

На правах рукописи



НИКОЛЕНКО АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО
СРЕДСТВА ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОЧВЫ ПОД ЗЕРНОВЫЕ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромыш-
ленного комплекса

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ)

Научный руководитель:	Тарасенко Борис Фёдорович доктор технических наук, доцент
Официальные оппоненты:	Соболевский Иван Витальевич доктор технических наук, доцент, ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет им. Февзи Якубова», проектный офис, начальник (г. Симферополь) Божко Игорь Владимирович кандидат технических наук, ФГБНУ АНЦ «Донской», отдел «Механизации растениеводства», старший научный сотрудник (г. Зерноград)
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (п. Персиановский)

Защита диссертации состоится «23» сентября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13 (корпус факультета энергетики, ауд. 110).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <https://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г., размещен на официальном сайте ВАК РФ <https://vak.gisnauka.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <https://kubsau.ru/>.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Самурганов Евгений Ерманекосович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Обработка почвы важный этап любой технологии возделывания сельскохозяйственных культур. Данный процесс, несмотря на многолетние исследования, до сих пор остается не до конца изученным. Процесс почвообработки можно охарактеризовать как высокозатратный, на него приходится в среднем до 35 % всех энергетических затрат. Полностью исключить процесс обработки почвы из технологии возделывания зерновых не представляется возможным. Исследования, проведенные ранее, показали, что имеются существенные недостатки у комбинированных средств для основной обработки почвы.

Низкая функциональность существующих средств не позволяет использовать все плюсы разных технологий обработки почвы. При работе по отвальной технологии при обороте пласта открывается незащищенный слой почвы, который подвержен ветровой эрозии, а нижний слой почвы переуплотняется из-за давления на него трактора. Тем самым формируя плужную подошву, которая задерживает влагу, снижая плодородность до 27 %.

Безотвальное рыхление приводит к сохранению сорной растительности и образованию поверхностной корки.

Исследования И. Б. Борисенко и А. Е. Доценко показали, что переход на чизельные рабочие органы сокращает тяговое сопротивление в среднем до 45 %, при сохранении качества обработки почвы.

Неэффективный способ движения по полю приводит к увеличению времени, затрачиваемого на холостые ходы, так как существующие комбинированные средства не имеют возможности работать в режиме гладкой вспашки. Работа почвообрабатывающих машин только всвал-развал приводит к низкой энергоэффективности и со временем к ухудшению качества обработки почвы.

Следовательно, разработка многофункционального почвообрабатывающего средства, сочетающего возможность отвальной и безотвальной обработки почвы с возможностью работы в режиме гладкой вспашки, является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом 2021–2025 гг. научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (№ госрегистрации 121032300060–2).

Степень разработанности темы. основоположниками исследования процесса основной обработки почвы были: В. П. Горячкин, Б. И. Тарасенко, Г. Н. Синеоков, Л. В. Гячев и другие ученые.

Разработкой новых рабочих органов и средств для основной обработки почвы и исследованием существующих конструкций занимались: И. В. Божко, В. М. Бойков, Е. В. Бойкова, И. Б. Борисенко, А. Е. Доценко, С. И. Камбулов, В. И. Ветохин, А. Ю. Несмиян, А. С. Путрин, И. В. Соболевский, Б. Ф. Тарасенко, В. В. Труфанов, М. В. Мезникова и другие исследователи.

Большой вклад в исследования по механизации основной обработки почвы внесли ученые Аграрного научного центра «Донской» (г. Зерноград), Азово-Черноморского инженерного института – филиал ФГБОУ ВО

«Донской государственный аграрный университет» (г. Зерноград) и ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (г. Краснодар).

Несмотря на глубину и обширность исследований процесса почвообработки и средств для ее выполнения, задача снижения энергозатрат является актуальной.

Рабочая гипотеза. Снижение затрат энергии и повышение качества обработки почвы под зерновые культуры можно обеспечить обоснованием параметров и режимов работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом.

Цель работы – обоснование параметров и режимов работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом, обеспечит снижение затрат энергии и повышение качества обработки почвы для зерновых культур.

Объект исследования. Технологический процесс основной обработки почвы и многофункциональное почвообрабатывающее средство с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой.

Предмет исследования. Закономерности, связывающие параметры рабочих органов многофункционального почвообрабатывающего средства с показателями удельного тягового сопротивления и качеством обработки почвы.

Задачи исследования.

1. Разработать конструктивно-технологическую схему многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой для основной обработки почвы под зерновые культуры.

2. Получить аналитические зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режима работы.

3. Экспериментальным путем определить оптимальные параметры и режимы работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой по критерию удельного тягового сопротивления.

4. Выполнить оценку сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований.

5. Выполнить расчеты экономической эффективности предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства.

Методы исследований. Теоретические исследования проводились с учетом основных положений высшей математики, теоретической механики и сопротивления материалов. При проведении теоретических исследований применялись программы: SolidWorks, Mathcad Prime, Microsoft Excel. При проведении экспериментальных исследований применялись методы планирования многофакторного эксперимента. Обработка полученных данных осуществлена с использованием методов математической статистики.

Научная новизна работы:

- аналитические зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режимов работы;
- уравнение регрессии, позволяющее определить оптимальные параметры предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства.

Теоретическую и практическую значимость работы представляют:

- аналитические зависимости тягового сопротивления рабочих органов многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режимов работы, позволяющие обосновать основные параметры и режим работы многофункционального средства;
- регрессионные зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от геометрических параметров и режимов работы, позволяющие определить оптимальные параметры и режим работы;
- конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой, которая позволяет разработать техническое решение конструкции почвообрабатывающего средства, сочетающего процессы отвальной и безотвальной основной обработки почвы в режиме челночного движения;
- соотношение между параметрами и режимами работы многофункционального почвообрабатывающего средства, минимизирующее тяговое сопротивление и повышающее качество обработки почвы.

Новизна технических решений подтверждена двумя патентами РФ на полезные модели № 225628 и № 229905.

Реализация результатов исследований.

Опытный образец многофункционального почвообрабатывающего средства прошел производственные испытания в РПЗ «Красноармейский» – филиал ФГБНУ «ФНЦ риса» (Краснодарский край, поселок Октябрьский). Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ.

Степень достоверности и апробации работы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: результаты получены с использованием известных и хорошо зарекомендовавших методик исследования, современной измерительной и вычислительной техники; теория согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации А. Е. Доценко и В. М. Бойкова и использованы современные методы статистической обработки экспериментальных данных с использованием программ MathCad и Microsoft Excel.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на ежегодных научных конференциях ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ в 2022–2025 гг., а также на конференциях различного уровня: IV Международной научной конференции «Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России» (г. Красноярск, 2024 г.); II Международной научно-практической конференции «Энергоресурсосбережение и энергоэффективность: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Нальчик, 2023 г.); Международной научной конференции «Современные тенденции энергосбережения в АПК» (г. Москва, 2024 г.); XXIII

Международной научно-практической конференции «Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике» (г. Кемерово, 2024 г.); Международная конференция «GEOTECH-2025», (г. Навои, 2025 г.); XX Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 2025 г.).

