

*На правах рукописи*



**ШВАБАУЭР Юрий Александрович**

**СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРОЦЕССА  
ЧИЗЕЛЕВАНИЯ ПОЧВЫ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧИХ  
ОРГАНОВ ПЛУГА**

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

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Волгоград – 2024

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

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Фомин Сергей Денисович**

**Официальные оппоненты:** **Васильев Сергей Анатольевич**,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ  
ВО «Чувашский государственный  
университет имени И.Н. Ульянова»,  
кафедра «Робототехника и прикладная  
механика», заведующий кафедрой;

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

**Ведущая организация**  
ФГБОУ ВО Саратовский  
государственный  
университет генетики, биотехнологии и  
инженерии имени Н.И. Вавилова

Защита диссертации состоится «14» декабря 2024 года в 9-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.505.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова» по адресу: 358000, Республика Калмыкия, г. Элиста, ул. А.С. Пушкина, 9, ауд. 102

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «КалмГУ» и на официальных интернет-сайтах ВАК РФ и КалмГУ <https://kalmgu.ru/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 года

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Курепина  
Наталья Леонидовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Среди эффективных агротехнических приемов разрушения почвы, с точки зрения экологических факторов (развитие ветровой и водной эрозии), можно выделить безотвальное рыхление чизельными плугами. Данный агротехнический прием применяют, как правило, на «тяжелых» почвах: значение коэффициента удельного сопротивления  $6,5 - 11 \text{ кг/см}^2$ ; содержание гумуса менее 2%; пониженное значение влажности почвы на момент проведения чизельной обработки (до 12%).

Стремление ученых уменьшить суммарные затраты на сплошную обработку почвы, заставляет их обращать внимание на физические процессы взаимодействия почвообрабатывающего орудия с почвой, изучение которых позволяет совершенствовать геометрию рабочих органов существующих орудий по критериям энергоэффективности.

Поэтому изучение и разработка методов совершенствования поверхностей рабочих органов орудий для безотвальной обработки почвы, направленных на снижение энергетических затрат на обработку почвы, по является актуальной задачей.

### Степень разработанности темы

Неоценимый вклад в направление науки, связанное с математическим описанием физических процессов разрушения почвы рабочими органами почвообрабатывающих машин, внесли следующие отечественные ученые: *Горячкин В.П., Ветохин В.И., Путрин А.С., Бабицкий Л.Ф., Бабков В.Ф., Бахтин П.У., Борисенко И.Б., Васильев С.А., Виноградов В.И., Гапич Д.С., Гольдштейн М.Н., Джабборов Н.И., Зеленин А.Н., Камбулов С.И., Кацыгин В.В., Качинский Н.А., Кузнецова В.Н., Кушнарев А.С., Лебедев А.Т., Лобачевский Я.П., Мударисов С.Г., Новиков Ю.Ф., Осадчий А.П., Панов И.М., Рыков В.Б., Синеоков Г.Н., Старцев С.В., Цепляев А.Н., Эвиев В.А.* и др. В работах перечисленных авторов рассмотрены результаты экспериментальных исследований нагрузок на рабочие органы почвообрабатывающих машин различной геометрической формы; обоснованы параметры их геометрической формы; рассмотрены внутренние деформации почвы, возникающие под воздействием клина; предложены математические модели, описывающие поверхности рабочих органов по критериям энергетической эффективности. Тем не менее, в земледельческой механике остаются не решенные вопросы, связанные с переменной деформацией почвенного пласта. Математическому описанию поверхности рабочего органа, её реализации и оценки эффективности применения рабочих органов, обеспечивающих переменную деформацию почвенного пласта, посвящена предлагаемая работа.

**Объект исследования** – чизельный агрегат для глубокого рыхления почвы.

**Предмет исследования** – геометрические параметры поверхности рабочих органов чизельных орудий, обеспечивающие изгибную деформацию почвенного пласта.

**Целью исследования является** – снижение энергоемкости процесса чизелевания почвы за счет оптимизации геометрических параметров поверхности рабочего органа чизельного плуга.

**Задачи исследования:**

- 1) провести анализ теоретических основ процесса разрушения почвенного пласта рабочими органами почвообрабатывающих орудий;
- 2) выполнить теоретическое обоснование геометрических параметров поверхности рабочего органа чизельного плуга;
- 3) провести лабораторно-полевые исследования чизельного плуга с модернизированными рабочими органами;
- 4) провести производственную проверку чизельного плуга с модернизированными рабочими органами в производственных условиях и выполнить экономическую и энергетическую оценку эффективности его применения.

**Научная новизна работы заключается:**

$\frac{3}{4}$  в теоретическом обосновании поверхности рабочих органов чизельного плуга по критерию минимизации энергетических затрат процесса чизелевания почвы;

$\frac{3}{4}$  разработке способа и устройства для измерения горизонтального усилия от сельскохозяйственной машины, агрегатируемой с трактором;

$\frac{3}{4}$  результатах теоретических и экспериментальных исследований оценки эффективности применения рабочих органов чизельных орудий с улучшенной геометрической формой рабочей поверхности.

**Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели, позволяющей моделировать поверхность рабочего органа чизельного плуга по критерию минимизации энергетических затрат процесса чизелевания почвы.

Практическая значимость работы заключается в получении экспериментальных образцов рабочих органов чизельного плуга, обладающих улучшенными геометрическими характеристиками рабочей поверхности, и позволяющих выполнять процесс чизелевания почвы с меньшими энергетическими затратами.

**Методология и методы исследования**

Методология и методы исследования базируются на теоретическом обосновании предложенных мер с применением классических законов земледельческой механики, прикладной механики, теории колебаний и методов статистической обработки экспериментальных данных и их верификации в реальных условиях эксплуатации.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) параметрическое уравнение базовой образующей кривой линии поверхности рабочего органа чизельного плуга, полученной методом параболической интерполяции расчетных парабол при условии, что они проходят через реперные точки, принадлежащих поверхности рабочего органа;

- 2) параметрическое уравнение поверхности моделируемого рабочего органа;
- 3) экспериментальная модель рабочего органа чизельного орудия, обеспечивающая снижение энергетических затрат процесса чизелевания почвы;
- 4) результаты экспериментальных исследований оценки эффективности применения рабочих органов чизельных орудий с улучшенной геометрической формой рабочей поверхности.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов проведенного исследования подтверждается использованием современной регистрирующей и измерительной аппаратуры в процессе проведения натуральных испытаний, а также высокой сходимостью теоретических данных и данных, полученных экспериментальным путем.

Основные положения работы были представлены и обсуждены на конференциях различного уровня, среди них:

- Оптимизация сельскохозяйственного землепользования и усиление экспортного потенциала АПК РФ на основе конвергентных технологий. Международная научно-практическая конференция, проведенная в рамках Международного научно-практического форума, посвященного 75-летию Победы в Великой отечественной войне 1941-1945 гг., г. Волгоград, 2020.

- «XXV региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Волгоград, 2021.

- Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в современных экономических условиях. Международная научно-практическая конференция. Волгоград, 2021.

- Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации. Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию победы в Сталинградской битве, г. Волгоград, 16-17 февраля 2023 г.

- Научное обоснование стратегии цифрового развития АПК и сельских территорий. Национальная научно-практическая конференция. Волгоград, 2023.

#### **Структура и объем диссертации.**

Представленная диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11. -2011 Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. Текст диссертации включает в себя: введение (введение, раздел 1); основную часть (разделы 2,3,4,5); заключение; список литературы. Текст диссертации представлен на 131 стр., включает в себя 86 иллюстраций, 10 таблиц и 5 приложений.

