

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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Благовещенск, 2026

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

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Школьников Павел Николаевич

Официальные оппоненты: **Камбулов Сергей Иванович,**
доктор технических наук, доцент, ФГБНУ
«Аграрный научный центр «Донской», отдел
механизации растениеводства, главный
научный сотрудник

Припоров Игорь Евгеньевич,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Кубанский государственный аграрный
университет им. И. Т. Трубилина», кафедра
«Тракторы, автомобили и техническая
механика», профессор

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Донской государственный
аграрный университет»

Защита состоится «09» декабря 2026 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.013.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет», (ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ) по адресу: 675005, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86, корпус 1, ауд. 117.

Телефон: +7 (4162) 99-51-79; E-mail: dis35201303@dalgau.ru

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Панова Елена Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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. 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.

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 перекатывании 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 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.

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

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.

Научная гипотеза заключается 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.

Объект исследований – 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 работы 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 колеса энергетического средства и рабочие органы дисковой бороны, глубину обработки почвы, эффективность использования колёсных тракторов класса 1,4 с дисковыми боронами. 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.

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 ГОСТами. 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 колеса (двигатели) колёсного энергетического средства и рабочие органы дисковой бороны;
- аналитические зависимости, позволяющие выявить влияние предлагаемого технического решения (устройства) на распределение силовых нагрузок, приходящихся на колеса 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.

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

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» (К2), «Известия Оренбургского государственного аграрного университета» (К2), «Вестник Курганской ГСХА» (К2), «АгроЭкоИнфо» (К3), «Вестник Алтайского государственного аграрного университета» (К2), «Нива Поволжья» (К2).

В перечень работ, опубликованных по теме диссертации, включено 26 публикаций, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе охарактеризованы территориальные и природно-климатические особенности Амурской области и их влияние на агротехнологические процессы, в первую очередь — на подготовку и обработку почвы.

Природно-ресурсный потенциал и приграничное положение определяют специфику социально-экономического и аграрного развития региона, закреплённую в Стратегии социально-экономического развития Амурской

области до 2035 года. Сельскохозяйственная деятельность концентрируется преимущественно в южной части, где распространены более плодородные чернозёмы; в северных районах почвы менее продуктивны и подвержены эрозии, что требует адаптации агротехнологий. Основной проблемой особенно в небольших КФХ остается процесс подготовки почвы к посевным работам из-за ограниченных временных показателей в весенний период.

Проблеме обработки почвы и повышения эффективности использования почвообрабатывающих машин и механизмов посвящены многие труды. Среди них работы авторов Апажева А.К., Аушева М.Х., Горячкина В.П., Желиговского В.А., Багманова Р.С., Беляева А.Н., Валиева А.Р., Голубева В.В., Демко А.Н., Егорова А.С., Кузнецова Е.Е., Макеевой Ю.Н., Мезниковой М.В., Нестяк В.С и других.

Исследованиям в области совершенствования поверхностной обработки почвы дисковыми рабочими органами посвящены работы многих российских ученых: Редкокашин А.А., Никитин В. В., Мякотина О. М., Сергунцов А.С., Ожерельев В. Н., Слепенков А.Е., Кобяков И.Д., Горячкин В.П., Кузнецов Е.Е., Поликутина Е.С., Леонов В.В., Третьяков А. И., Шевкун В. А. и других авторов.

Особое внимание авторами уделено вопросу боронования как важнейшей операции подготовки почвы в условиях региона. Боронование обеспечивает разрыхление почвы, уничтожение сорняков, перемешивание растительных остатков и формирование мелкокомковатой структуры для посева. 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. 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).

Во второй главе для реализации предлагаемых направлений повышения эффективности машинно-тракторных агрегатов при бороновании в результате патентного поиска предложено обоснованное решение обозначенной задачи, применением новых технических решений патент РФ на изобретение № 2812473, патент РФ на изобретение № 2821900, патент на полезную модель № 244122. Отличия устройств заключается в конструкции передающего механизма (плоская рессорная пружина или металлическая труба круглого сечения) (рисунок 1).

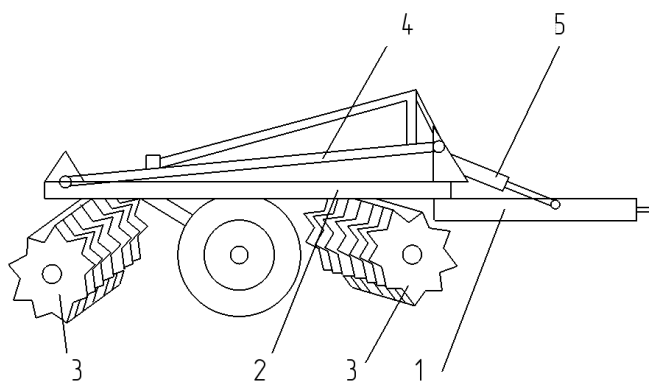


Рисунок 1 – Профильный вид бороны с корректором-распределителем силовой нагрузки в бороновальном агрегате

1 - сница; 2 - рама бороны; 3 - рабочие органы (диски); 4 - корректор сцепного веса; 5 – гидроцилиндр.