Положения, выносимые на защиту.

1. Конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой для основной обработки почвы под зерновые культуры.

2. Аналитические зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режимов работы.

3. Уравнение регрессии, позволяющее определить оптимальные параметры предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства.

4. Результаты оценки сходимости теоретических и экспериментальных исследований.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 30 научных работ, из них: 4 – в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК РФ; 2 – в международной базе данных *Scopus*; 18 – в статьях, опубликованных по результатам участия в конференциях; 1 патент РФ на изобретение; 4 патента на полезные модели; 1 монография. Общий объем публикаций составляет 17,2 печатных листа, из них личный вклад автора 8,1 печатный лист.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Диссертация содержит 176 страниц, включая 82 рисунка, 14 таблиц, 5 приложений. Список литературы содержит 121 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлены: актуальность исследований, цель работы, задачи исследования, рабочая гипотеза, методы исследований, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

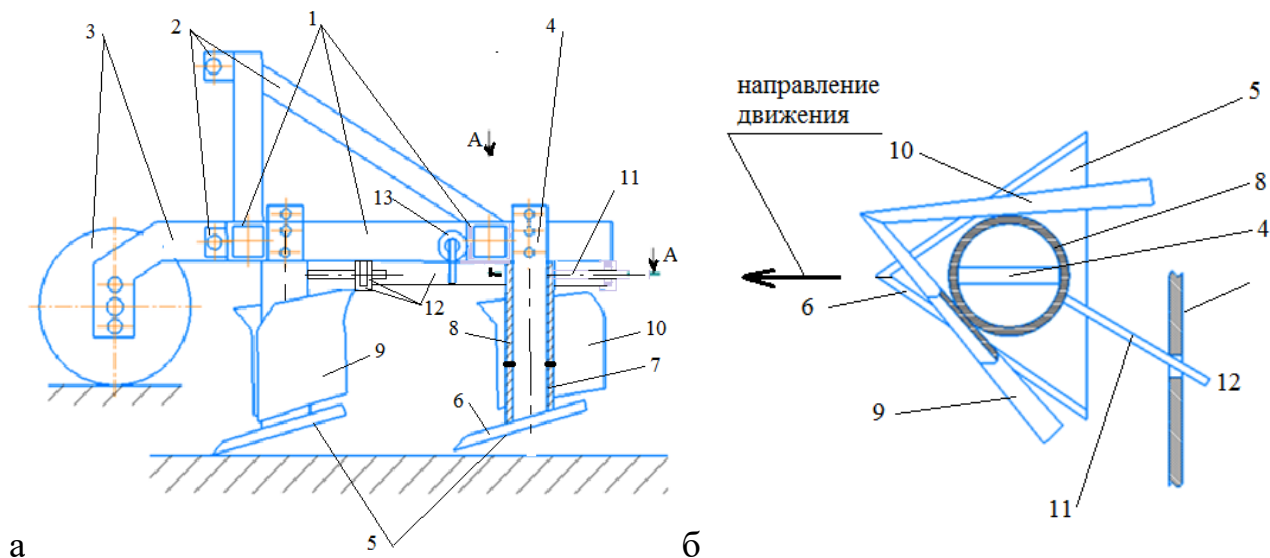
В **первой главе** проведен анализ технологий обработки почвы и обозначена роль каждого вида обработки в существующих технологиях. В ходе анализа отмечено различное влияние на эрозию почвы в зависимости от вида обработки. Безотвальные технологии мало влияют на ветровую эрозию, но создают повышенную концентрацию сорной растительности на поверхности поля и способствует образованию болезней. Отвальная обработка обеспечивает заделку сорной растительности в почву, но поверхностный слой при такой обработке подвергается ветровой эрозии. Перспективным на данный момент времени является комбинированная основная обработка почвы многофункциональными средствами в челночном режиме движения.

Обзор серийных средств для основной обработки почвы показал, что низкая функциональность существующих средств для основной обработки почвы не может обеспечить должную энергоэффективность при обработке почвы.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во **второй главе** представлены теоретические исследования сопротивления почвы рабочими органами многофункционального средства. Анализ патентных источников показал, что существующие почвообрабатывающие средства имеют высокие энергетические затраты, так как имеют низкие функциональные возможности, а у существующих многофункциональных средств нет возможности снижения энергозатрат, так как отсутствует возможность движения в режиме гладкой вспашки.

Для устранения данного недостатка было предложено многофункциональное средство (рисунок 1), на которое получены патенты РФ № 225628 и № 229905.



а – главный вид; б – сечение А – А; 1 – рама; 2 – навеска; 3 – опорное колесо; 4 – стойка; 5 – лапа; 6 – лезвие; 7 – неподвижное кольцо; 8 – поворотное кольцо; 9 – левосторонний отвал; 10 – правосторонний отвал; 11 – рычаг порота; 12 – реечный механизм; 13 – гидроцилиндр

Рисунок 1 – Принципиальная схема многофункционального почвообрабатывающего средства.

Работа многофункционального средства осуществляется в несколько этапов. В транспортном положении средство поднимается системой трехточечной навески, а гидроцилиндр приводит к перемещению реек реечного механизма, что устанавливает левосторонний отвал в направлении движения.

При движении вперед рабочие органы погружаются в почву на заданную глубину, где лапы с лезвием по краям выполняют функцию подрезания пласта, а левосторонний отвал создает отвальную поверхность для перемещения и поворота пласта почвы.

После завершения прохода многофункциональное средство возвращается в транспортное положение, и гидроцилиндр устанавливает правосторонний отвал в направлении движения. Для работы в режиме безотвального рыхления реечный механизм демонтируется, а поворотные кольца и рычаги снимаются со стоек. Лапа, установленная под углом к поверхности почвы, подрезает и рыхлит пласт, удаляя корни сорняков и разрушая плужную подошву, что способствует аэрации

почвы и увеличению ее влагоемкости. Глубина обработки регулируется с помощью опорных колес и повторного закрепления стойки.

Расчет тягового сопротивления рабочего органа многофункционального средства будем рассматривать на основе теории Г. Н. Синеокова и В. П. Горячкина. Было принято, что форма лезвия представляет собой циклоиду. Давление почвы на поверхность лапы выражалось через плотность почвы. Для расчета усилия резания добавляется удваивающий коэффициент, т. к. лапа включает два лезвия. Примем допущение считая почву как сыпучее тело, между частями которого возникает сухое трение. Общая формула тягового сопротивления многофункционального средства имеет вид:

$$P = S_x + Q_{nx} + R_x + P_T, \quad (1)$$

где S_x – усилие на резание почвы лезвием лапы, Н; Q_{nx} – усилие на деформацию почвы лапой, Н; R_x – усилие сообщения скорости частицам пласта, Н; P_T – усилие для преодоления веса и трения пласта распределенных по поверхности соприкосновения пласта с отвалом, Н.