По теме диссертационного исследования опубликовано 14 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях RSCI, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 патента на изобретение. Объем опубликованных работ составляет 6,85 п.л., из них 3,08 п.л. принадлежит лично автору.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** «Проблемные вопросы снижения энергетических затрат технологического процесса чизелевания почвы» рассматриваются технологический процесс чизелевания почвы, агротехнические требования, современные конструкции чизельных плугов и их рабочих органов, проблемные вопросы обоснования формы поверхности рабочих органов чизельных орудий, математическая модель физико-механического процесса разрушения почвенной среды рабочими органами при почвообработке. Сформулированы цели и задачи исследования.

**Во втором разделе** «Теоретическое обоснование рациональной поверхности рабочего органа чизельного плуга» на основании рациональной формулы профессора Горячкина В.П. доказано, что один из методов уменьшения энергозатрат на почвообработку – использование рабочих органов, геометрическая форма которых обеспечивает переменную изгибную деформацию почвенного пласта.

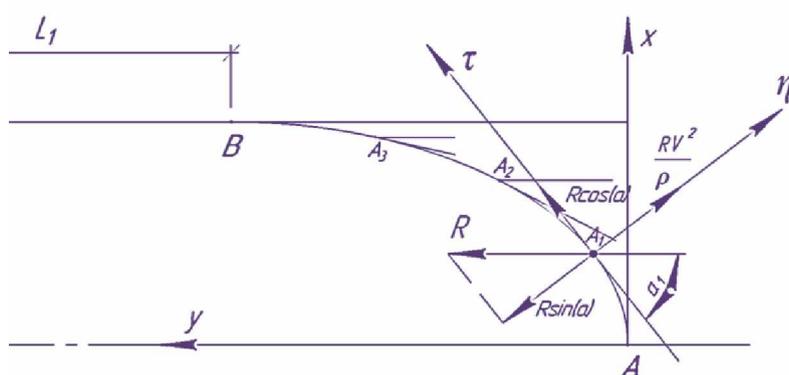


Рисунок 1 – Силы, возникающие при перемещении частицы почвы по параболической поверхности лезвия долота

На основании исследования дифференциальных уравнений движения частицы почвы по поверхности рабочего органа получено уравнение траектории движения, движение по которой происходит с наименьшими энергетическими затратами. Данная траектория является параболой (рис. 1). На основании чего выдвинута гипотеза о том, что параболическая поверхность рабочего органа может обеспечивать снижение одного из слагаемых общего тягового сопротивления рабочего органа, связанного с перемещением частицы почвы по его поверхности.

Область существования полученной параболической поверхности ограничена геометрическими размерами рабочего органа (долота), рисунок 2.

Результат наложения расчетных кривых на определенные реперные точки показан на рисунке 3. При этом, параболы заданы четырьмя последовательными точками: первая – тремя первыми точками, вторая – тремя последними. В качестве первой реперной точки принята точка P1, находящаяся на верхней границе долота в левой её части, координаты данной точки P1 (0;24).

Вторая реперная точка находится в зоне второго крепления долота к стойке орудия, координаты точки P2 (80;12). Третья реперная точка находится на границе двух функциональных зон долота, рабочей зоны и зоны крепления.

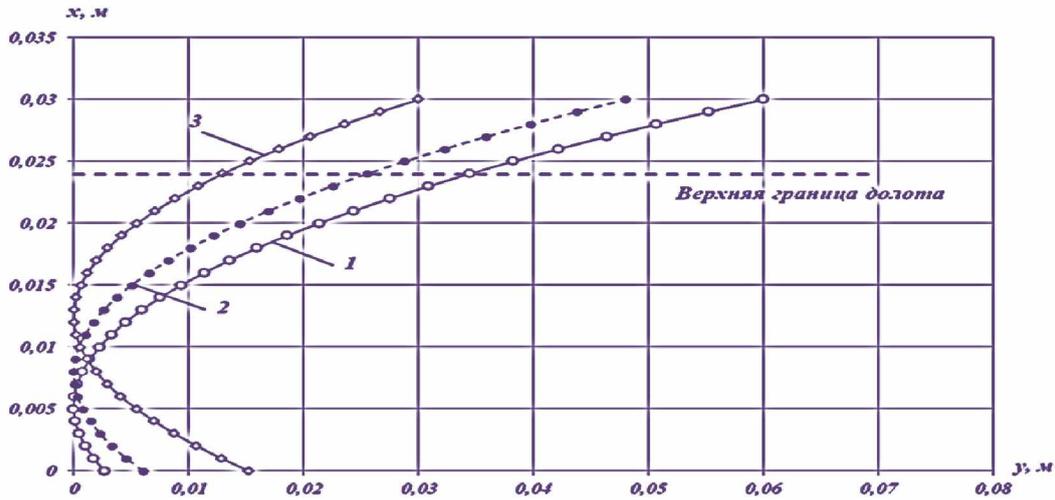


Рисунок 2 – Расчетные параболические кривые при различных значениях  $l$  – расчетная кривая при  $y_l=0,06$  м, 2 – расчетная кривая при  $y_l=0,05$  м, 3 – расчетная кривая при  $y_l=0,03$  м.

Положение точки  $P_3$  определяется координатами (168;24). Положение четвертой реперной точки принято на носовой части долота. Данная точка определяет границы существования рабочего органа, её координаты  $P_4$  (240;6).

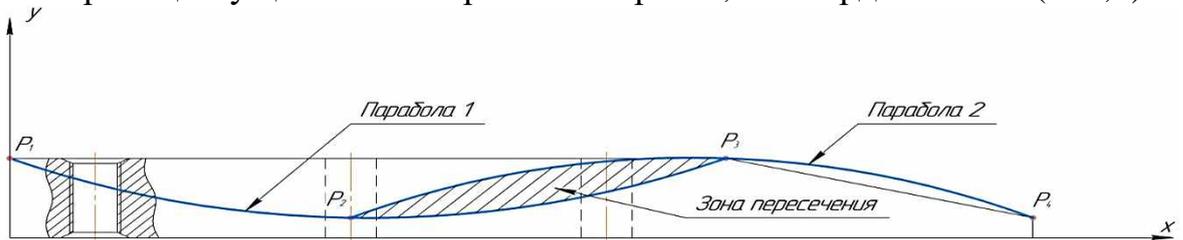


Рисунок 3 – К вопросу построения образующей кривой, проходящей через установленные реперные точки.

Для определения формы кривой, получаемой в зоне пересечения исследуемых парабол, воспользуемся параболической интерполяцией. Основная идея параболической интерполяции состоит в линейной интерполяции пересекающихся ветвей параболы. Пересечение парабол лежит между второй и третьей точками. Несмотря на то, что параболы – плоские кривые, их линейная интерполяция представляет собой кубическую пространственную кривую. Образующая кривая линии поверхности рабочего органа чизельного плуга получена путем сопряжения расчетных парабол, при условии, что они проходят через реперные точки, принадлежащие поверхности рабочего органа.

Параболическая интерполяция сопрягаемых нами парабол в параметрическом виде будет иметь вид:

$$c(t) = \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 27 & 9 & 3 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 24 \\ 80 & 12 \\ 168 & 24 \\ 240 & 6 \end{bmatrix}$$

Полученная кривая для различных значений координат точки  $P_2$  изображена на рисунке 4.