При определении нагрузок, приходящихся на рабочие органы бороновального агрегата, рассмотрено три положения предлагаемого корректора-распределителя силовой нагрузки в бороновальном агрегате: при неработающем корректоре-распределителе силовой нагрузки в бороновальном агрегате; при работе корректора-распределителя силовой нагрузки в бороновальном агрегате в режиме загрузки энергетического средства; при работе корректора-распределителя силовой нагрузки в бороновальном агрегате 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, в режиме неработающего догружающего устройства.

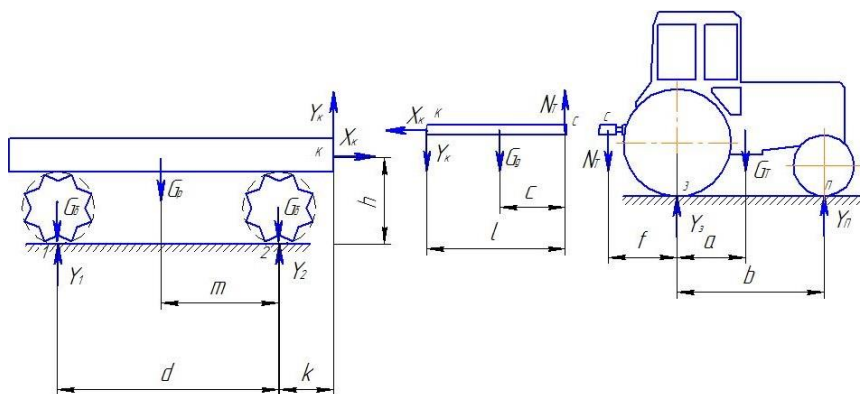


Рисунок 2 - Схема к определению вертикальных реакций поверхности без работы корректора-распределителя силовой нагрузки в бороновальном агрегате

На рисунке 2 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 сноты 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; N_T – силовая реакция сноты в буксирном устройстве трактора, Н; b – продольная база трактора, Н; a – расстояние от вертикальной проекции центра масс трактора до центра пятна контакта заднего ведущего колеса, м; c – точка сцепления сноты и трактора в буксирном устройстве; f – расстояние от вертикальной проекции точки «с» - в точке сцепления сноты и трактора в буксирном устройстве до центра пятна контакта заднего ведущего колеса, м; S – расстояние от вертикальной проекции точки «с» - в точке сцепления сноты 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 под передней секцией бороны, м; d – продольная база бороны, м; 1 и 2 – точки в центре пятна контакта задней и передней секций бороны.

На основании проведенных исследований были получены аналитические зависимости, позволяющие определить реакции опорных поверхностей машинно-тракторного агрегата при нейтральном положении предлагаемого устройства (рисунок 2):

- под задним движителем энергетического средства:

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

- под передним движителем энергетического средства:

$$Y_{\Pi} = G_T \frac{a}{b} - G_g \cdot f \cdot \left(1 - \frac{c}{l}\right) \quad (2)$$

- под передними секциями дисковой бороны:

$$Y_2 = G_6 + G_p \left(1 - \frac{m}{d}\right) + G_g \cdot \frac{c \cdot (k+d)}{l \cdot d} \quad (3)$$

- под задними секциями дисковой бороны:

$$Y_1 = G_6 + G_p \frac{m}{d} - G_g \frac{c \cdot k}{l \cdot d} \quad (4)$$

Рассмотрим равновесие системы МТА при работающем корректоре-распределителе силовой нагрузки. Весом корректора-распределителя силовой нагрузки пренебрегаем, в связи с малозначимостью. Рассмотрим схему равновесия составной конструкции: трактор + сница + борона + корректор-распределитель силовой нагрузки, предложенную на рисунке 3.