Сила резания включает статическую составляющую и динамическую и имеет вид:

$$S_x = 2(T_1 + T_2)\cos\gamma + 2(N_1 + N_2)\sin\gamma, \quad (2)$$

где T_1 – тангенциальная проекция полной статической силы резания, Н; T_2 – тангенциальная проекция полной динамической силы резания, Н; N_1 – нормальная проекция полной статической силы резания, Н; N_2 – нормальная проекция полной динамической силы резания, Н; γ – половина угла раствора лапы, град.

Усилия резания почвы лезвием лапы S_x зависит от угла γ и сил нормального N_1, N_2 и продольного T_1, T_2 сжатия почвы (рисунок 2).

Проекции силы $d\bar{p}_1$ на направления нормали \bar{n}_0 к поверхности (рисунок 3) и касательной \bar{t}_0 к относительной траектории равны:

$$dp_1^n = kdF\cos^2\varphi, \quad (3)$$

$$dp_1^t = kdF\sin\varphi\cos\varphi, \quad (4)$$

где dp_1^t – касательная проекция элементарной статической силы, Н; dp_1^n – нормальная проекция элементарной статической силы, Н; k – нормальное давление, Па; dF – элемент площади поверхности лезвия; φ – угол трения, град.

Примем, что лезвие лапы имеет форму циклоиды, тогда радиус кривизны лезвия лапы имеет вид:

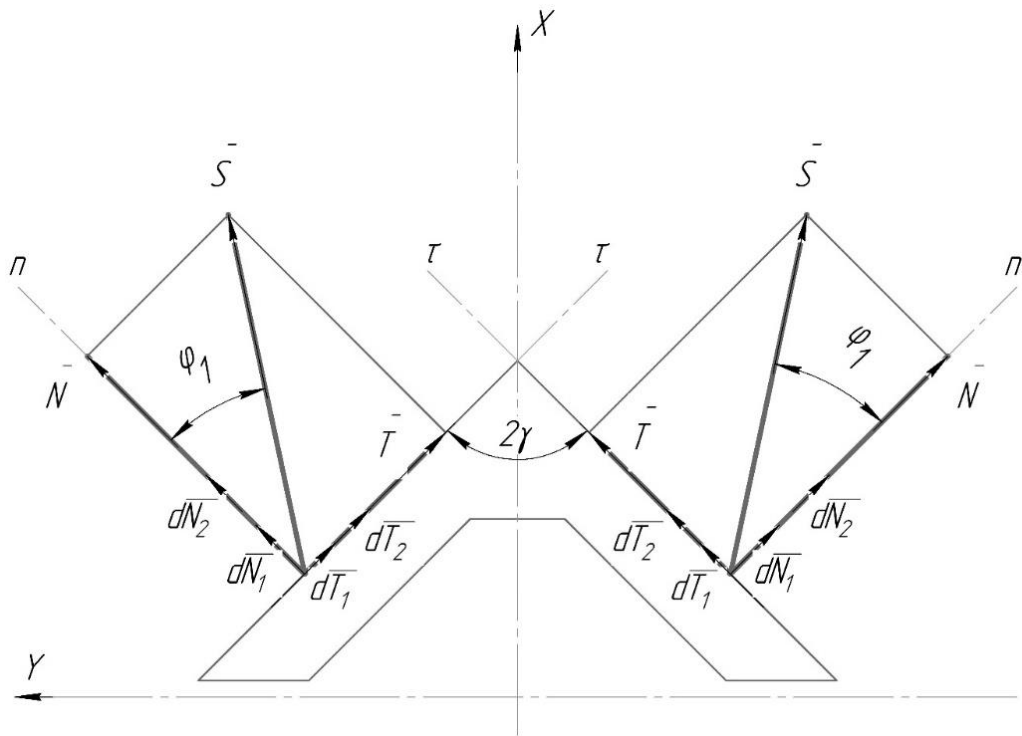
$$\mu = 4rcos(\varepsilon), \quad (5)$$

где r – радиус производящего круга, м; ε – угол заточки лезвия, рад.

Элемент площади поверхности лезвия выразится следующим образом:

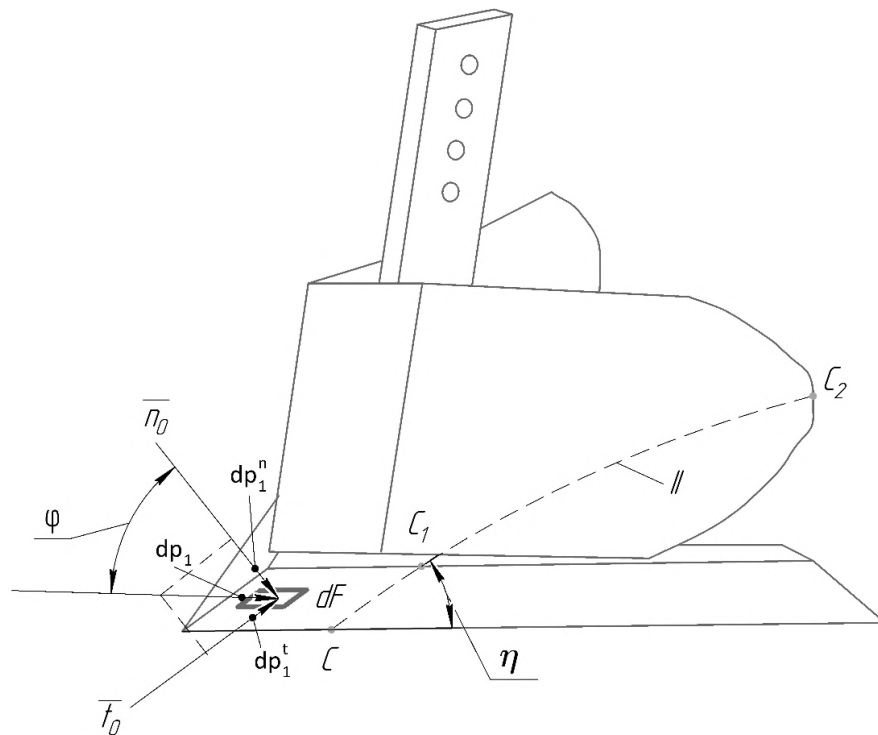
$$dF = \frac{b}{\sin\gamma} \mu(\varepsilon)d\varepsilon, \quad (6)$$

где μ – радиус кривизны лезвия лапы, м; b – половина ширины захвата, м.



dN_1 – нормальная проекция элементарной полной статической силы резания;
 dT_1 – тангенциальная проекция элементарной полной статической силы резания;
 dN_2 – нормальная проекция элементарной полной динамической силы резания;
 dT_2 – тангенциальная проекция элементарной полной динамической силы резания;
 φ_1 – приведённый угол трения лезвия о почву

Рисунок 2 – Схема расстановки сил, действующих на поверхность лезвия лапы



Π – относительная траектория движения пласта; η – угол между лезвием лапы и касательной к относительной траектории движения частицы пласта

Рисунок 3 – Схема сил, действующих на единичную площадку

Найдем проекцию элементарной силы $d\bar{p}_1$ на направления нормали \bar{N}_0 к лезвию лежащей в плоскости дна борозды, и образующей лезвия \bar{T}_0 (рисунок 2) получим на эти направления элементарные силы dp_1^n и dp_1^t :

$$\begin{cases} dN_1 = dp_1^n \sin \varepsilon + dp_1^t \sin \eta \cos \varepsilon \\ dT_1 = dp_1^t \cos \eta \end{cases} \quad (7)$$