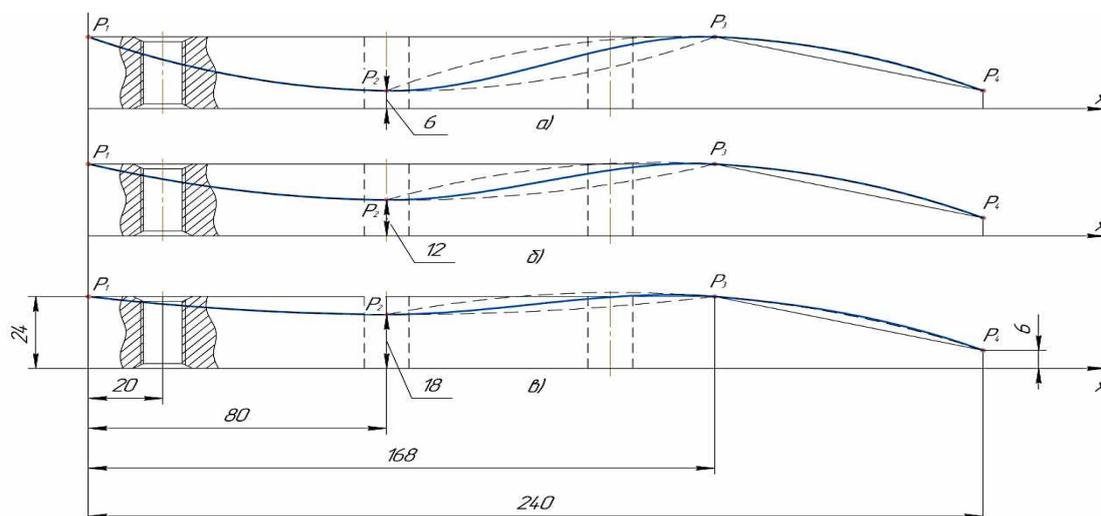


Рисунок 4 – Расчетная образующая кривая поверхности рабочего органа чизельного орудия: а) координаты реперных точек  $P_1 (0;24)$ ,  $P_2 (80;6)$ ,  $P_3 (168;24)$ ,  $P_4 (240;6)$ ; б) - координаты реперных точек  $P_1 (0;24)$ ,  $P_2 (80;12)$ ,  $P_3 (168;24)$ ,  $P_4 (240;6)$ ; в) - координаты реперных точек  $P_1 (0;24)$ ,  $P_2 (80;18)$ ,  $P_3 (168;24)$ ,  $P_4 (240;6)$ .

На основании параболической интерполяции аналитически заданных параболических линий получены параметрические уравнения образующей кривой и поверхности моделируемого рабочего органа.

Для создания поверхности вращения можно использовать любую параметрическую кривую, например, как в нашем случае, параболический сплайн. Согласно материалам предыдущего раздела, параметрическая пространственная кривая задается уравнением вида

$$P(t) = [T][N][G],$$

где  $[T][N][G]$  – матрица параметров, матрица смещений и геометрическая матрица, соответственно.

Тогда в общей форме уравнение поверхности можно записать в виде

$$Q(t, \varphi) = [T][N][G][S],$$

где  $[S]$  – матрица, характеризующая поворот кривой вокруг оси на угол  $\varphi$ .

Для частного случая поворота относительно оси  $x$   $[S]$  определяется следующими значениями

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Применительно к нашей задаче имеем:

Координаты реперных точек  $P_1 (0;24)$ ,  $P_2 (80;12)$ ,  $P_3 (168;24)$ ,  $P_4 (240;6)$ .

Будем осуществлять поворот расчетной кривой относительно оси  $z$ , на угол  $\varphi$ , чтобы получить поверхность вращения.

Тогда имеем

$$Q(t, \varphi) = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 24 \\ 80 & 12 \\ 168 & 24 \\ 240 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для решения данного параметрического уравнения был выбран пакет Mathcad. На рисунке 5 представлены результаты решения.

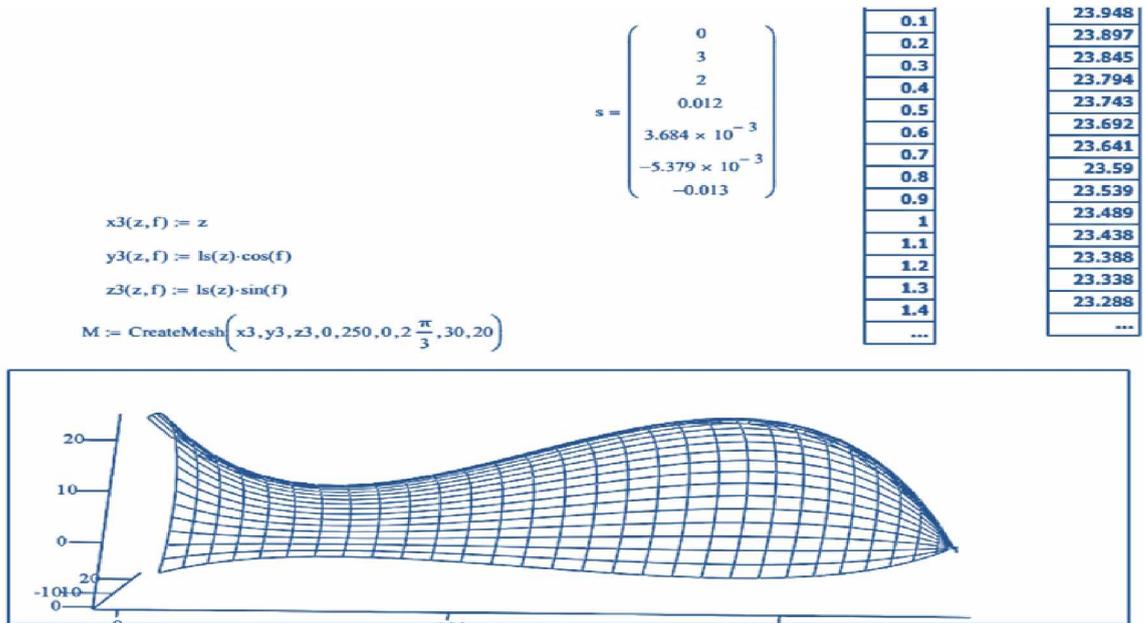


Рисунок 5 – Результаты поворота базовой линии относительно оси  $z$  на угол  $\pm \frac{\pi}{2}$ .

**В третьем разделе** представлена программа экспериментальных испытаний чизельного агрегата, оборудованного рабочими органами с улучшенными геометрическими характеристиками, предусматривающая изготовление опытной партии экспериментальных долот, создание экспериментальной установки, позволяющей выполнить тяговые испытания рабочей секции чизельного орудия, оборудованной экспериментальными рабочими органами; создание натурального объекта исследования, в виде чизельного машинно-тракторного агрегата, позволяющего оценить эффективность применения экспериментальных рабочих органов в условиях реальной эксплуатации; проведение сравнительных полевых испытаний экспериментальных объектов, получение значений регистрируемых параметров в виде осциллограмм, их математическая обработка, построение графических зависимостей исследуемых параметров.

По полученной 3D модели рабочего органа (рисунок 6) была отлита партия экспериментальных долот (*на долото получен патент на изобретение RU 2792117 C1*).

В качестве основного материала для изготовления экспериментальных долот был выбран высокоуглеродистый сплав ВЧ-50. Экспериментальные долота, после операций механической обработки, были подвергнуты термической обработке, состоящей из изотермической закалки и низкого отпуска. В качестве основного элемента экспериментальной установки выступала рама садового культиватора с ходовой системой. На раму при помощи переходных звеньев крепилась рабочая секция чизельного агрегата ОЧО-5 (рис. 7)

