

На правах рукописи



СУББОТИН СТАНИСЛАВ ИГОРЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ЧИЗЕЛЬНЫХ ОРУДИЙ ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ ИХ
КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет»

Научный руководитель:

Фомин Сергей Денисович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Старцев Сергей Викторович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н.И.
Вавилова», кафедра «Техническое
обеспечение АПК», профессор кафедры
Белюсов Сергей Витальевич, кандидат
технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
Кубанский ГАУ, кафедра «Процессы и
машины в агробизнесе», доцент кафедры

Ведущая организация

ФГБНУ «Аграрный научный центр
«Донской»

Защита диссертации состоится «08» сентября 2026 г. в 10 ч. 00 минут на заседании диссертационного совета 35.2.007.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет» по адресу: 400002, г. Волгоград, проспект Университетский, 26, ауд. 303д.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ и на сайте университета www.volgau.ru.

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Алексей Васильевич Седов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Направления трансформации сельскохозяйственного производства Российской Федерации в настоящее время определяются следующими базовыми нормативными документами: «Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20); Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 7 июля 2017 года № 1455-р)».

Основной упор в рассматриваемой нормативной базе сделан на импортозамещение используемых технологий и их материально техническое оснащение; увеличение экспортного потенциала агропромышленного комплекса (АПК) страны; обеспечение продовольственной безопасности страны. В основу достижения этих целей закладывается: повышение научного и кадрового потенциала страны; обновление и модернизация материальной базы АПК; улучшение и автоматизация технологических процессов; повышение надежности технологических процессов и используемых материальных средств.

В рамках данной диссертационной работы рассмотрены вопросы повышения надежности почвообрабатывающей техники. Надежность почвообрабатывающей техники, как свойство объекта, формируется еще на начальных этапах её проектирования, именно группа показателей надежности (или единичные комплексные показатели) во многом определяет эффективность использования техники в период эксплуатации. От уровня надежности, закладываемой при проектировании, зависит способность сельскохозяйственной техники выполнять заданные агротехнологические операции в течение длительного периода эксплуатации. Поэтому развитие данного направления актуально.

Степень разработанности темы. Основной причиной выхода из строя почвообрабатывающей техники является износ её основных деталей, что подтверждается выявленными закономерностями процессов трения и изнашивания деталей машин. Этому направлению посвящены научные исследования ведущих отечественных ученых: М.А. Бабичева, В.А. Белова, В.М. Бойкова, В.Н. Буйлова, В.И. Виноградова, И.Г. Голубева, М.Н. Ерохина, И.В. Крагельского, А.М. Михальченкова, Л.С. Лившица, И.М. Панова, С.А. Сидорова, Г.Н. Синеокова, М.М. Хрущева и др. Результаты этих исследований внесли неоценимый вклад в изучение вопросов изнашивания рабочих органов и внедрению способов повышения их надежности.

Тем не менее, как показал анализ этих работ, остаются направления в этой области, требующие своего дальнейшего развития. В частности, в исследуемых работах, слабо освещены вопросы влияния формы рабочих органов на их долговечность в условиях работы в абразивной среде. Развитие этой области исследования является актуальным и имеет важное народнохозяйственное значение.

Объект исследования – чизельный агрегат для глубокого рыхления почвы.

Предмет исследования – показатели долговечности рабочего органа чизельного плуга.

Целью исследования является повышение долговечности рабочих органов чизельных орудий за счет обоснования геометрических параметров их рабочей поверхности.

Задачи исследования:

- 1) провести анализ существующих способов повышения долговечности рабочих органов чизельных орудий;
- 2) теоретически обосновать геометрические размеры продольных армировочных валиков, располагаемых на носовой поверхности рабочего органа чизельного плуга;
- 3) разработать программу экспериментальных исследований и провести полевые испытания чизельного агрегата, оборудованного модернизированными рабочими органами;
- 4) выполнить сравнительную оценку показателей долговечности модернизированных рабочих органов с серийными образцами;
- 5) оценить экономическую эффективность применения модернизированных рабочих органов чизельного плуга.

Научная новизна работы заключается:

— в обосновании геометрических размеров и ориентации армировочных валиков на поверхности рабочего органа чизельного плуга;

— разработке рабочего органа чизельного плуга; способа и устройства для определения точки приложения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины; устройства для измерения горизонтального усилия от сельскохозяйственной машины, навешиваемой на трактор (патенты RU 2776191 C1, RU 2792117 C1, RU 2801775 C1);

— в результатах экспериментальных исследований оценки эффективности применения рабочих органов чизельных орудий с армировочными валиками.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы определяется теоретическим обоснованием геометрических размеров армировочных валиков на поверхности рабочего органа чизельного орудия, выполненном на основании критерия отсутствия залипания почвенных частиц между валиками, что является ключевым фактором сохранения энергетических затрат на процесс чизельной обработки на прежнем уровне. Это особенно важно в условиях современного сельского хозяйства, где эффективность и экономичность обработки почвы играют решающую роль в обеспечении высоких урожаев и снижении затрат на производство. Полученные аналитические зависимости представляют собой важный вклад в развитие теории и практики сельскохозяйственного

машиностроения, способствуя созданию более эффективных и надежных орудий для обработки почвы.

Практическая значимость работы состоит в создании рабочих органов чизельного плуга с увеличенной долговечностью, позволяющие снижать издержки на ремонт и замену деталей, повышая экономическую эффективность сельхозпроизводства.

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на поиске и обосновании критериальных пороговых ограничений, которые способствуют разработке эффективных методов повышения эффективности эксплуатации объекта исследования. Это включает в себя:

1. Теоретическое обоснование предложенных мер

Теоретическое обоснование осуществляется с применением классических законов земледельческой механики и прикладной механики. Эти законы позволяют понять и описать физические процессы, происходящие при эксплуатации чизельных плугов. Кроме того, используются методы статистической обработки экспериментальных данных, что позволяет выявить закономерности и тенденции, которые могут быть использованы для улучшения конструкции и эксплуатации плугов.