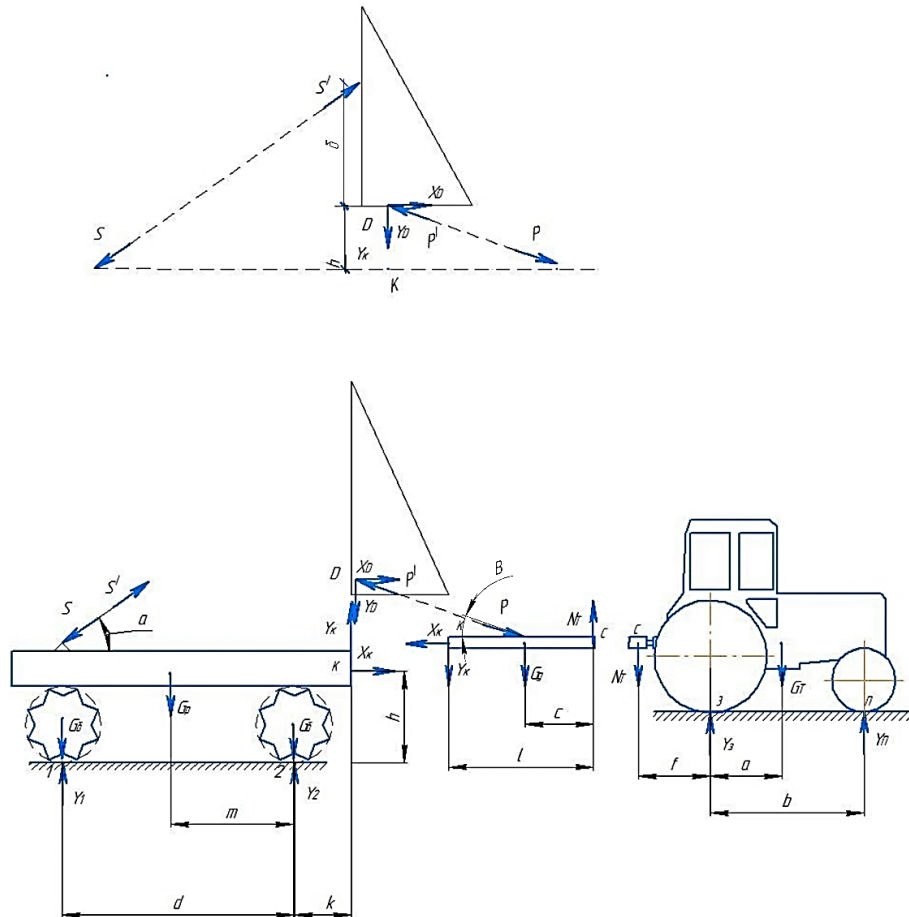


Рисунок 3 - Схема к определению вертикальных реакций поверхности при работе корректора-распределителя силовой нагрузки в бороновальном агрегате

По расчетной схеме на рисунке 3 составим уравнения равновесия для каждой части составной конструкции в отдельности и решим системы уравнений относительно неизвестных реакций.

- под задним движителем энергетического средства:

$$Y'_3 = G_T \left(1 - \frac{a}{b}\right) + G_g \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right) + P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right) \quad (5)$$

- под передним движителем энергетического средства:

$$Y'_n = G_T \frac{a}{b} - G_g \left(1 - \frac{c}{l}\right) \frac{f}{b} - P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \cdot \frac{f}{b} \quad (6)$$

- под передними секциями дисковой бороны:

$$Y'_2 = G_6 + G_p \left(1 - \frac{m}{d}\right) + G_g \frac{c}{l} \left(1 + \frac{k}{d}\right) - P \sin \beta \left(1 + \frac{k}{d}\right) \cdot \left(1 - \frac{c}{l}\right) - P \cos \beta \frac{m}{d} - \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \tan \alpha}{(\delta + r)} \left(1 + \frac{k}{d}\right) \quad (7)$$

- под задними секциями дисковой бороны:

$$Y_1' = G_6 + G_p \frac{m}{d} - G_g \frac{c \cdot k}{l \cdot d} + \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\delta + r} \cdot \left(1 + \frac{k}{d}\right) + P \sin \beta \frac{k}{d} \left(1 - \frac{c}{l}\right) + P \cos \beta \frac{n}{d} \quad (8)$$

Анализ уравнений позволяет сделать выводы о том, что при выходе штока гидроцилиндра предлагаемого устройства происходят следующие перераспределения нагрузок в системе МТА: задние колеса трактора загружаются на величину $P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right)$, передние колеса трактора разгружаются на величину $P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \cdot \frac{f}{b}$, передние секции бороны разгружаются на величину $P \sin \beta \left(1 + \frac{k}{d}\right) \cdot \left(1 - \frac{c}{l}\right) - P \cos \beta \frac{m}{d} - \frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(\delta + r)} \left(1 + \frac{k}{d}\right)$, задние секции бороны загружаются на величину $\frac{P \cos \beta \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\delta + r} \cdot \left(1 + \frac{k}{d}\right) + P \sin \beta \frac{k}{d} \left(1 - \frac{c}{l}\right) + P \cos \beta \frac{n}{d}$.

Аналогичные исследования были проведены и при втягивании штока гидроцилиндра предлагаемого устройства в режиме разгрузки энергетического средства: разгружается сцепное устройство и задние ведущие колёса трактора на величину $P \cdot \sin \beta \cdot a \cdot l$, разгружаются задние секции бороны 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 $P \cdot (\sin \beta \cdot (1 + d \cdot b) \cdot a \cdot l + \cos \beta \cdot b)$.