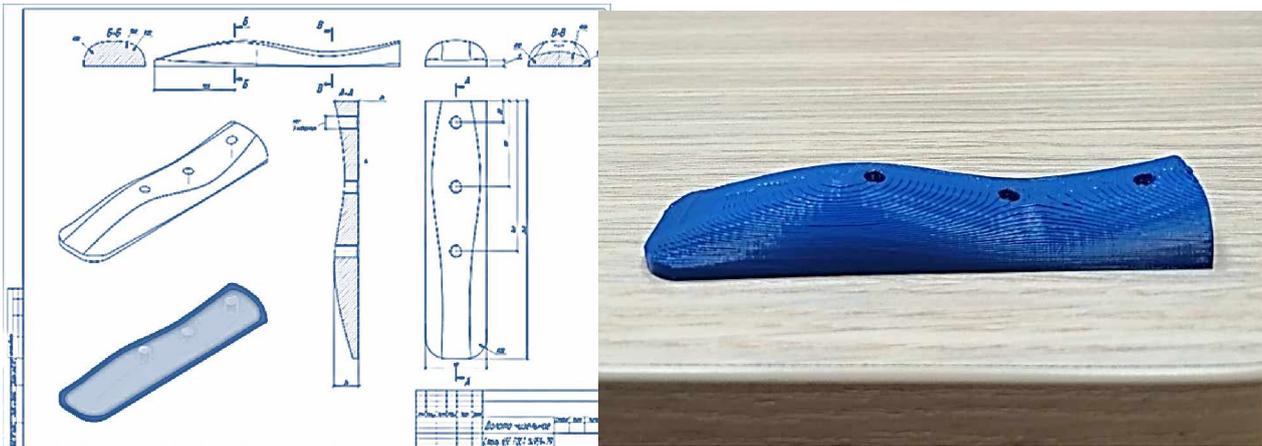


Рисунок 6 - Фрагменты рабочих чертежей экспериментального долота с улучшенными геометрическими характеристиками рабочей поверхности и модель экспериментального рабочего органа, полученная посредством 3D – печати



Рисунок 7 – Общий вид экспериментальной установки по определению тягового сопротивления рабочей секции чизельного орудия

В процессе исследований нами предложено устройство для измерения горизонтального усилия от сельскохозяйственной машины, навешиваемой на трактор (*патент на изобретение RU 2776191 C1*), (рис. 8), а также способ и устройство для определения точки приложения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины (*патент на изобретение RU 2801775 C1*), (рис. 9), что позволяет расширить функциональные возможности известных технических решений для определения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины.

В качестве объекта исследования был выбран чизельный машинно-тракторный агрегат, состоящий из трактора ДТ – 75М и чизельного плуга ОЧО-5 (рис. 10).

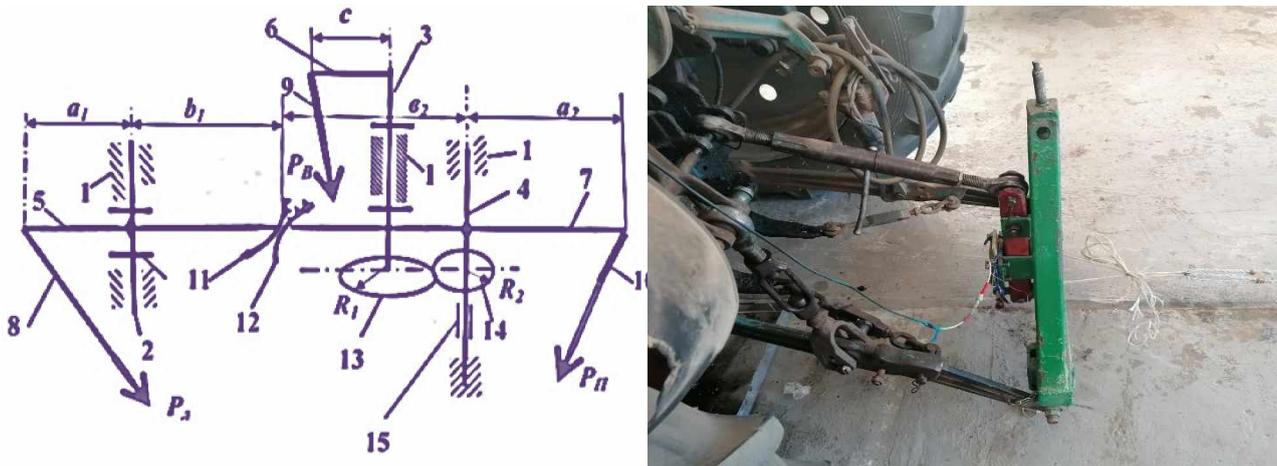


Рисунок 8 – Кинематическая схема: 1–опора с радиально-упорными подшипниками; 2,3,4–валы; 5,6,7– дуплечие рычаги; 8,9,10–тяги гидронавесной системы трактора; 11,12– зубчатые секторы; 13– зубчатое колесо; 14–зубчатая шестерня; 15–датчик крутящего момента. Общий вид устройства для измерения горизонтального усилия от сельскохозяйственной машины, навешиваемой на трактор.

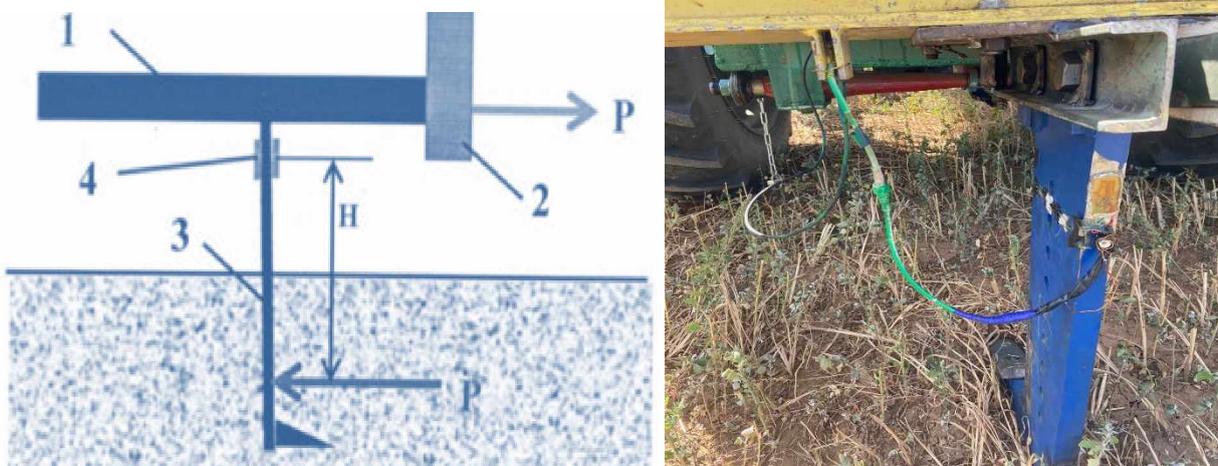


Рисунок 9 – Кинематическая схема и общий вид устройства для определения точки приложения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины: 1–рама; 2–датчик значения равнодействующей продольных сил; 3–рабочий орган; 4–датчик тензометрического типа

В процессе выполнения экспериментальных работ непрерывно фиксировались следующие параметры: действительная скорость движения, горизонтальная составляющая тягового сопротивления секции, усилие на крюке

трактора. Почвенный фон – стерня пшеницы озимой. Влажность почвенного фона в процессе выполнения экспериментальных работ варьировалась от 8 до 16 %. Для регистрации и обработки силовых и кинематических величин, в процессе выполнения технологического процесса чизелевания, применялась измерительная система, состоящая из переносного компьютера; аналого-цифрового преобразователя E14-440M; многоканального усилителя сигнала ТОПАЗ-3-01 (рисунок 11). Поддержку модуля E-440 осуществляет программный продукт L-Graph, который является многоканальным осциллографом спектроанализатором-регистратором с достаточно простым интерфейсом. Рабочее окно программного продукта «PowerGraph»

представлено на рисунке 11, там же показаны осциллограммы измеряемых величин.