Найдем численные значения статических составляющих усилий N_1 и T_1 :

$$N_1 = \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dN_1 = 0,2k_0\rho ghb \frac{\cos^2 \varphi}{\sin \gamma} \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sin \varepsilon + f \sin \gamma \frac{\cos^2 \varepsilon}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 \varepsilon}} \right) 4r \cos(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (8)$$

$$T_1 = \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dT_1 = 0,1k_0\rho ghb \frac{\sin 2\varphi}{tg \gamma} \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \frac{4r \cos(\varepsilon)}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 \varepsilon}} d\varepsilon, \quad (9)$$

где k_0 – безразмерная постоянная, характеризующая фрикционные свойства разрезаемой среды; ρ – плотность почвы, кг/м³; g – гравитационная постоянная, м/с²; h – глубина обработки, м; f – коэффициент трения почвы о поверхность лезвия.

Найдем силы динамического давления лезвия на почву. Применяем теорему об изменении количества движения к массе dm почвы. Тогда:

$$dp_2^n = \frac{\rho}{g} b v_e^2 \sin \gamma \cdot \sin^2 \varepsilon \cdot 4r \cos(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (10)$$

$$dp_2^t = f \frac{\rho}{g} b v_e^2 \sin \gamma \cdot \sin^2 \varepsilon \cdot 4r \cos(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (11)$$

где v_e – переносная скорость, м/с.

Проецируя составляющие элементарной динамической силы давления dp_2^n и dp_2^t на направления нормали n и образующей τ лезвия по аналогии с (7), интегрируя эти выражения в пределах от ε до $\frac{\pi}{2}$ и удваивая, найдем силы N_2 и T_2 :

$$N_2 = \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dN_2 = 2 \frac{\rho}{g} b v_e^2 \sin \gamma \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sin \varepsilon + f \sin \gamma \frac{\cos^2 \varepsilon}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 \varepsilon}} \right) \cdot 4r \cos(\varepsilon) \cdot \sin^2 \varepsilon d\varepsilon, \quad (12)$$

$$T_2 = \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dT_2 = f \frac{\rho}{g} b v_e^2 \sin 2\gamma \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^2 \varepsilon \cdot 4r \cos(\varepsilon)}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 \varepsilon}} d\varepsilon. \quad (13)$$

Деформации почвы лапой представим, как движение в почве плоского клина. Тогда усилие деформации почвы лапой находится по формуле:

$$Q_{nx} = 0,1k_0\rho g h s^2 \cdot \sin \varepsilon \sin \gamma, \quad (14)$$

где s – переменная деформация пласта, м.

Усилие, необходимое для сообщения скорости частицам пласта зависит от угла между касательной к относительной траектории движения пласта по отвалу и горизонтальной осью β_2 и имеет вид:

$$R_x = \frac{ab\rho}{g} v_e^2 (1 - \psi \cos \beta_2), \quad (15)$$

где a – толщина пласта, м; ψ – коэффициент сжатия пласта.

Составляющую тягового сопротивления, расходуемую на преодоления сил трения и веса пласта, находим исходя из максимального сжимающего усилия достигаемого при поступлении пласта на поверхность отвала. Уравнение, описывающее тяговое сопротивление на преодоления сил трения и веса пласта имеет вид:

$$P_T = \frac{1}{\cos\beta_1 - f\sin\beta_1} \left[\left(ab\rho gh_0 + f \frac{ab\rho gh_k}{R_{кр}\vartheta} \right) e^{f\theta} + f \left(0,1k_0\rho ghs^2 + \frac{ab\rho}{g} v_e^2 \sin\varepsilon \sin\gamma \right) \right], \quad (16)$$

где β_1 – угол между касательной к относительной траектории движения пласта по лапе и горизонтальной осью, град; h_0 – разность уровней расположения центров тяжести сечения пласта в наивысшей точке траектории вне отвала и в месте схода пласта с отвала, м; θ – угол охвата пласта отвалом, град; h_k – разность уровней расположения центров тяжести сечения пласта в начальной точке траектории на отвале и в месте схода пласта с отвала, м; $R_{кр}$ – радиус кривизны траектории, м; ϑ – центральный угол дуги траектории, град.

Общее тяговое сопротивление рабочего органа многофункционального средства и его составляющих представлено в виде следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = S_x + Q_{nx} + R_x + P_T \\ S_x = 2(T_1 + T_2)\cos\gamma + 2(N_1 + N_2)\sin\gamma \\ Q_{nx} = Q_n \sin\varepsilon \sin\gamma \\ R_x = \frac{ab\rho}{g} v_e^2 (1 - \psi \cos\beta_2) \\ P_T = \frac{1}{\cos\beta_1 - f\sin\beta_1} \cdot \\ \cdot \left[\left(ab\rho gh_0 + f \frac{ab\rho gh_k}{R_{кр}\vartheta} \right) e^{f\theta} + f \left(0,1k_0\rho ghs^2 + \frac{ab\rho}{g} v_e^2 \sin\varepsilon \sin\gamma \right) \right] \end{array} \right. , \quad (17)$$

Где P – тяговое сопротивление рабочего органа многофункционального средства, Н; S_x – усилие резание почвы лезвием лапы, Н; Q_{nx} – усилие деформации почвы лапой, Н; P_T – усилие для преодоления веса и трения пласта распределенных по поверхности соприкосновения пласта с отвалом, Н; R_x – усилие сообщения скорости частицам пласта, Н; k_0 – безразмерная постоянная, характеризующая фрикционные свойства разрезаемой среды; ρ – плотность почвы, кг/м³; h – глубина обработки, м; f – коэффициент трения почвы о поверхность лезвия; γ – половина угла раствора лапы, град; b – половина ширины захвата, м; v_e – переносная скорость, м/с; β_1 – угол между касательной к относительной траектории движения пласта по лапе и горизонтальной осью, град; β_2 – угол между касательной к относительной траектории движения пласта по отвалу и горизонтальной осью, град; ε – угол заточки лезвия, рад; a – толщина пласта, м; g – гравитационная постоянная, м/с²; s – переменная деформация пласта, м; h_0 – разность уровней расположения центров тяжести сечения пласта в наивысшей точке траектории вне отвала и в месте схода пласта с отвала, м; θ – угол охвата пласта отвалом, град; $R_{кр}$ – радиус кривизны траектории, м; ϑ – центральный угол дуги траектории, град; h_k – разность уровней расположения центров тяжести сечения пласта в начальной точке траектории на отвале и в месте схода пласта с отвала, м.

На основании априорной информации и собственных поисковых исследований принимаем следующие параметры для системы (17): $\rho = 1200 \dots 1500 \text{ кг/м}^3$; $a = h = 0,18 \dots 0,24 \text{ м}$; $\varepsilon = 15^\circ \dots 30^\circ = 0,262 \dots 0,524 \text{ рад}$; $f = 0,2 \dots 0,5$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $\theta = 6 \text{ град}$; лезвие имеет форму циклоиды; скорость движения v_p равна переносной скорости v_e .