Исследованиями установлено, 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):

$$W_c = 0,36 B_p \cdot V_T \cdot \left(1 - \frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y_3}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y_3}\right)^3}\right) \cdot \tau \quad (9)$$

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

$$W_3 = 0,36 B_p \cdot V_T \cdot \left(1 - \frac{0,248 \frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right)}}{1 - 3,077 \left(\frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta \left(1 - \frac{c}{l}\right) \left(1 + \frac{f}{b}\right)}\right)^3}\right) \cdot \tau \quad (10)$$

С учётом полученных выражений (9) и (10) увеличение производительности экспериментального бороновального машинно-

тракторного агрегата можно представить следующем выражением:

$$\Delta W_3 = 0,043B_p \cdot V_T \cdot \left(\frac{\frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{\zeta}{l})(1 + \frac{f}{b})}}{\left(\frac{P_{кр}}{Y_3 + P \sin \beta (1 - \frac{\zeta}{l})(1 + \frac{f}{b})} \right)^3} - \frac{\frac{P_{кр}}{Y_3}}{\left(\frac{P_{кр}}{Y_3} \right)^3} \right) \cdot \tau \quad (11)$$

В третьей главе приводится методика и условия экспериментальных исследований. Для подтверждения адекватности полученных теоретических предпосылок были проведены экспериментальные исследования в реальных условиях эксплуатации (производственные испытания). Были поставлены следующие задачи: проверить влияние устройства в реальных условиях эксплуатации на распределение силовой нагрузки на колеса энергетического средства (трактора); определить влияние устройства в реальных условиях эксплуатации на распределение силовой нагрузки на рабочие органы почвообрабатывающего агрегата БДТ-3; выявить влияние бороновального машинно-тракторного агрегата с предлагаемым устройством на агротехнологические показатели бороновального агрегата; провести сравнительные хозяйственные испытания экспериментального МТА; дать топливно-энергетическую оценку почвообрабатывающего бороновального агрегата с установленным устройством. Исследования проводились по общим и частным методикам с использованием математического моделирования эксперимента и методов регрессивного анализа.

При проведении экспериментальных исследований производилось измерение нагрузки, приходящейся на рабочие органы бороны и на колеса энергетического средства, измерения по определению угла наклона рамы бороны, тяговое усилие на крюке трактора, длина выхода штока гидроцилиндра, пройденный путь, плотность почвы, влажность почвы, глубина обработки почвы, качество обработки почвы. Для определения вышеперечисленных параметров использовались измерительные приборы и инструменты. Опытные испытания проводились в реальных условиях эксплуатации МТА в Амурской области. Обработка данных, полученных в ходе эксперимента, проводилась известными методами математической статистики.

В четвертой главе работы приводятся результаты экспериментальных исследований. Исследования проводили с одним и тем же трактором МТЗ-82 и бороной БДТ-3 для получения достоверных данных. Производственную проверку проводили на базе отдела семеноводства ФГБОУ ВО Дальневосточного ГАУ.

При увеличении длины штока гидроцилиндра относительно нейтрального положения устройства (без передачи нагрузки) произошло изменение силовой нагрузки в системе почвообрабатывающего бороновального агрегата.

Результаты экспериментальных исследований по определению изменения силовой нагрузки при увеличении длины штока гидроцилиндра приведены на рисунке 4.

