе внедрения были выполнены следующие работы: внедрена в работу и исследована конструкция догружающе-распределяющего устройства сцепного веса тяжёлой дисковой бороны

На основании исследования установлено, что использование в составе трактора МТЗ-80 и бороны БДТ-3 с предлагаемым устройством позволяет снизить энергозатраты на 146,11 МДж/га по сравнению с серийным вариантом

Предложения по дальнейшему внедрению результатов:

Рекомендовать внедрить устройство для изменения нагрузки, приходящейся на рабочий орган за счёт использования предложенного технического решения

Представители
ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ

П.Н. Школьников
Д.В. Ермаков
С.Н. Школьников

Представители
ООО «АГРО-С.Е.В.»

Е.В. Суздальцев
А.В. Попов
К.Ю. Кедя

Рисунок Б.4 - Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технических работ в ООО «АГРО С.Е.В.»