Анализ полученных аналитических зависимостей показал, что увеличение угла раствора лапы снижает тяговое сопротивление рекомендуется применять угол в диапазоне от 45 до 60 градусов. Угол заточки лезвия значительно влияет на тяговое сопротивление с снижением угла сопротивление уменьшается, но значительное снижение недостижимо, т. к. сокращается ресурс самого лезвия из-за уменьшения его толщины рекомендуется применять угол заточки лезвия в диапазоне от 15 до 30 градусов.

Для дальнейшего исследования из системы (17) была получена область тягового сопротивления, зависящая от скорости движения многофункционального средства и глубины обработки (рисунок 4).

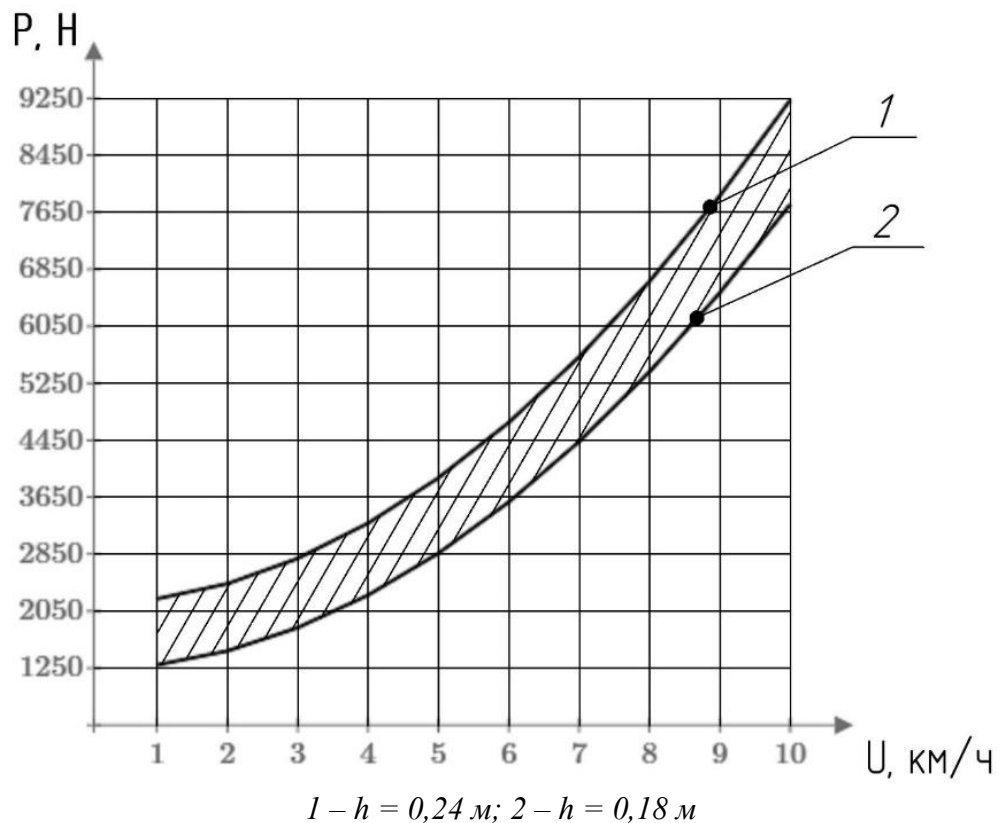


Рисунок 4 – График зависимости тягового сопротивления от скорости движения и глубины обработки

Из графика (рисунок 4) видно что уменьшение глубины обработки с 24 до 18 см при скорости движения 8 км/ч снижает тяговое сопротивление на 1500 Н. Рост тягового усилия при изменении скорости имеет нелинейный характер, изменение тягового усилия варьируется от 1250 до 9250 Н.

В программе SolidWorks применялся комплекс Flow Simulation для углубленного изучения зон повышенного сопротивления рабочего органа многофунк-

ционального средства. Для этого была составлена программа и заданы конструктивные параметры после моделирования была получена эпюра поверхностного давления (рисунок 5), траектория движения почвы, суммарная сила, спроецированная на ось движения средства и другие параметры.

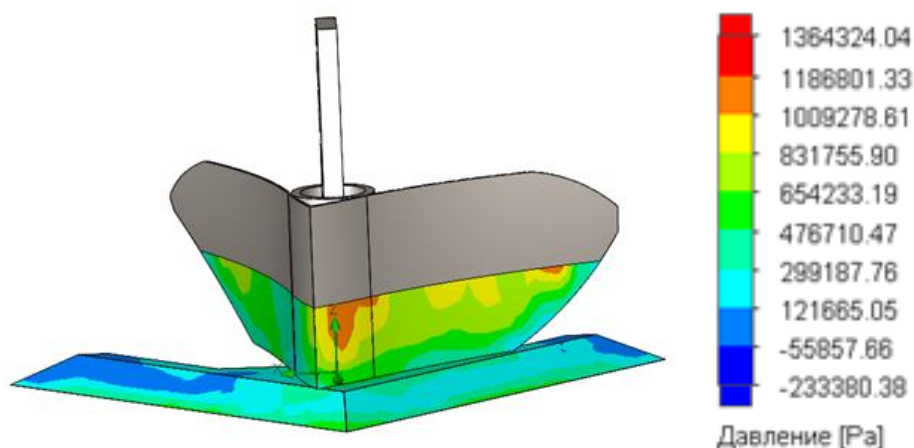


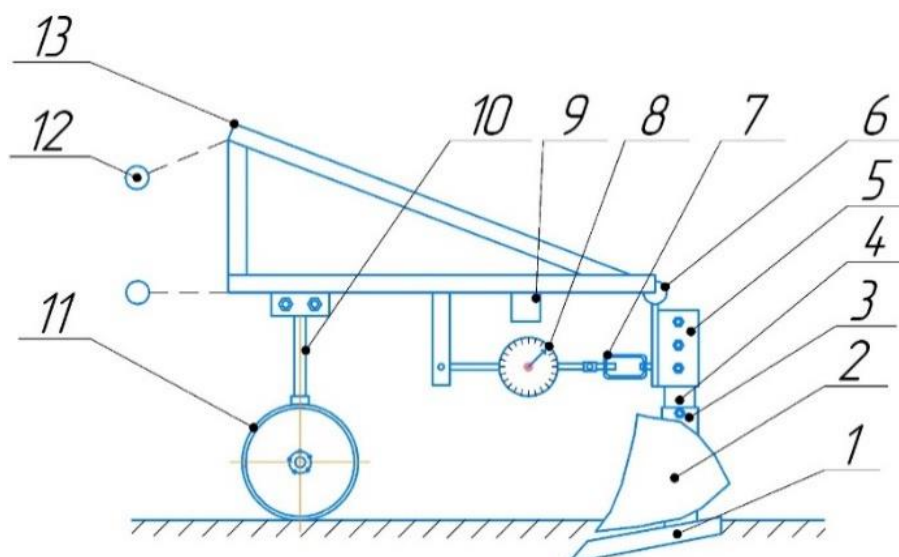
Рисунок 5 – Изображение рабочего органа с нанесенной эпюрой давления на фронтальную поверхность

В третьей главе представлены программа и методика экспериментальных исследований и оборудование для его проведения. Для экспериментальных исследований был разработан экспериментальный рабочий орган (рисунок 6).