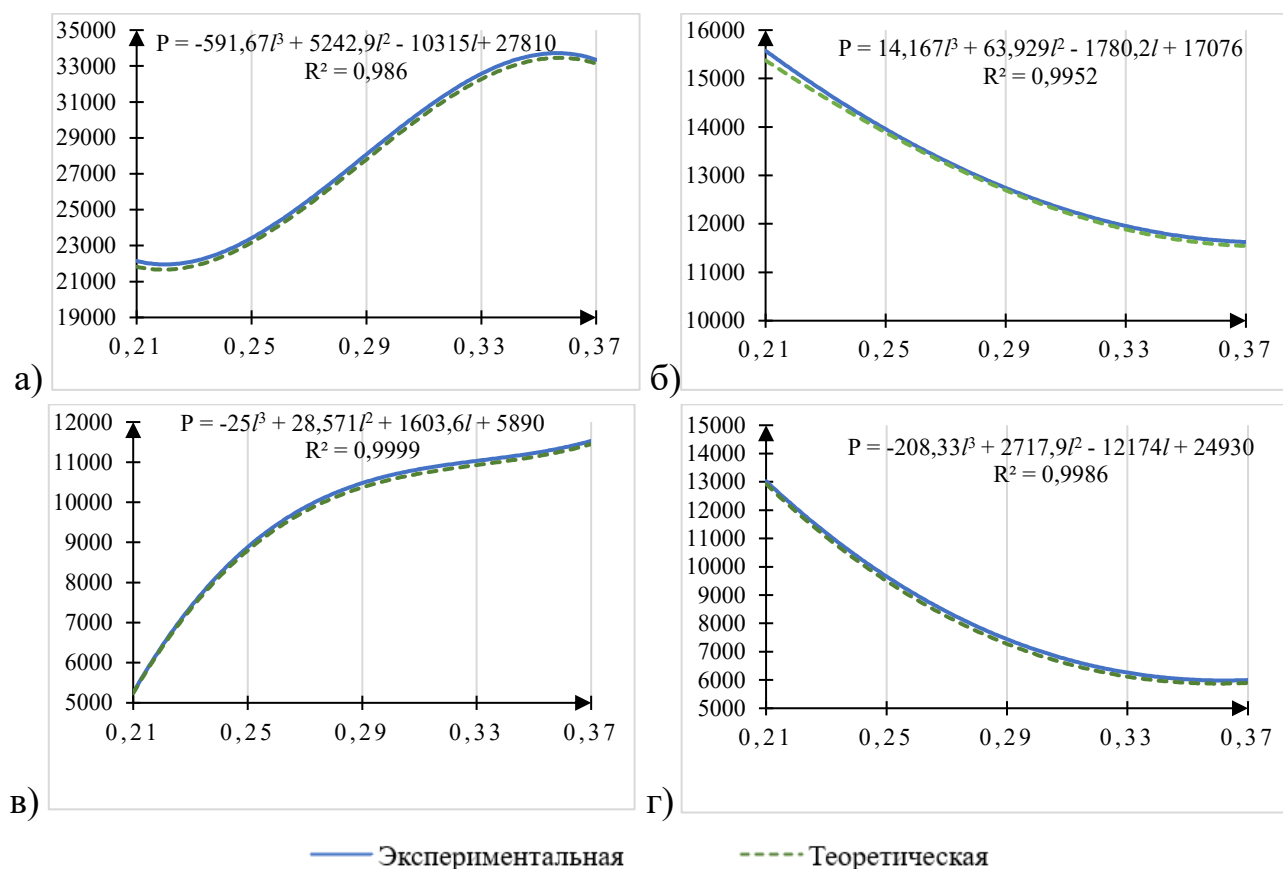


Рисунок 4 - Изменение силовой нагрузки в зависимости от увеличения длины выхода штока гидроцилиндра (ось абсцисс – длина выхода штока, м; ось ординат – силовая нагрузка, Н)

а – нагрузка на задние движители трактора, б - нагрузка на передние движители трактора, в - нагрузка на рабочие органы задних секций бороны, г - нагрузка на рабочие органы передних секций бороны

Анализируя зависимости, приведенные на рисунке 4 необходимо отметить, что произошло изменение силовой нагрузки 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;
- снижение нагрузки на передние движители трактора с 15600 Н до 11650 Н;
- увеличение нагрузки на рабочие органы задних секций бороны с 5225 Н до 11500 Н;
- снижение нагрузки на рабочие органы передних секций бороны с 13025 Н до 6000 Н.

Исходя из полученных выше результатов установлено, что увеличение длины выхода штока гидроцилиндра на 0,16 м позволило увеличить сцепной вес

трактора и, как следствие, повысить его тягово-сцепные свойства за счёт частичного использования веса бороны.

Результаты экспериментальных исследований по определению изменения силовой нагрузки при уменьшении длины выхода штока гидроцилиндра приведены на рисунке 5.