2. Экспериментальная верификация предложенных методов

Экспериментальная верификация проводится в реальных условиях эксплуатации. Это позволяет проверить теоретические предположения на практике и убедиться в их достоверности. Эксперименты проводятся с использованием современных методов и оборудования, что обеспечивает высокую точность и надежность результатов.

3. Получение надежных и достоверных результатов

Методы, используемые в исследовании, позволяют получить надежные и достоверные результаты. Эти результаты могут быть использованы для улучшения конструкции и эксплуатации чизельных плугов. Они также могут быть применены для разработки новых методов и технологий, которые позволят повысить эффективность и производительность сельскохозяйственной техники.

Таким образом, методология и методы исследования, используемые в данной работе, обеспечивают получение надежных и достоверных результатов, которые могут быть использованы для улучшения конструкции и эксплуатации чизельных плугов.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) теоретическое обоснование геометрических размеров армировочных валиков, выполненное на основании критерия отсутствия залипания почвенных частиц;
- 2) экспериментальная модель рабочего органа чизельного орудия, с улучшенными показателями долговечности;
- 3) результаты экспериментальных исследований оценки эффективности применения модернизированных рабочих органов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов проведенного исследования подтверждается использованием современной регистрирующей и измерительной аппаратуры в процессе проведения натуральных испытаний. Это позволяет получить точные и объективные данные, которые могут быть использованы для дальнейшего анализа и интерпретации.

Кроме того, высокая сходимость теоретических данных и данных, полученных экспериментальным путем, также свидетельствует о высокой степени достоверности полученных результатов. Это означает, что теоретические модели и методы, используемые в исследовании, адекватно отражают реальные процессы и явления.

Основные положения работы были представлены и обсуждены на конференциях различного уровня, что также подтверждает их научную значимость и актуальность. Среди таких конференций можно выделить:

Национальные научно-практические конференции, 2020-2022 гг.

Международные научно-практические конференции, 2022-2024 гг.

Таким образом, проведенное исследование обладает высокой степенью достоверности и апробации, что позволяет использовать его результаты для дальнейшего развития и внедрения в практику.

Публикации по результатам исследований. В результате проведенной диссертационной работы было издано 17 публикаций, из которых:

- 8 работ опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ;
- получено 3 патента РФ на изобретение с номерами: № 2776191, № 2792117, № 2801775;
- 6 работ опубликованы в других журналах и материалах конференций.

Общий объем опубликованных работ составляет 6,85 печатных листов, из которых 3,08 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем диссертации.

Текст диссертации включает в себя следующие структурные элементы: Введение. Основная часть, состоящая из пяти разделов (разделы 1, 2, 3, 4, 5). Заключение. Список литературы. Приложения.

Текст диссертации представлен на 147 страницах, из которых: основной текст занимает 141 страницу, содержит 60 иллюстраций, 21 таблицу, приложения занимают 4 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методика исследований, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Состояние вопроса повышения долговечности чизельных орудий» дан анализ особенностей конструкции и материалов, применяемых для изготовления рабочих органов чизельных орудий. Проведен

анализ современных способов повышения долговечности деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного износа.

Во втором разделе «Теоретическое обоснование формы и расположения армировочных валиков поверхности рабочего органа по критерию минимизации прироста тягового сопротивления» рассмотрено моделирование процесса взаимодействия частицы почвы с поверхностью рабочего органа, упрочненной продольным армировочным валиком.

На рисунке 1. представлен фрагмент носовой части рабочего органа, упрочненного продольным армировочным валиком.

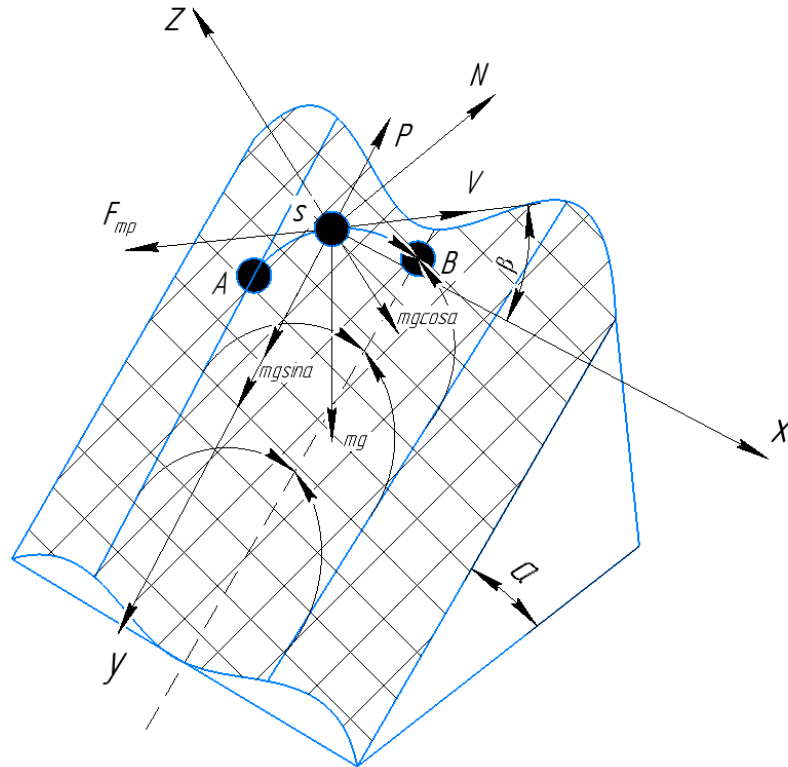


Рисунок 1 - Кинематическая схема взаимодействия носовой части долота с частицей почвенного фона

Для обоснования размеров длины и радиуса армировочного валика рассмотрено перемещение частицы почвы из положения А в положение В.