Рисунок 10 – Объект исследования. Работа агрегата в поле

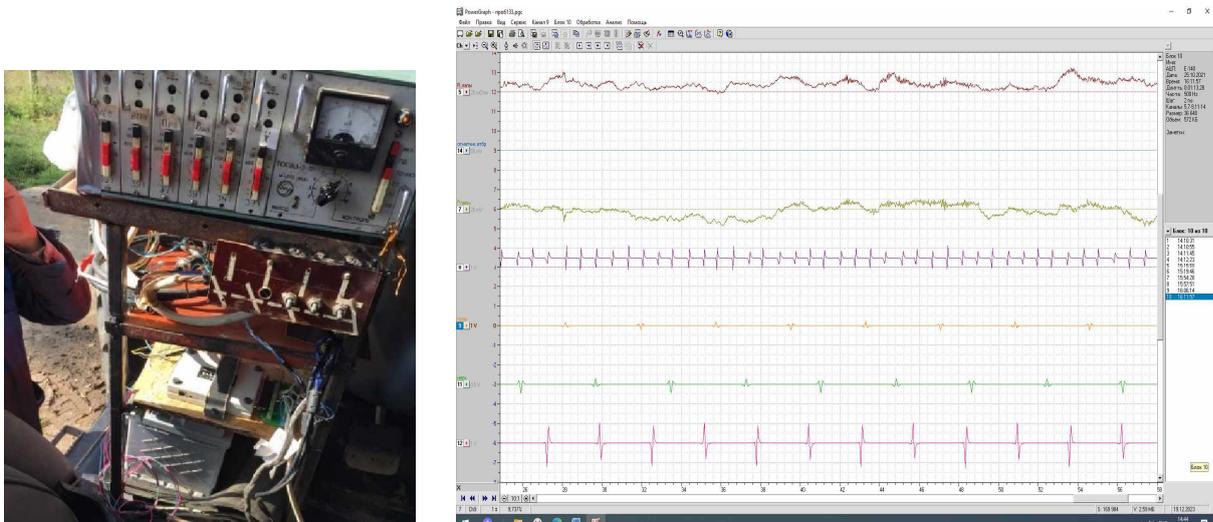


Рисунок 11 - Система регистрации измеряемых параметров и фрагмент регистрируемых параметров.

**В четвертом разделе** представлены результаты экспериментальных исследований, наглядно иллюстрирующих эффективность применения модернизированных рабочих органов.

Экспериментальная часть была выполнена на почвенном фоне: стерня озимых культур. Влажность почвенного фона варьировалась от 8 до 16%. Изменение тягового сопротивления рабочей секции чизельного плуга изучалась в функции действительной скорости движения. Данная характеристика способна оценить не только силовую нагруженность трактора, но и динамическую составляющую тягового сопротивления.

Результаты экспериментальных исследований для почвенного фона различной влажности представлены на рисунках 12 – 13.

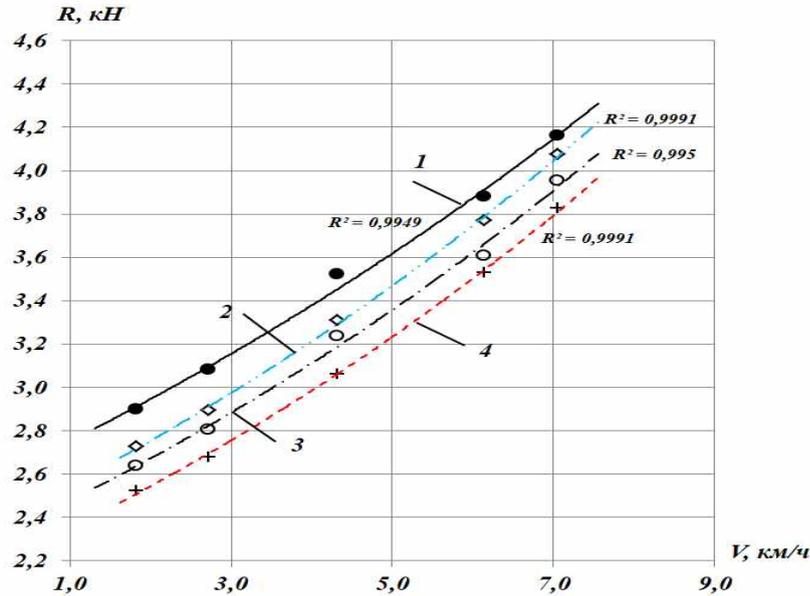


Рисунок 12 - Изменение тягового сопротивления чизельной стойки от скорости движения агрегата: 1 – серийное долото; 2 – экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами  $P_1$  (0;24),  $P_2$  (80;18),  $P_3$  (168;24),  $P_4$  (240;6); 3 - экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами  $P_1$  (0;24),  $P_2$  (80;12),  $P_3$  (168;24),  $P_4$  (240;6); 4 - экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами  $P_1$  (0;24),  $P_2$  (80;6),  $P_3$  (168;24),  $P_4$  (240;6). Влажность почвы 8%.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при увеличении рабочей скорости движения чизельного агрегата наблюдается увеличение тягового сопротивления экспериментальной секции. Рост сопротивления движению секции наблюдается как при использовании серийных долот, так и при использовании экспериментальных долот, что свидетельствует об общем усилении динамичности процесса нагружения машинно-тракторного агрегата.

Использование экспериментальных долот позволяет снизить среднее значение тягового сопротивления секции, наибольший эффект наблюдается при низких скоростях движения. По мере увеличения скорости движения эффективность экспериментальных долот несколько снижается. Снижение тягового сопротивления за счет применения экспериментальных долот, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами  $P_1$  (0;24),  $P_2$  (80;18),  $P_3$  (168;24),  $P_4$  (240;6), на почвах влажностью 8-12% составило: на скоростях до 6 км/ч – 12 %; на скоростях свыше 6 км/ч – 8%. Такой эффект можно объяснить тем, что «при работе на повышенных скоростях пласт почвы, движущийся по рабочей поверхности, не успевает из-за динамической составляющей полностью повторить профиль рабочего органа, что приводит к снижению доли изгибных деформаций, связанных с растяжением почвенного пласта».

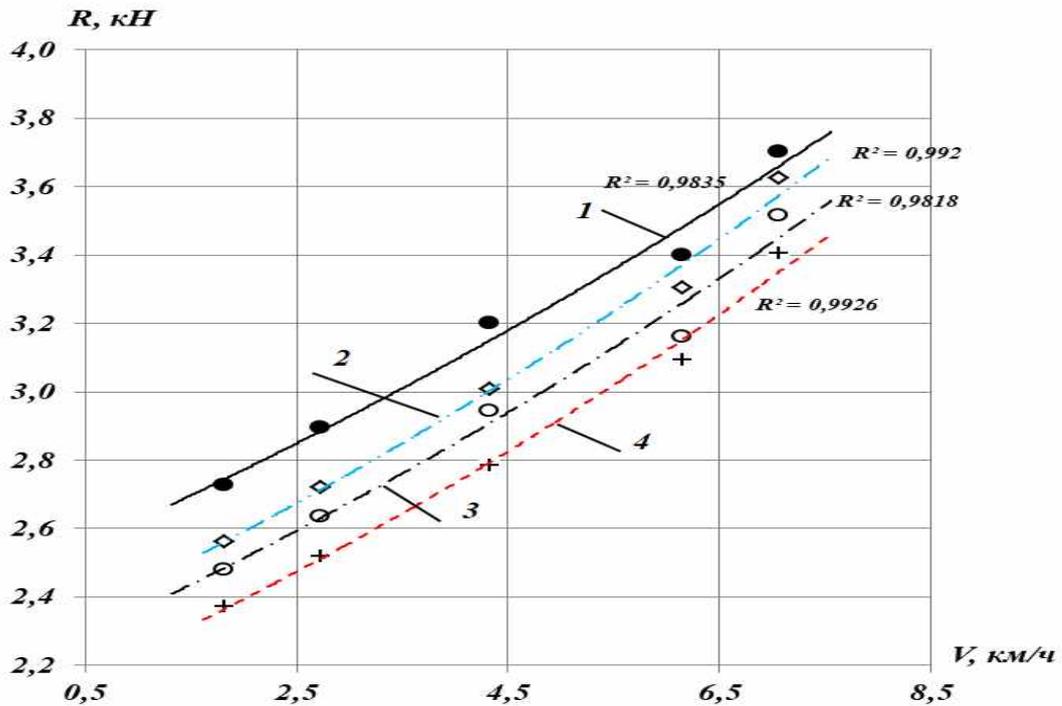


Рисунок 13 - Изменение тягового сопротивления чизельной стойки от скорости движения агрегата: 1 – серийное долото; 2 – экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами  $P_1 (0;24)$ ,  $P_2 (80;18)$ ,  $P_3 (168;24)$ ,  $P_4 (240;6)$ ; 3 - экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами  $P_1 (0;24)$ ,  $P_2 (80;12)$ ,  $P_3 (168;24)$ ,  $P_4 (240;6)$ ; 4 - экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами  $P_1 (0;24)$ ,  $P_2 (80;6)$ ,  $P_3 (168;24)$ ,  $P_4 (240;6)$ . Влажность почвы 12%.