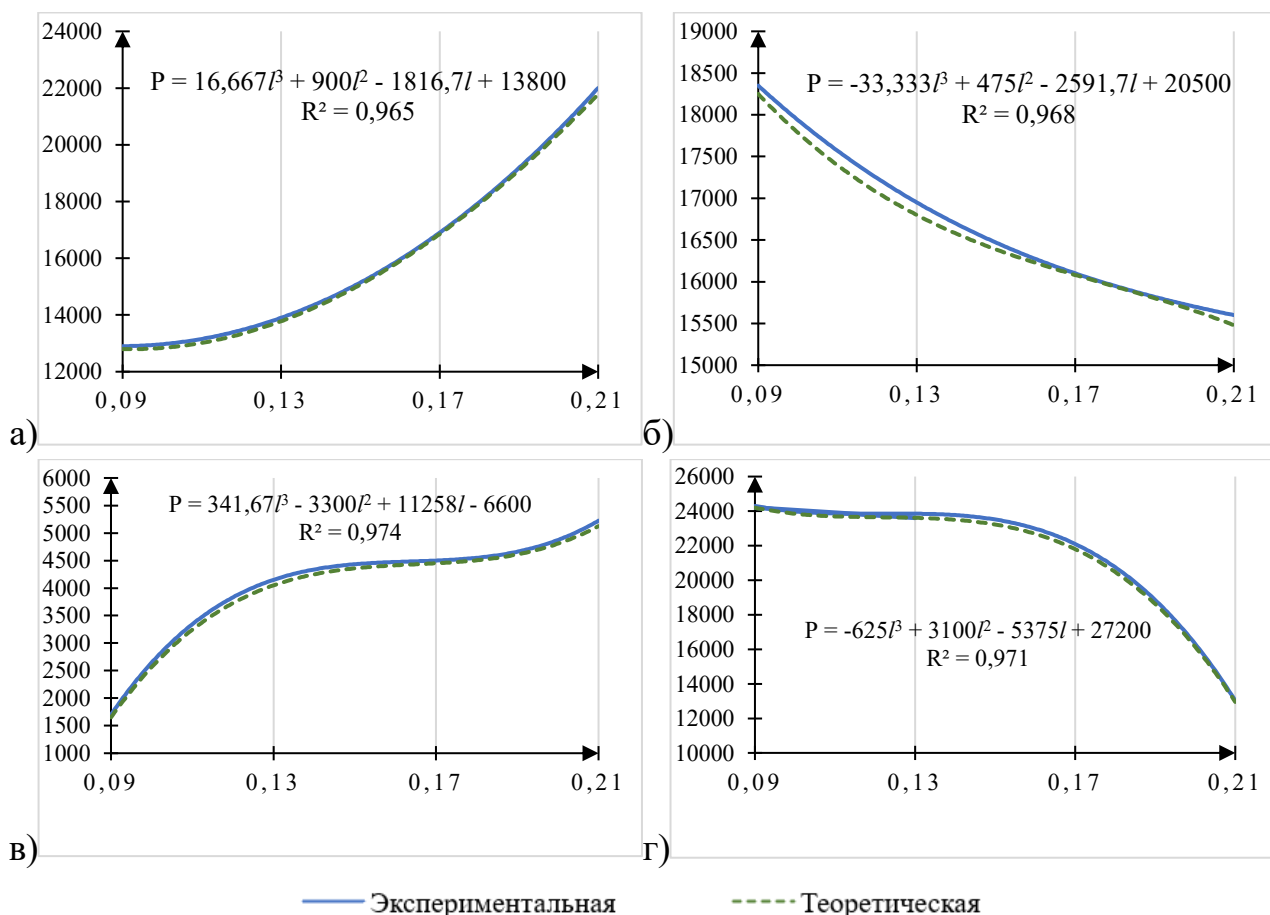


Рисунок 5 - Изменение силовой нагрузки в зависимости от уменьшения длины выхода штока гидроцилиндра (ось абсцисс – длина выхода штока, м; ось ординат – силовая нагрузка, Н)

а – нагрузка на задние движители трактора, б - нагрузка на передние движители трактора, в - нагрузка на рабочие органы задних секций бороны, г - нагрузка на рабочие органы передних секций бороны

Анализируя зависимости, приведенные на рисунке 5 необходимо отметить, что произошло изменение силовой нагрузки, приходящейся на колеса трактора и рабочие органы бороны при уменьшении длины выхода штока гидроцилиндра с 0,21 до 0,09 м в следующих параметрах:

- снижение нагрузки на задние движители трактора с 22020 Н до 12900 Н;
- увеличение нагрузки на передние движители трактора с 15600 Н до 18350 Н;
- снижение нагрузки на рабочие органы задних секций бороны с 5225 Н до 1700 Н;

- увеличение нагрузки на рабочие органы передних секций бороны с 13025 Н до 24300 Н.

Исходя из полученных выше результатов, представленных на рисунке 5, можно отметить следующее, что уменьшение длины выхода штока гидроцилиндра на 0,12 м позволило увеличить вес, приходящейся на передние движители трактора. Как показали проведенные исследования, результаты теоретических и экспериментальных данных находятся в пределах доверительного интервала 3,5-5 %, что говорит о достоверности проведенного теоретического обоснования.

Для подтверждения эффективности использования предложенного устройства были проведены сравнительные хозяйственные испытания. Установлено, что использование машинно-тракторного агрегата с предлагаемым устройством 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.

На основании результатов проведенных исследований процесса подготовки почвы проведен регрессионно-дисперсионный анализ по определению влияния корректора-распределителя силовой нагрузки в бороновальном агрегате на задние колеса энергетического средства (в зависимости от угла наклона рамы бороны).

С целью определения влияния конструктивно-технологических параметров разработанного устройства на силовую нагрузку, приходящуюся на задние движители трактора, построены и проанализированы полученные полиномиальные математические модели третьего порядка, удовлетворяющие критериям ортогональности.

При трех сериях опытов с помощью ортогонального центрального композиционного плана установили влияние конструктивно-технологических факторов : $x_1 - \alpha$ – 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.