Движение частиц происходит под действием следующих активных сил:

P – сила тягового сопротивления движению рабочего органа в почве;

$F_{тр}$ – сила трения между частицей и поверхностью долота в её переносном движении;

mg – сила тяжести частицы почвы;

Проекция силы тяжести частицы на оси декартовых координат:

$$X = 0, Y = mg \sin(a), Z = -mg \cos(a)$$

(1)

Дифференциальные уравнения движения частицы в проекциях на оси декартовых координат запишутся в виде:

$$\begin{aligned}
m \frac{d^2x}{dt^2} &= N^x - F_{\text{тр}}^x \\
m \frac{d^2y}{dt^2} &= mg \sin(\alpha) + F_{\text{тр}}^y - P \\
m \frac{d^2z}{dt^2} &= -mg \cos(\alpha) + N^z + F_{\text{тр}}^z.
\end{aligned}
\tag{2}$$

В работе показано, что с учетом принятых допущений, введения новых обозначений и естественной системы координат система дифференциальных уравнений (2) может быть приведена к виду:

$$\begin{aligned}
m \frac{V}{dt} &= g_1 \sin(\alpha) - f_1 g_1 \\
\frac{V^2}{\rho} &= \pm g_1 \cos(\beta).
\end{aligned}
\tag{3}$$

где ρ – радиус кривизны траектории;

$$g_1 = g \sin(\alpha), \quad f_1 = f \operatorname{ctg}(\alpha).$$

Учитывая, что

$$\rho = \frac{ds}{d\beta} = V \frac{dt}{d\beta}
\tag{4}$$

получим

$$dt = \frac{V}{g_1} \cdot \frac{d\beta}{\cos\beta}
\tag{5}$$

Полученные выражения позволяют определить скорость движения частицы в функции угла β , после чего можно получить зависимость изменения координат x и y в функции угла β , используя соотношения:

$$\begin{aligned}
dx &= V \cos(\beta) dt \\
dy &= V \sin(\beta) dt
\end{aligned}
\tag{6}$$

Введя новую переменную

$$\delta = \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right),
\tag{7}$$

получено

$$\frac{d\beta}{\cos\beta} = -\frac{d\delta}{\delta}, \quad \sin\beta = \frac{1 - \delta^2}{1 + \delta^2}, \quad \cos\beta = \frac{2\delta}{1 + \delta^2}.
\tag{8}$$

следовательно, уравнение 5 запишется в виде

$$dt = -\frac{V}{mg} \cdot \frac{d\delta}{\delta}.
\tag{9}$$

Подставив данное выражение в уравнения 3, 6 получено

$$\begin{aligned}\frac{dV}{V} &= -\frac{1-\delta^2}{1+\delta^2} \cdot \frac{d\delta}{\delta} + f_1 \frac{d\delta}{\delta} \\ dx &= \frac{2V^2 d\delta}{g_1(1+\delta^2)} \\ dy &= \frac{V^2(1-\delta^2)d\delta}{g_1(1+\delta^2)\delta}\end{aligned}\tag{10}$$

Интегрируя выражение (10) получено

$$V = C \delta^{fctg\alpha-1} (1 + \delta^2)\tag{11}$$

$$x = -\frac{2C}{g \sin \alpha} \left(\frac{\delta^{2fctg\alpha-1}}{2fctg\alpha-1} + \frac{\delta^{2fctg\alpha-1}}{2fctg\alpha+1} \right) + A\tag{12}$$

$$y = -\frac{C^2}{g \sin \alpha} \left(\frac{\delta^{2fctg\alpha-2}}{2fctg\alpha-2} + \frac{\delta^{2fctg\alpha+2}}{2fctg\alpha+2} \right) + B\tag{13}$$

$$t = \frac{C}{g \sin \alpha} \left(\frac{\delta^{fctg\alpha-1}}{fctg\alpha-1} + \frac{\delta^{fctg\alpha+1}}{fctg\alpha+1} \right) + T\tag{14}$$

где A , B и T – произвольные постоянные.

Произвольные постоянные определяются по начальным условиям: $t=0$, $V=V_0$; $x=y=0$.

$$C = \frac{V_0}{\delta^{fctg\alpha-1} (1 + \delta^2)}\tag{15}$$

$$A = \frac{2V_0^2}{g \sin \alpha [\delta^{fctg\alpha-1} (1 + \delta^2)]^2} \left(\frac{\delta^{2fctg\alpha-1}}{2fctg\alpha-1} + \frac{\delta^{2fctg\alpha+1}}{2fctg\alpha+1} \right),\tag{16}$$

$$B = \frac{2V_0^2}{g \sin \alpha [\delta^{fctg\alpha-1} (1 + \delta^2)]^2} \left(\frac{\delta^{2fctg\alpha-2}}{2fctg\alpha-2} + \frac{\delta^{2fctg\alpha+2}}{2fctg\alpha+2} \right),\tag{17}$$

$$T = \frac{V_0}{g \sin \alpha [\delta^{fctg\alpha-1} (1 + \delta^2)]} \left(\frac{\delta^{fctg\alpha-1}}{fctg\alpha-1} + \frac{\delta^{fctg\alpha+1}}{fctg\alpha+1} \right)\tag{18}$$

Если

$$fctg\alpha < 1,$$

то скорость V , согласно уравнению (11) обращается в 0 при $\delta=0$. Тогда координаты точки будут равны $x=A$ и $y=B$. Если длина $y=B$ и ширина продольного армирующего валика $x=A$ будет больше указанных размеров, то частицы почвы будут останавливаться на границе валика и произойдет затор.

В случае $ftg\alpha > 1$, скорость частицы не может обратиться в нуль ни при каком значении δ . Поэтому в случае избегания забивания частиц между армирующими валиками следует использовать следующее критериальное условие $ctg\alpha < 1$.

Общее уравнение траектории частицы почвы получено в виде:

$$y = -\frac{(A-x)^2}{(4f^2ctg^2\alpha - 4)} \cdot \frac{gsin\alpha (4f^2ctg^2\alpha - 1)^2}{16fw^2ctg\alpha} + B. \quad (19)$$

Полученное уравнение представляет собой аналитическую зависимость между длиной и диаметром армировочного валика. Принимая длину армировочного валика равной длине наклонной плоскости носовой части рабочего органа $y = 0,07\text{м}$, получено значение радиуса армировочного валика, выполненного в виде полусферы, $x = r = 0,012\text{м}$.