Рисунок 6 – Общий вид экспериментальной установки с рабочим органом

Экспериментальная установка включала запатентованную раму для динамометрирования рабочих органов (рисунок 7).



1 – треугольная лапа; 2 – съёмные отвалы; 3 – фиксатор поворотного механизма; 4 – стойка; 5 – крепление стойки совместно с подвижной пластиной; 6 – шарнир (петля); 7 – регулировочный талреп; 8 – динамометр на 3т; 9 – закреплённая камера (смартфон); 10 – регулировочный механизм опорного колеса; 11 – опорное колесо; 12 – навеска; 13 – рама

Рисунок 7 – Конструктивно–технологическая схема экспериментальной установки для определения тяговых характеристик рабочего органа

Испытания проводились в ООО «Рисоводческий племенной завод «Красноармейский» имени А. И. Майстренко» поселок Октябрьский Красноармейского района Краснодарского края. Установку навешивали на трактор МТЗ-82 тягового класса 1,4. Предшествующим видом обработки почвы было лущение стерни.

На основании анализа существующих исследований были выбраны наиболее управляемые факторы (таблица 1).

Таблица 1 – Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированные обозначения	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Скорость движения (v_p), км/ч	x_1	2	6	8	10
Угол поворота отвала (β), град	x_2	3	42	45	48
Глубина обработки (h), м	x_3	0,03	0,18	0,21	0,24

Для проведения экспериментального исследования был применен симметричный композиционный план B_k . В качестве параметра отклика при проведении эксперимента было выбрано тяговое сопротивление рабочего органа многофункционального средства. Математическую обработку полученных экспериментальных данных производили по разработанной программе на ЭВМ по ее результатам получили уравнение регрессии в кодированном виде:

$$Y = 7125 - 725x_1 - 205x_2 - 325x_3 + 250x_1x_2 + 125x_1x_3 + 100x_2x_3 + 750x_1^2 + 1650x_2^2 + 850x_3^2. \quad (18)$$

Адекватность полученной модели проверили по критерию Фишера. Расчетное значение его составило 3,18, а табличное значение – 4,74, что говорит о том, что модель адекватна.

Продифференцировав уравнение (18) по каждой из переменных, и приравняв производные нулю, получили систему линейных уравнений. Решая систему линейных уравнений, нашли оптимальные показатели исследуемых факторов многофункционального средства: оптимальная скорость движения $v_p = 8,9$ км/ч; оптимальный угол поворота отвала $\beta = 45^\circ$; оптимальная глубина обработки $h = 0,21$ м.

Построена поверхность отклика (рисунок 8, а) и получено двухмерное сечение поверхности (рисунок 8, б), которые характеризуют зависимость тягового сопротивления от рассматриваемых параметров и режима работы.

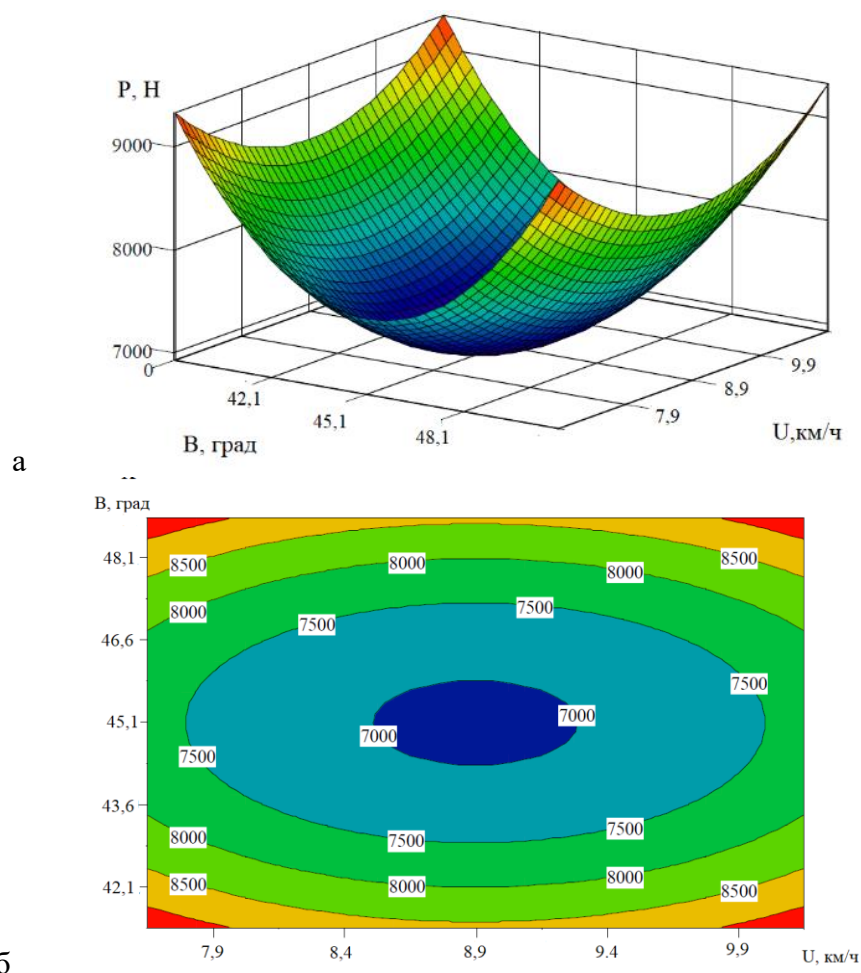


Рисунок 8 – Поверхность отклика (а) и двухмерное сечение поверхности (б) зависимости тягового сопротивления от скорости движения и угла поворота отвала

Полученные экспериментальные данные тягового сопротивления вошли в область теоретических значений тем самым подтверждая адекватность полученных аналитических зависимостей. Из ранее проведенных исследований были

взяты оптимальные параметры экспериментального рабочего органа многофункционального средства: оптимальный угол поворота отвала $\beta = 45^\circ$, оптимальная глубина обработки $h = 0,21\text{м}$, а скорость движения варьировалась от 8 до 10 км/ч, что соответствует 5 передаче пониженного ряда и 6 передаче повышенного ряда трактора МТЗ-82.

Проведены сравнительные испытания в оптимальных параметрах для проверки схождения аналитических зависимостей с опытными данными. Получена зависимость тягового сопротивления от скорости обработки (рисунок 9).