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

$$P(v, h) = 151,2 + 16v^2 - 75,45v + 0,143vh - 4,96h + 0,135h^2 \quad (12)$$

Графическая визуализация уравнения представлена на рисунке 6.

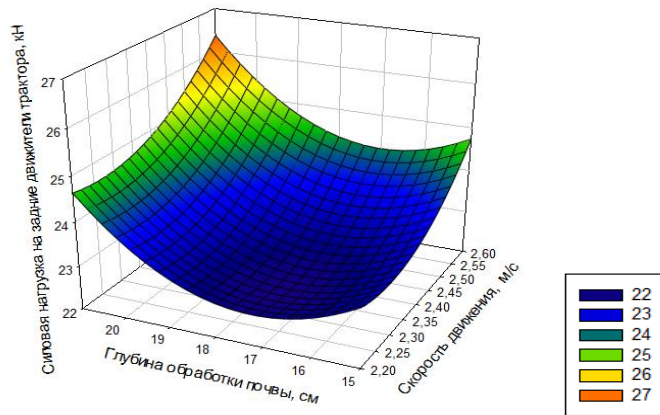


Рисунок 6 – Поверхность отклика зависимости силовой нагрузки, распределяемой на задние движители трактора при фиксированном значении угла наклона рамы бороны $\alpha = 4$ град от скорости движения и глубины обработки почвы

Экспериментальные исследования показали (рисунок 6), 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 (13)

$$P(\alpha, h) = 56,98 + 0,096\alpha h + 0,135h^2 - 0,0396h + 0,99h\alpha \quad (13)$$

При фиксированной скорости движения, применение 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 %.

Аналогичные исследования по определению влияния конструктивно-технологических параметров применяемого устройства на силовую нагрузку, приходящуюся на передний мост трактора от длины выхода штока гидроцилиндра.

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

$$f(a, h) = -22,75a^2 + 24,93025a - 249,03452h^2 + 89,74217h - 21,13308 \quad (14)$$

На рисунке 7 показана графическая интерпретация формулы (14) при фиксированной скорости движения трактора.

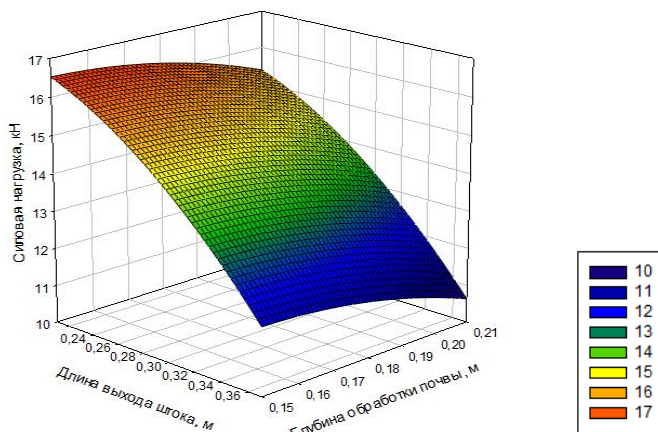


Рисунок 7 - Поверхность отклика зависимости силовой нагрузки на передние движители трактора от глубины обработки почвы и степени выдвижения штока гидроцилиндра (скорость движения зафиксирована на уровне $v=2,4$ м/с)

Согласно результатам экспериментов (рисунок 7), максимальное снижение усилия на передние движители трактора наблюдается при длине выхода штока гидроцилиндра 0,36 м и достигает 37%. 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 от скорости движения и глубины обработки почвы определяется выражением (15).

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

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.

Для определения влияния конструктивно-технологических параметров предлагаемого устройства на величину нагрузки приходящейся на рабочие органы бороны были проведены аналогичные исследования. Исследования показали, что наибольшее увеличение силовой нагрузки на исполнительные (рабочие) органы бороны фиксируется при угле наклона бороны 12 град на 47%. Увеличение скорости движения почвообрабатывающего агрегата в исследуемом диапазоне позволяет повысить силовую нагрузку на исполнительные (рабочие) органы задней секции бороны до 13,2 кН.

В пятой главе проведена экономическая и топливно-энергетическая оценка использования МТА в составе трактора МТЗ-82 и бороны БДТ-3 с предлагаемым устройством.

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. Повысить эффективность использования бороновальных агрегатов и качество проводимых работ возможно за счёт регулирования силовой нагрузки, приходящейся на колеса энергетического средства и рабочие органы бороны.

3. С учётом специфических условий региона предложено техническое решение, позволяющее при необходимости перераспределять нагрузку в системе бороновального агрегата в зависимости от 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 относительно нейтрального положения устройства (без передачи нагрузки) 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 %. 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° ... 12° 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°...12° 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 применении экспериментального МТА 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 в размере 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 основных работ, опубликованных по теме исследования

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

1. 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.