На рисунке 2 представлен армировочный валик на поверхности рабочего органа, геометрические размеры которого соответствуют аналитическим расчетам.

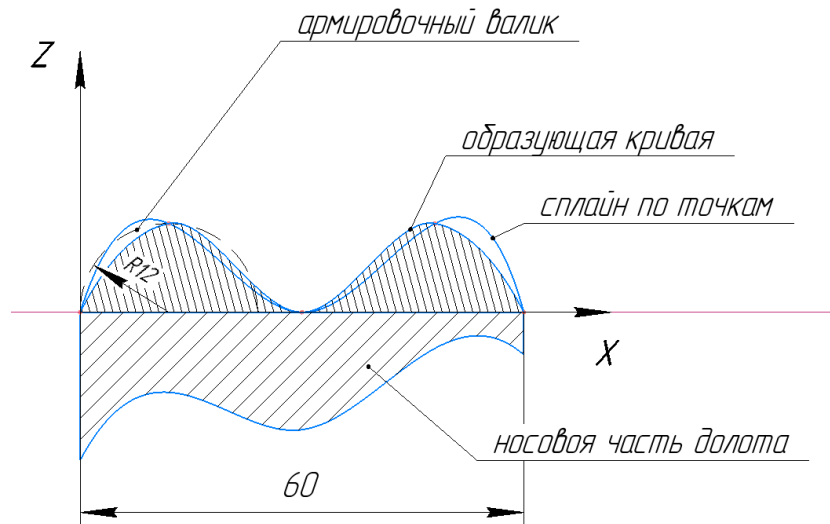


Рисунок 2 – Форма армировочных валиков на поверхности рабочего органа

Соответственно на поверхности рабочего органа можно разместить два продольных армировочных валика, выполненных в виде полусферы, радиусом r . Через их геометрическую область существования можно провести образующую кривую линию, являющиеся линией сопряжения. На рисунке 2 – образующая кривая построена инструментами программного продукта *Компас 3D*: в первом случае образующая кривая выполнена с помощью графического инструментария «Кривая Безье» (Кривая Безье является частным случаем многочленов Бернштейна), во втором случае – сплайн по точкам.

Аналитическую функцию образующей кривой можно получить, зная координаты реперных точек, которые определяются размерами фронтальной части рабочего органа. На основании проведенного анализа найдено следующее аналитическое уравнение образующей кривой линии:

$$z = A \sin(0,2x - 1,57) + A \quad (20)$$

где A – постоянный коэффициент, $A = 6,63$;
 область существования аналитической функции $x \in [0; 60]$.

В третьем разделе «Программа экспериментальных исследований чизельного агрегата, рабочие органы которого упрочнены продольными армировочными валиками» разработана программа экспериментальных исследований чизельного агрегата, оборудованного модернизированными рабочими органами (рис. 3).

Предложено устройство для измерения горизонтального усилия от сельскохозяйственной машины, навешиваемой на трактор, а также способ и устройство для определения точки приложения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины, что позволило расширить функциональные возможности известных технических решений для определения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины. В качестве объекта исследования выбран чизельный машинно-тракторный агрегат, состоящий из трактора класса 3 и чизельного плуга ОЧО-5. В процессе проведения натурных испытаний регистрировались следующие параметры: влажность и твердость почвенного фона; крюковая нагрузка трактора; тяговое сопротивление отдельных секций чизельного плуга; действительная скорость движения агрегата. Для регистрации и обработки силовых и кинематических величин, в процессе выполнения технологического процесса чизелевания, применялась измерительная система, состоящая из переносного компьютера; аналого-цифрового преобразователя Е 14-440М; многоканального усилителя сигнала ТОПАЗ -3-01.

Измерение линейных размеров чизельных рабочих органов

В процессе проведения экспериментальных исследований фиксировались линейные размеры базовых сечений рабочего органа согласно рисунку 4.

Линейные размеры контролируемых сечений измерялись с шагом наработки 4 га. Выбраковка рабочих органов осуществлялась по следующим показателям:

- неравномерность глубины обработки;
- выглубление чизельного плуга;
- механическое разрушение рабочего органа, вызванное наездом на каменистое препятствие;
- достижение предельного значения износа в контролируемых сечениях.



Рисунок 3 – Модель экспериментального рабочего органа, полученная посредством 3D-печати и общий вид экспериментального рабочего органа чизельного плуга

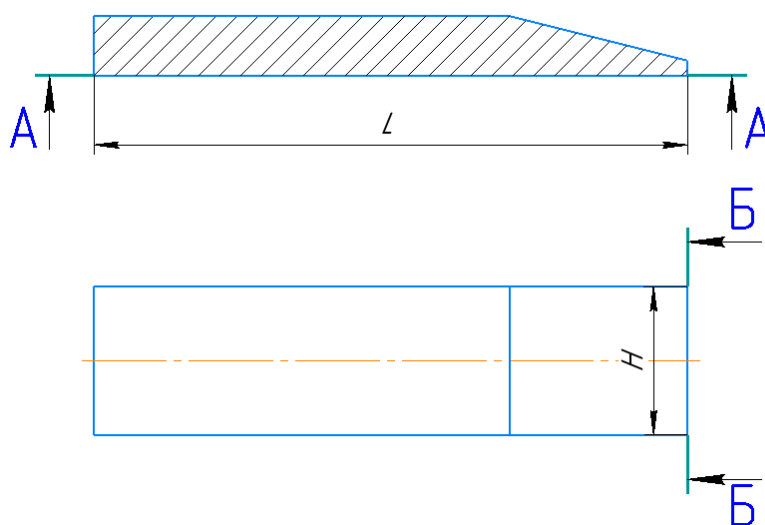


Рисунок 4 – Контролируемые линейные размеры рабочего органа в соответствующих сечениях

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований» изучено влияние применения модернизированных рабочих органов на тяговое сопротивление агрегата при различной скорости движения и влажности почвы, а также процесс износа носовой части рабочего органа.

Результаты исследования тягового сопротивления чизельного плуга

Влияние скорости движения агрегата на его тяговое сопротивление представлено на рисунке 5.