Дополнительно можно отметить, что при работе на почвах влажностью более 16% эффективность применения экспериментальных долот несколько снижается. Данное явление можно объяснить тем, что при увеличении влажности почвы происходит рост её липкости и связности, что приводит к некоторому налипанию частиц почвы на вогнутую часть долота. В этом случае движение почвенного пласта происходит не только по сопряжению сталь - почва, а частично по сопряжению почва - почва, что увеличивает коэффициент трения и, главное, уменьшается степень изгибных деформаций пласта.

Общую оценку эффективности применения экспериментальных рабочих органов, в зависимости от скорости движения агрегата, можно проследить по графическим зависимостям рисунков 14-15. По оси ординат отложена величина, характеризующая разность тягового сопротивления между серийной секцией и секцией, оборудованной экспериментальными рабочими органами.

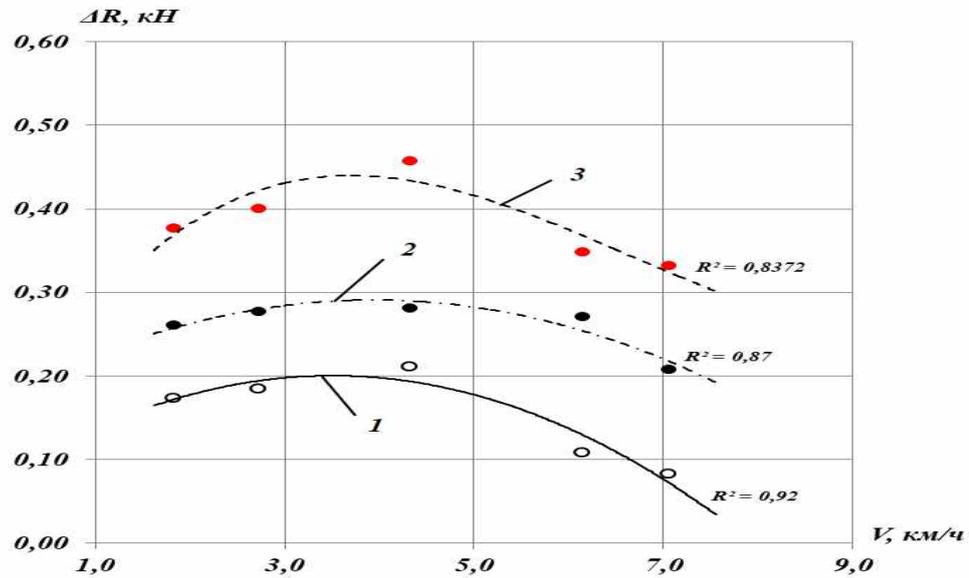


Рисунок 14 - Снижение тягового сопротивления экспериментальных стоек по отношению к серийной в функции скорости движения агрегата: 1 – экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами P1 (0;24), P2 (80;18), P3 (168;24), P4 (240;6); 2 - экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами P1 (0;24), P2 (80;12), P3 (168;24), P4 (240;6); 3 - экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами P1 (0;24), P2 (80;6), P3 (168;24), P4 (240;6). Влажность почвы 8%.

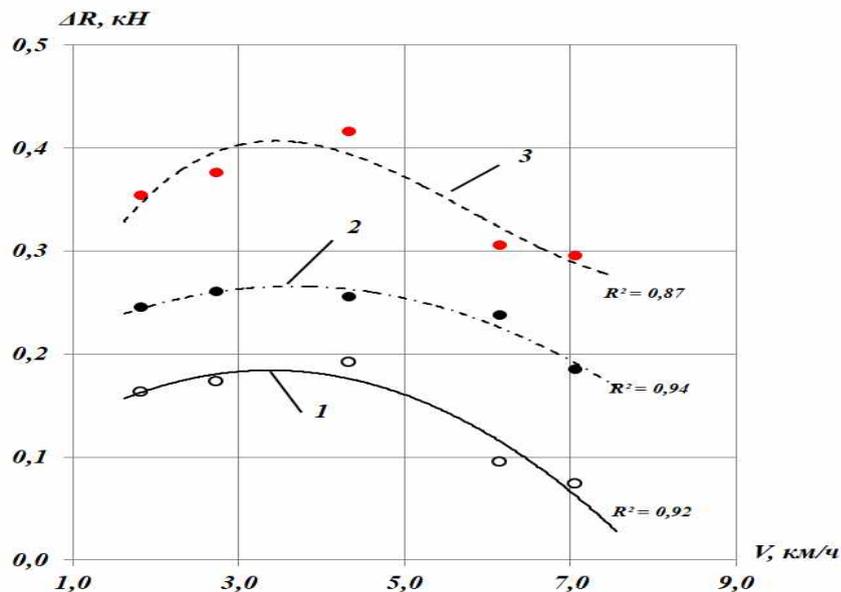


Рисунок 15 - Снижение тягового сопротивления экспериментальных стоек по отношению к серийной в функции скорости движения агрегата: 1 – экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами P1 (0;24), P2 (80;18), P3 (168;24), P4 (240;6); 2 - экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами P1 (0;24), P2 (80;12), P3 (168;24), P4 (240;6); 3 - экспериментальное долото, форма поверхности которого получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами P1 (0;24), P2 (80;6), P3 (168;24), P4 (240;6). Влажность почвы 12%.

На рисунке 16 представлены результаты экспериментальных исследований крюковой нагрузки чизельного агрегата на базе трактора ДТ-75М в зависимости от действительной скорости движения.

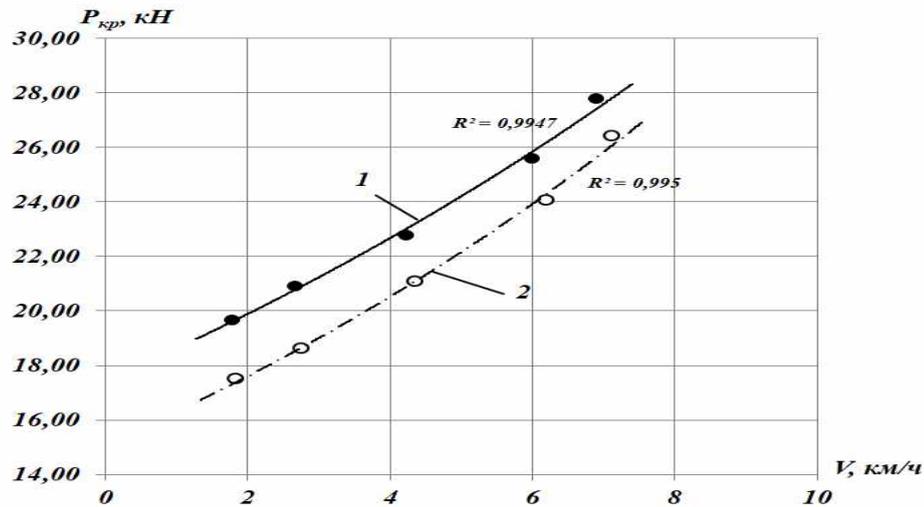


Рисунок 16 – Изменение тягового сопротивления чизельного агрегата в функции скорости движения. 1 – серийные рабочие органы; 2- экспериментальные рабочие органы. Влажность почвы 8%.