2. Ермаков, Д. В. Распределение вертикальной нагрузки дисковой бороны с корректором сцепного веса / Д. В. Ермаков [и др.] // Сельский механизатор. – 2022. – № 3. – С. 4-5.

3. Ермаков, Д. В. Влияние энергозатрат на формирование рационального машинно-тракторного парка / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 5(59). – DOI 10.51419/202135516.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Ермаков, Д. В. Адаптация бороновального агрегата для подготовки почвы / Д.В. Ермаков, П.Н. Школьников [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 206. – С. 190-197. – DOI 10.21515/1990-4665-206-013.

8. Ермаков, Д. В. Особенности подготовки почвы к посевным работам в весенний период / Д. В. Ермаков [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2026. – № 219. – С. 133-146. – DOI 10.21515/1990-4665-219-013.

9. Ермаков, Д. В. Приспособление почвообрабатывающей техники к природно-климатическим и производственным условиям региона / Д.В. Ермаков [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2026. – № 217. – С. 219-235. – DOI 10.21515/1990-4665-217-021.

10. 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.

11. Ермаков, Д. В. Снижение силового воздействия передних управляемых колёс энергетического средства на почву при бороновании / Д. В. Ермаков [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2026. – Т. 11, № 3. – С. 43-52. – DOI 10.55170/1997-3225-2026-11-3-43-52.

12. Ермаков, Д. В. Технология повышения эффективности подготовки почвы к посевным работам / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2026. – № 4(120). – С. 80-85. – DOI 10.37670/2073-0853-2026-120-4-80-85.

13. Ермаков, Д. В. Результаты производственной проверки работы бороновального агрегата с догрузочно-распределяющим устройством/ Д.В. Ермаков [и др.] // Нива Поволжья – 2026. – №1 (77). – DOI 10.36461/NP.2026.77.1.016.

Патенты:

14. Патент № 2821900 С1 Российская Федерация, МПК А01В 21/00. Распределяюще-догружающее устройство для прицепной рамной дисковой бороны : № 2023131290 : заявл. 30.11.2023 : опубл. 27.06.2024 / Д. В. Ермаков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ".

15. Патент № 2812473 С1 Российская Федерация, МПК А01В 71/02, А01В 63/11, А01В 21/08. Догрузочно-распределяющее устройство для прицепной рамной дисковой бороны : № 2023124750 : заявл. 27.09.2023 : опубл. 30.01.2024 / Д. В. Ермаков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ".

16. Патент на полезную модель № 244122 Рос. Федерация. Корректор-распределитель силовой нагрузки в бороновальном агрегате : № 2026106648: заявл. 13.03.2026. / Д. В. Ермаков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ".

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682338 Российская Федерация. Программа расчёта топливно-энергетической оценки работы трактора класса 1,4 на бороновании : заявл. 19.09.2024 : опубл. 20.09.2024 / Д.В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] ; заявитель Дальневосточный государственный аграрный университет.

В прочих научных изданиях:

18. Ермаков, Д. В. Повышение эффективности использования дисковых борон / Д. В. Ермаков // Студенческие исследования - производству : Материалы 29-й студенческой научной конференции, Благовещенск, 11 ноября 2021 года / Отв. редактор А.И. Герасимович. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2021. – С. 77-83.

19. Ермаков, Д. В. Повышение эффективности работы дисковой бороны / Д. В. Ермаков // Молодёжь XXI века: шаг в будущее : Материалы XXIII региональной научно-практической конференции, Благовещенск, 24 мая 2022 года. Том 4. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2022. – С. 15-16.

20. Ермаков, Д. В. Повышение качества предпосевной подготовки почвы / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников [и др.] // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования : Материалы XV международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова, Новосибирск, 09–11 ноября 2023 года. – Новосибирск: Издательский центр НГАУ "Золотой колос", 2023. – С. 23-26.

21. 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:

Общество с ограниченной ответственностью "Ставропольское издательство "Параграф", 2023. – С. 217-219.

22. 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 ученых (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.), посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19–20 декабря 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 19-23.

23. Ермаков, Д. В. Улучшение реализации тягово-сцепных свойств колесного трактора / Д. В. Ермаков [и др.] // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития: Материалы международной научно-практической конференции. В 5 томах, Благовещенск, 18–19 апреля 2024 года. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2024. – С. 180-185. – DOI 10.22450/978-5-9642-0633-0-180-185.

24. Ермаков, Д. В. Повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов на бороновании / Д. В. Ермаков, П. Н. Школьников // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию Дальневосточного государственного аграрного университета. В 3 т., Благовещенск, 16–17 апреля 2025 года. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2025. – С. 286-292. – DOI 10.22450/978-5-9642-0480-0-286-292.

25. 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.

26. 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.