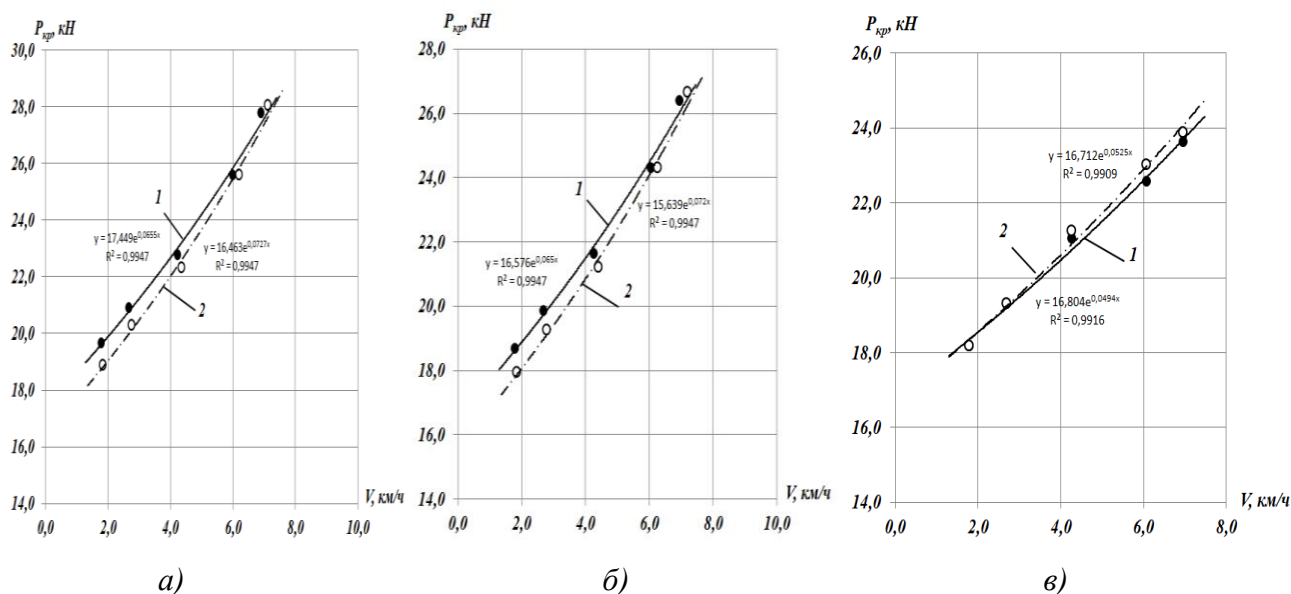


Рисунок 5 - Влияние скорости движения на тяговое сопротивление агрегата: 1 – рабочие органы без армировочных валиков; 2 – рабочие органы с армировочными валиками. Влажность почвы: а) - 12%; б) - 16%; в) - 19%;

Анализируя полученные экспериментальные данные можно установить, что сопротивление секций, оборудованных модернизированными рабочими органами, практически не отличается от сопротивления секций, оборудованных стандартными рабочими органами.

Отклонение абсолютного значения тягового сопротивления экспериментальной секции составляет $\pm 2\%$, т.е. меньше значения погрешности регистрируемой и измеряемой аппаратуры. Причем на низких скоростных режимах (до 4 км/ч) модернизированные рабочие органы показывают меньшее значение тягового сопротивления. Этот эффект стабильно проявляется на почвах с влажностью до 19%, рисунок 6.

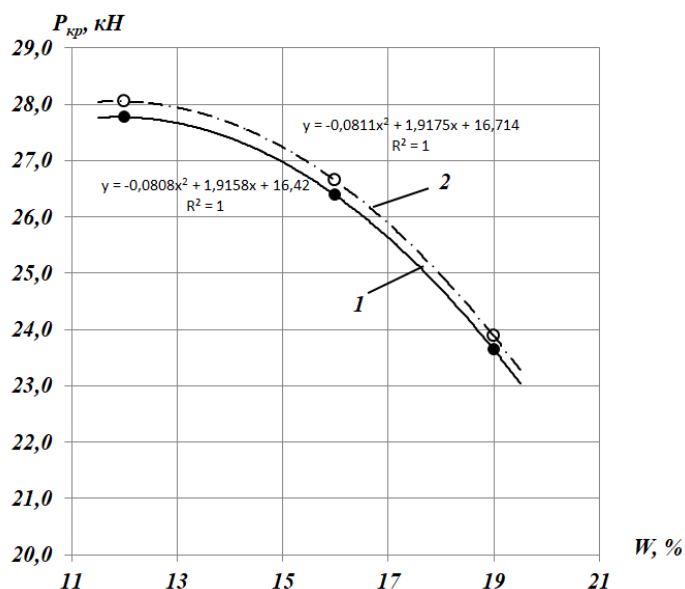


Рисунок 6 – Влияние влажности почвы на тяговое сопротивление агрегата: 1 – рабочий орган без армировочных валиков; 2 – рабочий орган с армировочными валиками

При увеличении влажности почвы выше 19%, вероятно, следует ожидать прирост тягового сопротивления, вызванный забиванием почвы в межваликовое пространство.

Анализ износа серийных и экспериментальных рабочих органов «весовым» методом

Характер протекания износа экспериментальных и серийных долот определялся процессом изменения их массы. На рисунке 7 представлены экспериментальные кривые, характеризующие потерю массы рабочих органов при выполнении ими определенного объема работ. По оси абсцисс отложен объем выполненной работы (наработка) в гектарах, а по оси ординат зафиксированы значения потерянной массы образцов, рассчитанное по формуле

$$\Delta m = 1 - \frac{m_{\text{ЭКСП}}}{m_{\text{Н}}}, \quad (21)$$

где - $m_{\text{ЭКСП}}$ - значения массы рабочего органа, в данный момент наработки, кг; $m_{\text{Н}}$ - масса рабочего органа до проведения эксперимента, кг.