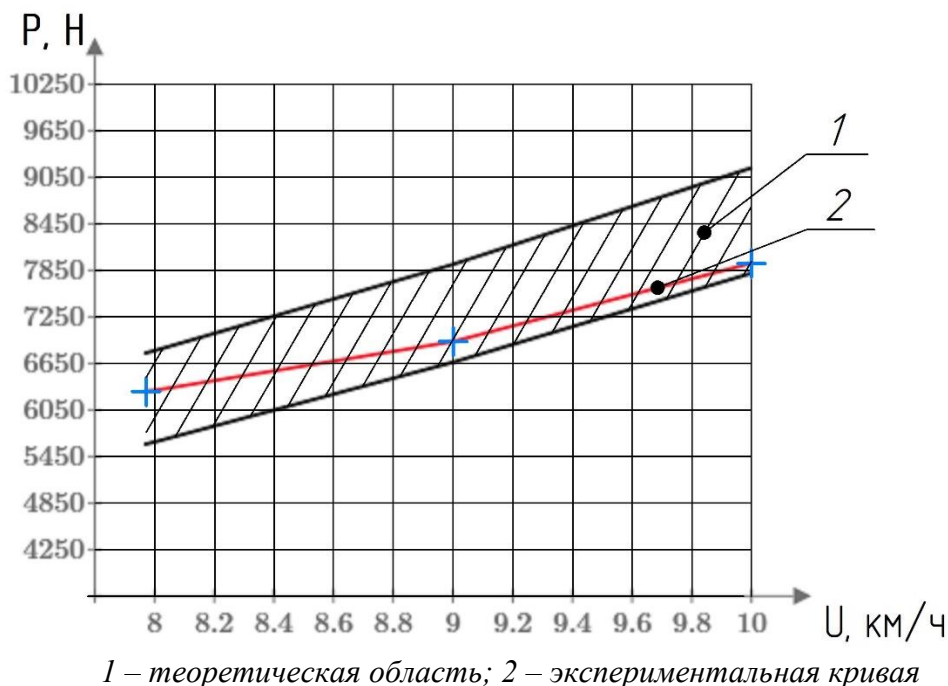


Рисунок 9 – График зависимости тягового сопротивления от рабочей скорости

Расхождение между теоретическими и экспериментальными зависимостями силы сопротивления рабочего органа от скорости движения составило не более 7 %.

В четвертой главе приведены результаты экономической эффективности многофункционального средства. Проведенная технико-экономическая оценка показала, что использование предлагаемого многофункционального средства в технологическом процессе по основной обработке почвы под зерновые позволяет снизить эксплуатационные затраты на 15,3 %, снизить капиталовложения на 40,3 % при этом получить годовой экономический эффект в размере 12250 руб./га. Срок окупаемости составил 1,64 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки

почвы челночным способом. Новизна технического решения подтверждена патентами РФ на полезные модели № 225628 и № 229905.

2. Получены аналитические зависимости величины тягового сопротивления, позволяющие определить основные конструктивные параметры и режимы работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой: скорость движения (от 6 до 10 км/ч), угол поворота отвала (от 43° до 47°), глубина обработки почвы (от 18 до 24 см), угол заточки лезвия, траекторию движения пласта почвы.

В результате проведенных расчетов были получены следующие значения тягового сопротивления в зависимости от скорости движения многофункционального почвообрабатывающего средства. При скорости от 6 до 10 км/ч тяговое сопротивление рабочего органа многофункционального средства составило от 3590 до 9250 Н. При глубине обработки от 18 до 24 см и постоянной скорости усилие резания пласта лапой составило от 2100 до 2750 Н.

3. В результате реализации плана трехфакторного эксперимента были получены оптимальные параметры, режим работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой: скорость движения – 8,9 км/ч, угол поворота отвала – 45 градусов, при глубине обработки – 0,21 м. При этих значениях тяговое сопротивление составило 6928 Н.

4. Сравнение результатов теоретических исследований и экспериментальных данных по тяговому сопротивлению показало, что в области оптимальных значений параметров и режима работы экспериментального многофункционального средства (угле поворота отвала 45°, глубине обработки 0,21 м и скорости 8–10 км/ч) расхождение не превышает 7 %.

5. Использование предлагаемого многофункционального средства в технологическом процессе по основной обработке почвы под зерновые позволило снизить эксплуатационные затраты на 15,3 %, снизить капиталовложения на 40,3 % при этом получить годовой экономический эффект в размере 12250 руб./га. Срок окупаемости составил 1,64 года.

Рекомендации производству

Предложенная в работе конструкция многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом может быть использована конструкторскими организациями при разработке средств для основной обработки почвы под зерновые культуры.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее совершенствование предложенной конструктивно-технологической схемы многофункционального почвообрабатывающего средства для основной обработки под зерновые культуры должно происходить путем усовершенствования под пропашные культуры.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Николенко, А. Ю. Конструктивные и режимные параметры многофункционального почвообрабатывающего средства / **А. Ю. Николенко**, Б. Ф. Тарасенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2026. – № 217. – С. 350–364.

2. Николенко, А. Ю. Оценка конкурентоспособности зарубежных и отечественных оборотных плугов / **А. Ю. Николенко**, Р. А. Мет // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 207. – С. 129–139.

3. Тарасенко, Б. Ф. Плуг-рыхлитель / Б. Ф. Тарасенко, **А. Ю. Николенко** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 201. – С. 239–253.

4. Тарасенко, Б. Ф. Плуг-щелеватель-рыхлитель / Б. Ф. Тарасенко, **А. Ю. Николенко** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 203. – С. 54–67.

В базе данных, индексируемых в Scopus:

5. Universal Tillage Implement / В. Tarasenko, **А. Nikolenko**, V. Drobot // Acta Technologica Agriculturae. – 2025. – Vol. 28, №. 1. – P. 26–31.

6. Improving the working body for primary soil cultivation / В. Tarasenko, **А. Nikolenko**, V. Drobot [et al.] // E3S Web of Conferences : VI International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources (GEOTECH-2025), Navoi, Uzbekistan, 02–04 апреля 2025 года. – Les Ulis, 2025. – P. 05016.

Патенты РФ:

7. Пат. № 225628 U1 Российская Федерация, МПК А01В 5/10, А01В 35/16. Плуг-рыхлитель : № 2024103804 : заявл. 14.02.2024 : опубл. 26.04.2024 / Тарасенко Б. Ф., **Николенко А. Ю.**, Орленко С. Ю. [и др.] ; патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 6 с.

8. Пат. № 229905 U1 Российская Федерация, МПК А01В 49/02, А01В 35/16. Универсальное почвообрабатывающее орудие : № 2024118999 : заявл. 04.07.2024 : опубл. 01.11.2024 / Тарасенко Б. Ф., Гаврилов В. Н., Дробот В. А., **Николенко А. Ю.** ; патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 5 с.

9. Пат. № 2824826 С1 Российская Федерация, МПК А01В 49/06. Устройство для предпосевной обработки рисовых чеков : № 2024106211 : заявл. 05.03.2024 : опубл. 14.08.2024 / Тарасенко Б. Ф., Богатырев Н. И.,

Гаврилов В. Н. [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 5 с.