Анализ данных рисунка 16 показывает, что при увеличении скорости движения чизельного агрегата наблюдается рост крюковой нагрузки. Данный эффект характерен как для агрегата, оборудованного серийными рабочими органами, так и для экспериментального агрегата. При увеличении рабочей скорости движения агрегата, оборудованного серийными рабочими органами, от 1,78 до 6,9 км/ч значение крюковой нагрузки изменялось от 19,66 кН до 27,77 кН. В случае использования экспериментальных рабочих органов диапазон изменения крюкового усилия трактора составил от 17,49 до 26,39кН при увеличении скорости движения от 1,84 до 7,13 км/ч.

Приблизительно, аналогичный результат наблюдался при работе на почвенном фоне влажностью 12%, рисунок 17.

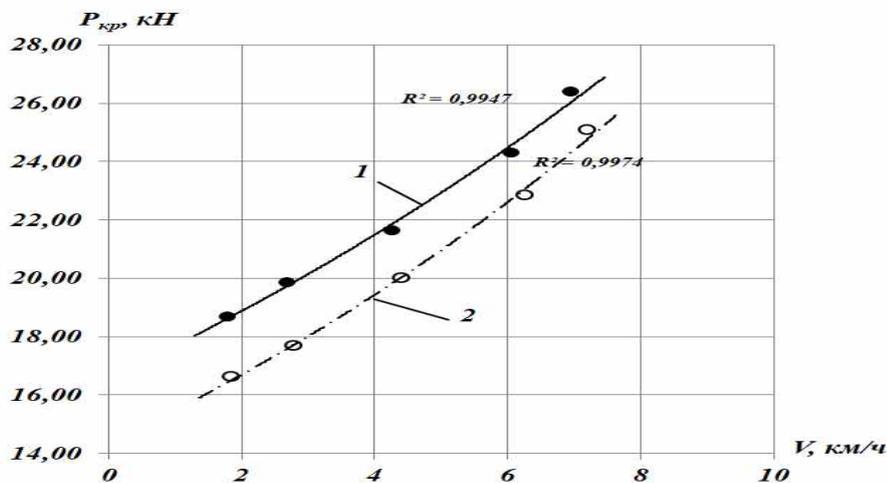


Рисунок 17 – Изменение тягового сопротивления чизельного агрегата в функции скорости движения. 1 – серийные рабочие органы; 2- экспериментальные рабочие органы. Влажность почвы 12%.

При увеличении рабочей скорости движения агрегата, оборудованным серийными рабочими органами от 1,79 до 6,9 км/ч значение крюковой нагрузки изменялось от 18,67 кН до 26,38 кН. В случае использования экспериментальных рабочих органов диапазон изменения крюкового усилия трактора составил от 16,62 до 25,07 кН при увеличении скорости движения от 1,86 до 7,2 км/ч.

Снижение крюкового усилия благоприятно сказывается на силовой и динамической нагруженности трактора. Поэтому использование экспериментальных рабочих органов позволяет выполнять технологический процесс обработки почвы на более высоких скоростях. Рост рабочих скоростей движения позволяет увеличить производительность чизельного агрегата в целом. Расчетные графические зависимости производительности чизельного МТА на почвенных фонах различной влажности, представлены на рисунке 18.

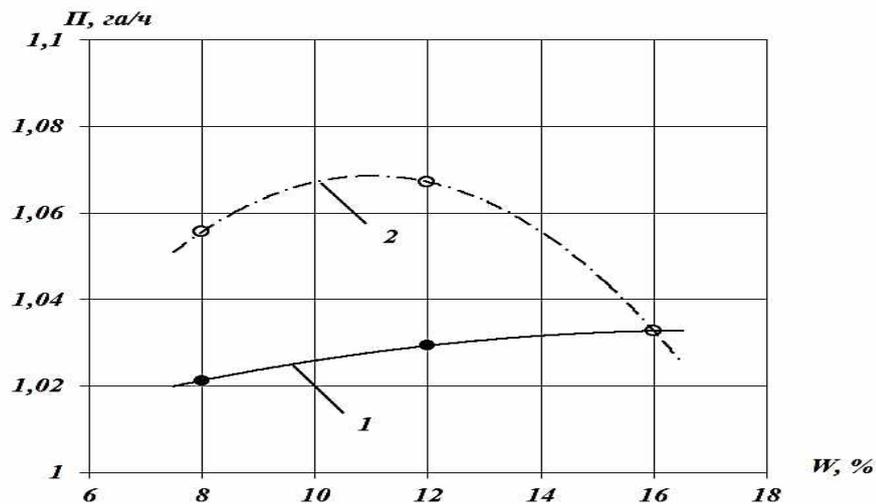


Рисунок 18 – Производительность чизельного агрегата в функции влажности почвенного фона: 1 – серийные рабочие органы; 2 – экспериментальные рабочие органы.

Анализ представленных зависимостей показывает, что в целом применение экспериментальных долот, на почвенных фонах влажностью до 14%, способствует увеличению производительности чизельного агрегата на 5-7% по сравнению с серийными рабочими органами. Таким образом, основные выводы, которые можно сделать по полученным данным:

1. Использование экспериментальных долот позволяет снизить среднее значение тягового сопротивления рабочей секции чизельного орудия, наибольший эффект наблюдается при скоростях движения до 4 км/ч. Снижение тягового сопротивления секции, на почвах влажностью 8-12%, составило: на скоростях до 4 км/ч – 12 %; на скоростях свыше 4 км/ч – 8%. Данный результат объясняется тем, что при скоростной почвообработке движущийся по рабочей поверхности пласт почвы из-за динамической составляющей не повторяет в полной мере профиль рабочего органа, что способствует уменьшению изгибных деформаций, которые связаны с растяжением почвенного пласта.

2. При использовании экспериментальных долот на почвах влажностью более 16% эффективность их применения несколько снижается. Данное явление можно объяснить тем, что при увеличении влажности почвы

происходит рост её липкости и связности, что приводит к некоторому налипанию частиц почвы на вогнутую часть долота и увеличивает коэффициент трения и, главное, уменьшает степень изгибных деформаций пласта.

3. Наиболее эффективными являются рабочие органы, форма поверхности которых получена образующей кривой, проходящей через реперные точки с координатами  $P1 (0;24)$ ,  $P2 (80;6)$ ,  $P3 (168;24)$ ,  $P4 (240;6)$ .

4. Общее снижение крюковой нагрузки трактора, при использовании экспериментальных рабочих органов, составило: 11% при работе на скоростях до 4км/ч; 8% при работе на скоростях 4-7 км/ч.

5. Использование экспериментальных долот на тяжелых почвенных фонах низкой влажностью способствует увеличению производительности чизельного агрегата на 5-7% по сравнению с серийными рабочими органами. Рост производительности агрегата достигается за счет увеличения рабочих скоростей движения.

**В пятом разделе** оценена экономическая эффективность использования модернизируемых рабочих органов. Расчеты по данному алгоритму показали, что применение чизельного плуга, оборудованного рабочими органами, поверхность которых получена методами параболической интерполяции, позволяет получить снижение эксплуатационных расходов на 149,7 рублей с одного гектара обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Долото воспринимает основную нагрузку по деформации пласта, геометрическая форма долота может быть в различном исполнении и определяет 80-95% энергетических затрат рабочего процесса чизелевания. Профиль рабочего органа чизельного орудия, обеспечивающий минимальное значение энергетических затрат процесса обработки, должен отвечать принципу взаимосвязи и взаимоперевода форм поверхностей: «вогнутый профиль при переходе через прямолинейную форму должен сменяться выпуклым профилем, и наоборот».