Представленные аналитические зависимости показывают, что в целом характер протекания изменения массы образцов в зоне нормальной эксплуатации идентичен, на это указывает угол наклона кривой износа к оси абсцисс. Различие просматривается только в зоне приработки образцов, у экспериментальных образцов участок приработки более короткий. Можно предположить, что процесс износа носовой части серийных долот идет более интенсивно, чем у экспериментальных долот.

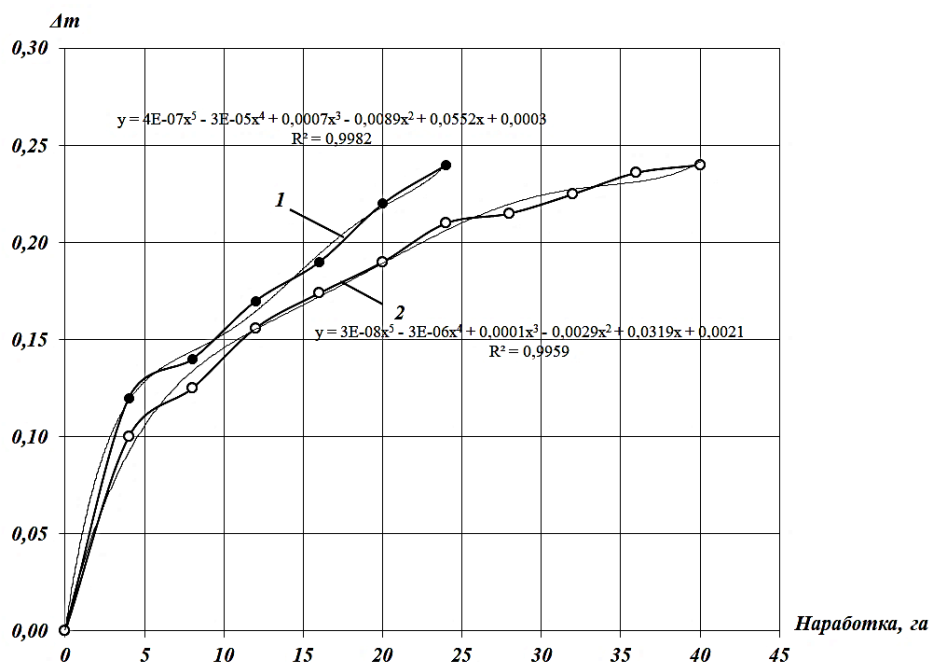


Рисунок 7 – Доля снижения массы долот в зависимости от наработки: 1 – рабочие органы без армировочных валиков; 2 – рабочие органы с армировочными валиками

Анализ износа серийных и экспериментальных долот методом контроля линейных размеров базовых сечений

Относительная величина изменения линейного размера L (рис. 4) определяется по следующей формуле:

$$\Delta = 1 - \frac{L_{\text{ЭКСП}}}{L_{\text{Н}}}, \quad (22)$$

где:

- $L_{\text{ЭКСП}}$ — значение линейного размера сечения А-А на текущий момент наработки, измеряемое в миллиметрах;
- $L_{\text{Н}}$ — исходное значение линейного размера сечения А-А до начала эксперимента, также измеряемое в миллиметрах.

В процессе эксперимента было установлено предельное значение расчетной величины Δ , оно составило $\Delta = 0,20 \dots 0,22$. При достижении этого значения наблюдается износ самой стойки чизельной секции, что является недопустимым.

Графические зависимости изменения линейных размеров в выбранных сечениях в зависимости от объема выполненных работ, представлены на рисунке 8.

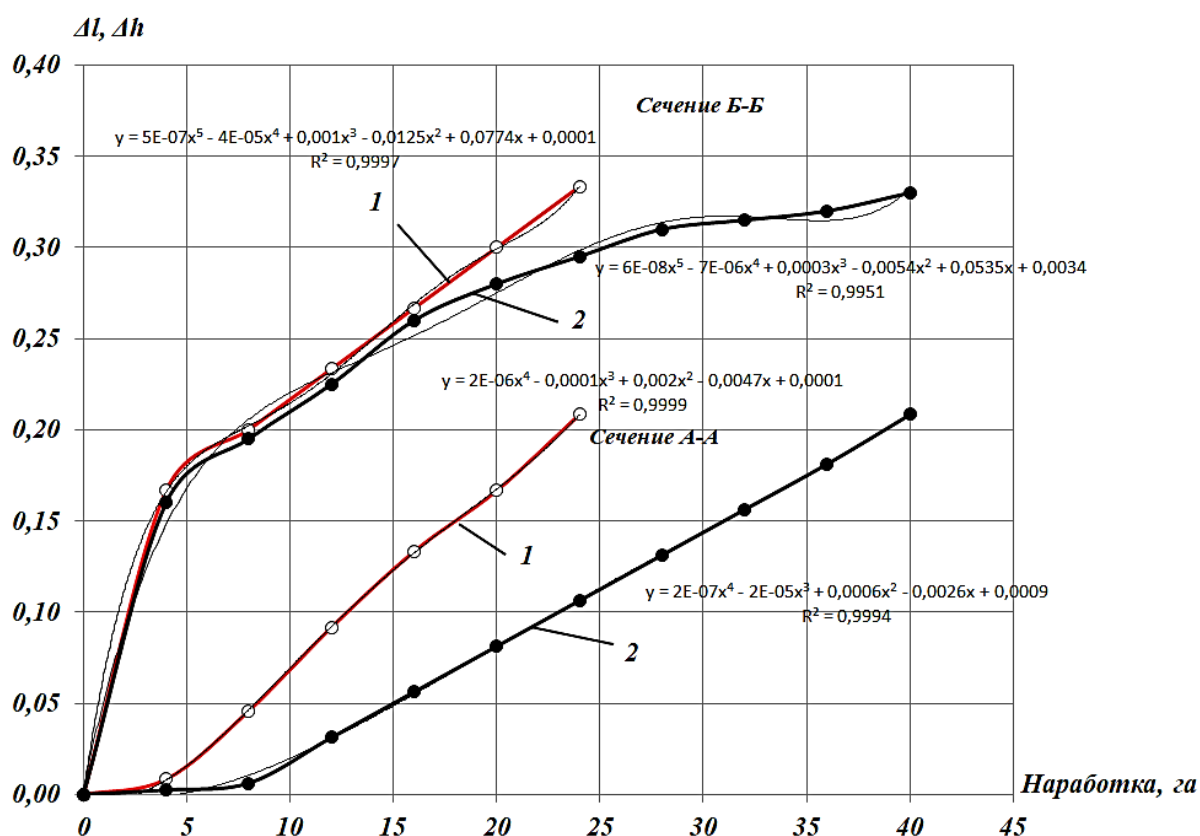


Рисунок 8 – Величина износа долот в сечениях А-А, Б-Б: 1 – рабочие органы без армировочных валиков; 2 – рабочие органы с армировочными валиками