10. Пат. № 221238 U1 Российская Федерация, МПК А01В 49/06, А01В 35/14, А01В 35/10. Устройство для обработки почвы и предпосевного внесения жидких комплексных удобрений, карбамидно-аммиачной селитры : № 2023111800 : заявл. 04.05.2023 : опубл. 26.10.2023 / Тарасенко Б. Ф., Кизинек С. В., Гаврилов В. Н. [и др.] ; патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 5 с.

11. Пат. № 236428 U1 Российская Федерация, МПК А01В 3/42, А01В 17/00, А01В 13/14. Оборотный плуг с дреном : № 2025101190 : заявл. 30.01.2025 : опубл. 07.08.2025 / Тарасенко Б. Ф., Гаврилов В. Н., **Николенко А. Ю.**, Дробот В. А. ; патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 6 с.

В прочих изданиях:

12. Ан, С. И. К вопросу об агротехнологических особенностях и преимуществах безотвальной вспашки почвы / С. И. Ан, **А. Ю. Николенко** // Образование, наука и инновации: современные вызовы : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. В 2-х ч. МелГУ, 12–13 декабря 2024 года. – Мелитополь, 2025. – С. 902–905.

13. Будылова, В. Д. Методы расчета и оптимизации напряженно-деформированного состояния стойки оборотного плуга / В. Д. Будылова, В. Н. Путилина, **А. Ю. Николенко** // Инновационные научные исследования. Актуальные вопросы и решения : материалы Международной научно-практической конференции, ИП Алзидан, 27 ноября 2025 года. – Краснодар, 2025. – С. 65–75.

14. Веретенников, А. Н. Сравнительный анализ оборотного плуга с безотвальным плугом / А. Н. Веретенников, **А. Ю. Николенко** // Молодая аграрная наука : материалы Международной научно-практической конференции, 16 мая 2024 года. – Майкоп : Изд-во «Магарин Олег Григорьевич», 2024. – С. 93–96.

15. Исаченко, К. Е. Сравнение отечественных и зарубежных машин для глубокого рыхления без оборота пласта / К. Е. Исаченко, **А. Ю. Николенко** // Молодая аграрная наука : материалы Международной научно-практической конференции, 16 мая 2024 года. – Майкоп; Изд-во «Магарин Олег Григорьевич», 2024. – С. 186–188.

16. Мет, Р. Влияние способов обработки почвы на экологию водных ресурсов при возделывании риса / Р. Мет, **А. Ю. Николенко** // Экология речных ландшафтов : сборник статей по материалам VIII Международной научной экологической конференции, КубГАУ, 01 декабря 2023 года. – Краснодар, 2024. – С. 228–233.

17. Николенко, А. Ю. Безотвальный способ вспашки почвы / **А. Ю. Николенко**, А. Р. Лабузов, Я. И. Дмитренко // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России : материалы IV Международной научной конференции, КрасГУ, 23–24 ноября 2023 года. – Красноярск, 2024. – С. 117–120.

18. Николенко, А. Ю. Влияние типа почвы на процесс вспашки оборотным плугом / **А. Ю. Николенко**, Б. Ф. Тарасенко // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А. Я. Миловича : сборник статей, РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 03–05 июня 2024 года. – Москва, 2024. – С. 594–597.

19. Николенко, А. Ю. Плуг-рыхлитель / **А. Ю. Николенко** // Современные векторы развития науки : сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год, КубГАУ, 06 февраля 2024 года. – Краснодар, 2024. – С. 320–321.

20. Николенко, А. Ю. Современные тенденции в развитии сельскохозяйственной техники / **А. Ю. Николенко**, Б. Ф. Тарасенко // Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год, КубГАУ, 05 февраля 2025 года. – Краснодар, 2025. – С. 375–377.

21. Николенко, А. Ю. Обзор форм рабочих органов для глубоких рыхлений почв / Р. А. Мет, **А. Ю. Николенко** // Перспективы развития транспортной системы в Российской Федерации : материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, приуроченной к профессиональному празднику – Дню работника автомобильного транспорта, РГАТУ, 25 октября 2024 года. – Рязань, 2024. – С. 243–255.

22. Николенко, А. Ю. Оценка конкурентоспособности зарубежных и отечественных оборотных плугов / **А. Ю. Николенко**, Р. А. Мет // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике : материалы XXIII Международной научно-практической конференции, Кузбасский ГАУ, 04–05 декабря 2024 года. – Кемерово, 2024. – С. 187–193.

23. Николенко, А. Ю. Универсальное почвообрабатывающее орудие / **А. Ю. Николенко**, Б. Ф. Тарасенко // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сборник материалов XX Международной (заочной) научно-практической конференции: в 2 кн., АГАУ, 06 февраля 2025 года. – Барнаул, 2025. – С. 127–129.

24. Николенко, А. Ю. Устройство для обработки почвы и предпосевного внесения жидких комплексных удобрений, карбамидно-аммиачной селитры / **А. Ю. Николенко**, Б. Ф. Тарасенко // Virtuozы науки : сборник материалов Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых за 2023 г., КубГАУ, 06–15 ноября 2023 года. – Краснодар, 2024. – С. 487–488.

25. Николенко, А. Ю. Характеристика форм рабочих элементов чизельных плугов / **А. Ю. Николенко**, Т. В. Манукян, А. П. Тютрин // Приднепровский научный вестник. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 74–79.

26. Николенко, А. Ю. Энергетический анализ процесса работы оборотного плуга / **А. Ю. Николенко** // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность:

актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, КБГАУ, 22–23 декабря 2023 года. – Нальчик, 2023. – С. 212–215.

27. Николенко, А. Ю. Энергосберегающие технологии обработки почвы в условиях ведения сельскохозяйственного производства Краснодарского края / **А. Ю. Николенко**, В. А. Дробот // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 78-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2022 год. В 3-х частях, КубГАУ, 01 марта 2023 года / отв. за вып. А. Г. Кощаев. Ч. 2. – Краснодар, 2023. – С. 308–311.

28. Осмоловский, Д. Н. Проблемы и задачи повышения инвестиционной привлекательности агропромышленного комплекса / Д. Н. Осмоловский, **А. Ю. Николенко** // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике : материалы XXIII Международной научно-практической конференции, Кузбасский ГАУ, 04–05 декабря 2024 года. – Кемерово, 2024. – С. 196–199.

29. Тарасенко, Б. Ф. Разработка инновационного средства механизации процесса предпосевной обработки почвы при производстве зерновых культур / Б. Ф. Тарасенко, В. А. Дробот, **А. Ю. Николенко**. – Краснодар : ИП Кабанов В. Б., 2024. – 102 с.

30. Тарасенко, Б. Ф. Устройство для предпосевной обработки рисовых чеков / Б. Ф. Тарасенко, **А. Ю. Николенко**, С. А. Войнаш // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики : материалы XVIII Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение», посвященной 95-летию со дня образования Вятского ГАТУ, Вятский ГАТУ, 03 февраля 2025 года. – Киров, 2025. – С. 203–208.

Подписано в печать 01.07.2026

Формат 60 × 84 ¹/₁₆

Бумага офсетная

Офсетная печать

Уч.-изд. л. 1

Заказ № 328

Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Крон»

350051, г. Краснодар, ул. Дальняя, 39\3