2. На основании исследования дифференциальных уравнений движения частицы почвы по поверхности рабочего органа получено уравнение траектории движения с наименьшими энергетическими затратами. Образующая кривая линия поверхности рабочего органа чизельного плуга получена путем сопряжения расчетных парабол при условии, что они проходят через реперные точки, принадлежащие поверхности рабочего органа. В качестве базовых реперных точек приняты: точка  $P1 (0;24)$ , находящаяся на верхней границе долота в левой её части; точка  $P2 (80;12)$ , находящаяся в зоне второго крепления долота к стойке орудия; точка  $P3 (168;24)$ , находящаяся на границе двух функциональных зон долота, рабочей зоны и зоны крепления; точка  $P4 (240;6)$ , находящаяся в носовой части долота. Указанные точки, в целом, определяют геометрическую область существования рабочего органа. На основании параболической интерполяции аналитически заданных параболических линий получены параметрические уравнения образующей кривой и поверхности моделируемого рабочего органа (*патент* RU 2792117 С1)

3. В процессе разработки программы экспериментальных исследований чизельного агрегата, оборудованного рабочими органами с улучшенными геометрическими характеристиками, предложено устройство для измерения горизонтального усилия от сельскохозяйственной машины, навешиваемой на трактор (*патент* RU 2776191 С1), а также способ и устройство для определения точки приложения равнодействующей продольной силы, действующей на рабочий орган почвообрабатывающей машины (*патент* RU 2801775 С1).

4. Использование экспериментальных долот позволяет снизить среднее значение тягового сопротивления рабочей секции чизельного орудия, наибольший эффект наблюдается при скоростях движения до 4 км/ч. Снижение тягового сопротивления секции, на почвах влажностью 8-12%, составило: на скоростях до 4 км/ч – 12 %; на скоростях свыше 4 км/ч – 8%. При использовании экспериментальных долот на почвенных фонах влажностью более 16% эффективность их применения несколько снижается. Данное явление можно объяснить тем, что при увеличении влажности почвы происходит рост её липкости и связности, что приводит к некоторому налипанию частиц почвы на вогнутую часть долота. В этом случае движение почвенного пласта происходит не только по сопряжению сталь - почва, а частично по сопряжению почва - почва, что увеличивает коэффициент трения, а, главное, уменьшается степень изгибных деформаций пласта. Общее уменьшение нагрузки на крюке, при использовании экспериментальных рабочих органов, составило: 11% при работе на скоростях до 4 км/ч; 8% при работе на скоростях 4-7 км/ч. Использование экспериментальных долот, на почвенных фонах влажностью до 14%, способствует увеличению производительности чизельного агрегата на 5-7% по сравнению с серийными рабочими органами.

5. Применение чизельного плуга, оборудованного рабочими органами, поверхность которых получена методом параболической интерполяции, позволяет получить снижение эксплуатационных расходов на 149,7 рублей с одного гектара обработки, при этом снижение энергетических затрат составляет 27,99 МДж/га.

**Рекомендации производству.** В сельскохозяйственных предприятиях Волгоградской области при обработке «тяжелых» почв низкой влажности для снижения эксплуатационных затрат рекомендуется применение чизельных орудий, оснащенных рабочими органами, поверхность которых получена методом параболической интерполяции (*патент* RU 2792117 С1).

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Необходимо исследовать процессы налипания частицами почвы почвообрабатывающих органов различных форм поверхностей на влажностях свыше 16%.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Швабауэр Ю. А., Субботин С. И., Гапич Д. С., Фомин С.Д. Моделирование поверхности рабочего органа чизельного плуга. Известия НВ АУК. – 2024. – № 1 (57). – С. 365-373. (0,61/0,35)
2. Губайдулин Д. С., Швабауэр Ю. А., Гапич Д. С., Фомин С.Д. Результаты экспериментальных исследований силовой нагруженности чизельного агрегата. Известия НВ АУК. – 2024. – № 1 (57). – С. 357-365. (0,62/0,35)

3. Гапич Д. С., **Швабауэр Ю. А.**, Субботин С. И., Губайдулин Д. С. Снижение тягового сопротивления чизельных орудий. Известия НВ АУК. – 2023. – № 4 (56). – С. 398-409. (0,73/0,5)
4. Фомин С. Д., Гапич Д. С., Субботин С. И., **Швабауэр Ю. А.** Тяговое сопротивление секции чизельного плуга с рабочими органами различной геометрической формы // Известия НВ АУК. – 2024. – № 2 (74). – С. 358-367. (0,73/0,2)
5. **Швабауэр Ю. А.**, Субботин С. И., Гапич Д. С., Фомин С. Д. Экспериментальная установка для исследования чизельного агрегата, оборудованного рабочими органами с улучшенными геометрическими характеристиками // Известия НВ АУК. – 2024. – № 2 (74). – С. 394-407. (0,85/0,68)

**- в патентах 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. (0,3/0,1)
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. (0,3/0,1)
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. (0,3/0,1)

**- в прочих изданиях:**

1. Проектирование профиля долота чизельного орудия Д.С. Гапич, Ю.А. **Швабауэр, С.И.** Субботин. В сборнике: Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации. материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 80-летию со дня основания ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. Волгоградский государственный аграрный университет. Волгоград, 2024. С. 164-170. (0,46/0,2)
2. Гапич Д. С., Гуйбадулин Д. С., **Швабауэр Ю. А.**, Субботин С. И. Тяговое сопротивление глубокорыхлителя Ecolo-Tiger 870 на различных кинематических режимах. Инновационные технологии в АПК в условиях цифровой трансформации: матер. Междунар. науч-практ. конф., посвящ. 80-летию победы в Сталинградской битве, г. Волгоград, 16-17 февраля 2023 г. – Волгоград: 2024. – Том IV. – 364 с. (0,44/0,11)
3. Оптимизация геометрии рабочего органа почвообрабатывающего орудия. Гапич Д.С., Гуйбадулин Д.С., **Швабауэр Ю.А.**, Субботин С.И. В сборнике: Инновационные технологии в АПК в условиях цифровой трансформации. Матер. Международной науч.-практ. конф.. Волгоград, 2023. С. 164-170. (0,42/0,11)
4. Черноусов П. С., Гуйбадулин Д. С., **Швабауэр Ю. А.**, Субботин С. И. Технологическая адаптация почвообрабатывающего орудия к зональным условиям эксплуатации. Научное обоснование стратегии цифрового развития АПК и сельских территорий: матер. Национ. науч.-практ. конф. г. Волгоград, 9 ноября 2022 г. – Волгоград- 2023. – Том III. – С. 416-421. (0,22/0,05)
5. Секция культиватора адаптивного принципа действия. Гапич Д.С., Головчанский С.М., **Швабауэр Ю.А.**, Субботин С.И. Научное обоснование стратегии развития АПК и сельских территорий в XXI веке. Матер. Национ. науч.-практ. конф. Волгоград, 2021. С. 9-12. (0,43/0,11)
6. Концептуальная модель секции почвообрабатывающего орудия адаптивного принципа действия. Гапич Д.С., Гуйбадулин Д.С., **Швабауэр Ю.А.**, Субботин С.И. В сборнике: Перспективные тенденции развития научных исследований по приоритетным направлениям модернизации АПК и сельских территорий в современных социально-экономических условиях. Матер. Национ. науч.-практ. конф. Волгоград, 2021. С. 404-409. (0,43/0,12)

В авторской редакции

Подписано в печать \_1\_0\_ Формат 60x84<sup>1/16</sup>.

Усл.-печ. л.1,0. Тираж 100. Заказ ..

ИПК ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ «Нива».

400002, Волгоград, пр. Университетский, 26.