Полученные графические зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- изменение линейных размеров контролируемого сечения $A-A$ происходит менее интенсивно у модернизированных рабочих органов;
- до наработки 20 га изменение линейного размера сечения $B-B$ серийных и модернизированных рабочих органов происходит практически одинаково;
- после наработки 20 га у экспериментального образца наблюдается снижение скорости изнашивания в горизонтальной плоскости, связано это с увеличением толщины носовой части, по мере износа боковых граней;
- ресурс модернизированных рабочих органов до предельного состояния составляет 40 га, что в 1,6 раза выше значения ресурса серийных рабочих органов.

В пятом разделе «Оценка экономической эффективности применения модернизированных рабочих органов» определен экономический эффект при использовании чизельного плуга ОЧО-5, оснащенного модернизированными рабочими органами. Результаты счета показывают, что их применение позволяет получить экономический эффект в размере 25238,27 рублей в расчете на 250 га обработанной агрегатом площади.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Эффективность почвообрабатывающих орудий напрямую зависит от технического состояния их рабочих органов. Одним из ключевых факторов, определяющих ресурс этих деталей, является износостойкость их рабочих поверхностей и условия эксплуатации. В ходе проведенного анализа был выявлен перспективный способ повышения долговечности рабочих органов чизельного плуга. Этот метод заключается в наплавлении армировочных валиков, изготовленных из высокоуглеродистых сплавов, на рабочую поверхность долота. Данный подход позволяет значительно увеличить срок службы инструмента, обеспечивая его надежную работу в сложных условиях эксплуатации.

2. Теоретически обоснованы геометрические размеры продольных армировочных валиков, располагаемых на носовой поверхности рабочего органа чизельного плуга. Предложено критериальное условие в аналитическом виде, позволяющее избежать забивания частиц почвы между армировочными валиками. На основании предложенного критерия получена аналитическая зависимость, позволяющая определить значения основных геометрических параметров армировочного валика: длина армировочного валика $l = 0,07\text{м}$; радиус армировочного валика, выполненного в виде полусферы, $r = 0,012\text{м}$. В результате применения параметрических кривых Безье получено уравнение образующей кривой, которая служит линией сопряжения армировочных валиков. Этот подход позволяет точно описать форму и положение кривой, обеспечивая плавный переход между элементами конструкции. Использование кривых Безье обеспечивает высокую точность и гибкость в проектировании, что особенно важно при создании сложных геометрических форм.

3. Разработана программа экспериментов для изучения эффективности чизельного агрегата с усовершенствованными рабочими органами. Используются современные методы анализа и мониторинга для обеспечения точности результатов. Предложено устройство для измерения горизонтального усилия от сельскохозяйственной машины, навешиваемой на трактор, а также способ и устройство для определения точки приложения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины.

4. Модернизированные рабочие органы показали высокую эффективность на почвах с влажностью до 19%. В ходе испытаний было установлено, что использование таких рабочих органов не приводит к увеличению силовой нагруженности агрегата по сравнению с серийными рабочими органами. Это позволило сохранить энергетические затраты на чизельную обработку почвы на прежнем уровне, что является важным фактором для повышения общей эффективности сельскохозяйственного производства.

5. Анализ износа рабочих органов по базовым сечениям выявил, что ресурс модернизированных рабочих органов до предельного состояния составляет 40 га. Это значение в 1,6 раза превышает ресурс серийных рабочих органов. Таким образом, применение модернизированных рабочих органов позволяет не только сохранить энергетические затраты, но и значительно увеличить срок службы рабочих органов, что в конечном итоге способствует повышению производительности и снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт почвообрабатывающей техники.

6. Экономическая оценка эффективности использования чизельного плуга ОЧО-5, оснащенного модернизированными рабочими органами, показала, что их применение позволяет получить экономический эффект в размере 25238,27 рублей в расчете на 250 га обработанной агрегатом площади.

Рекомендации производству

Для предприятий агропромышленного комплекса, расположенных в засушливых регионах и обрабатывающих тяжелые, глинистые почвы низкой влажности, склонные к образованию плотной корки и плужной подошвы, препятствующей нормальному развитию корневых систем растений, рекомендуется применение чизельных орудий, оснащенных модернизированными рабочими органами повышенной долговечности, что позволит снизить эксплуатационные затраты и повысить эффективность обработки почвы. Применение модернизированных рабочих органов позволяет увеличить срок службы орудия и снизить затраты на их обслуживание и ремонт.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Целесообразно продолжить углубленные исследования механизма адгезии почвенных частиц на поверхностях сельхозоборудования при влажности почвы выше 19%. Экспериментальные испытания и моделирование помогут точнее определить влияние увлажнения на эффективность работы техники, повысить её эксплуатационные характеристики, производительность и качество обработки

почвы, снизить износ и расходы на обслуживание. Полученные результаты будут полезны для разработки новых конструкций почвообрабатывающей техники, устойчивых к налипанию грунта и обеспечивающих стабильную высокую производительность.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Снижение тягового сопротивления чизельных орудий / Д. С. Гапич, Ю. А. Швабауэр, **С. И. Субботин**, Д. С. Губайдулин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 4(72). – С. 398-409. – DOI 10.32786/2071-9485-2023-04-40. – EDN PQJNHD.

2. Моделирование поверхности рабочего органа чизельного плуга / Ю. А. Швабауэр, **С. И. Субботин**, Д. С. Гапич, С. Д. Фомин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 1(73). – С. 365-373. – DOI 10.32786/2071-9485-2024-01-41. – EDN JMIAZS.

3. Тяговое сопротивление секции чизельного плуга с рабочими органами различной геометрической формы / С. Д. Фомин, Д. С. Гапич, **С. И. Субботин**, Ю. А. Швабауэр // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 2(74). – С. 358-367. – DOI 10.32786/2071-9485-2024-02-42. – EDN MLETDJ.

4. Экспериментальная установка для исследования чизельного агрегата, оборудованного рабочими органами с улучшенными геометрическими характеристиками / Ю. А. Швабауэр, **С. И. Субботин**, Д. С. Гапич, С. Д. Фомин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 2(74). – С. 394-406. – DOI 10.32786/2071-9485-2024-02-46. – EDN GGRJOS.

5. **Субботин, С. И.** Моделирование процесса взаимодействия частиц почвы с поверхностью рабочего органа, упрочненного продольным армировочным валиком / **С. И. Субботин**, С. Д. Фомин, Д. С. Гапич // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 4(76). – С. 348-355. – DOI 10.32786/2071-9485-2024-04-38. – EDN HBYAGU.

6. **Субботин, С. И.** Экспериментальные исследования чизельного агрегата, оборудованного рабочими органами с улучшенными геометрическими характеристиками / С. И. Субботин, Д. С. Гапич, С. Д. Фомин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 4(76). – С. 355-364. – DOI 10.32786/2071-9485-2024-04-39. – EDN ХОВВWV.

7. Гапич, Д.С. Тяговые полевые испытания чизельного рабочего органа со стандартными долотами и долотами с боковым сегментированием / Гапич Д.С., Борисенко И.Б., Галанский К.В., **Субботин С.И.** // Известия

Нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее проф. образование. – 2026. – № 1(85). – С. 457- 470. – DOI: 10.32786/2071-9485-2026-01-49.

8. **Субботин С. И.** Повышение долговечности рабочих органов чизельных орудий за счет упрочнения продольными армировочными валиками поверхности долота / **Субботин С. И.**, Гапич Д. С., Фомин С.Д. Галанский К.В. // Известия Нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее проф. образование. – 2026. – № 1(85). – С. 665-678. – DOI: 10.32786/2071-9485-2026-01-69.

- патенты РФ:

1. Способ и устройство для определения точки приложения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины: патент на изобретение RU 2801775 С1, / Рогачев А.Ф., Карсаков А.А., Гапич Д.С., Швабауэр Ю.А., **Субботин С.И.**; заявл. № 2022129130 от 08.11.2022; опубл. 15.08.2023.

2. Устройство для измерения горизонтального усилия от сельскохозяйственной машины, навешиваемой на трактор: патент на изобретение RU 2776191 С1 / Рогачев А.Ф., Карсаков А.А., Гапич Д.С., Швабауэр Ю.А., **Субботин С.И.**; заявл № 2022106285 от 09.03.2022; опубл. 14.07.2022.

3. Рабочий орган чизельного плуга: патент на изобретение RU 2792117 С1 / Гапич Д.С., Моторин В.А., Швабауэр Ю.А., **Субботин С.И.**; заявл № 2022118897 от 11.07.2022; опубл. 16.03.2023.

- в прочих изданиях:

1. Гапич, Д. С. Проектирование профиля долота чизельного орудия / Д. С. Гапич, Ю. А. Швабауэр, **С. И. Субботин** // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации: Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 80-летию со дня основания ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, Волгоград, 08–09 февраля 2024 года. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2024. – С. 24-28. – EDN NVKSUP.

2. Тяговое сопротивление глубокорыхлителя Ecolo-tiger 870 на различных кинематических режимах / Д. С. Гапич, Д. С. Гуйбадулин, Ю. А. Швабауэр, **С. И. Субботин** // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации: материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 80-летию победы в Сталинградской битве, Волгоград, 16–17 февраля 2023 года. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2024. – С. 115-119. – EDN YBEZIZ.

3. Оптимизация геометрии рабочего органа почвообрабатывающего орудия / Д. С. Гапич, Д. С. Гуйбадулин, Ю. А. Швабауэр, **С. И. Субботин** // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации : материалы Международной научно-практической

конференции, Волгоград, 09–11 февраля 2022 года / Волгоградский государственный аграрный университет. Том V. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2023. – С. 164-170. – EDN QJOBTO.

4. Технологическая адаптация почвообрабатывающего орудия к зональным условиям эксплуатации / Черноусов П. С., Гуйбадулин Д. С., Швабауэр Ю. А., **Субботин С. И.** // Научное обоснование стратегии цифрового развития АПК и сельских территорий: материалы Национальной научно-практической конференции, г. Волгоград, 9 ноября 2022 г. – Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2023. – Том III. – с. 416-421.

5. Секция культиватора адаптивного принципа действия / Д. С. Гапич, С. М. Головчанский, Ю. А. Швабауэр, **С. И. Субботин** // Научное обоснование стратегии развития АПК и сельских территорий в XXI веке : материалы Национальной научно-практической конференции, Волгоград, 10 ноября 2020 года. Том 2. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2021. – С. 9-12. – EDN EODUOE.

6. Концептуальная модель секции почвообрабатывающего орудия адаптивного принципа действия / Д. С. Гапич, Д. С. Гуйбадулин, Ю. А. Швабауэр, **С. И. Субботин** // Перспективные тенденции развития научных исследований по приоритетным направлениям модернизации АПК и сельских территорий в современных социально-экономических условиях : Материалы Национальной научно-практической конференции, Волгоград, 15 декабря 2021 года. Том I. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2021. – С. 404-409. – EDN MVZUVB.

В авторской редакции

Подписано в печать _____ Формат 60x84 1/16.

Усл.-печ. л 1,0. Тираж 100. Заказ

ИПК ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ «Нива».

400002, Волгоград, пр. Университетский, 26.