

На правах рукописи



Коновалов Владимир Иванович

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ДИСКОВОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ
РАДИУСОМ КРИВИЗНЫ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2021

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

Научный руководитель: **Трубилин Евгений Иванович**
доктор технических наук, профессор.
Официальные оппоненты: **Камбулов Сергей Иванович**
доктор технических наук, доцент, ФГБНУ АНЦ «Донской», структурное подразделение «СКНИИМЭСХ», отдел механизации полеводства, главный научный сотрудник;
Несмиян Андрей Юрьевич
доктор технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ», кафедра «Технологии и средства механизации агропромышленного комплекса», доцент
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО Дагестанский ГАУ**
(г. Махачкала)

Защита состоится «25» февраля 2021 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина 13, корпус факультета механизации, ауд. 345.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» www.kubsau.ru и ВАК – <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор
Фролов Владимир Юрьевич



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из важнейших структурных элементов любой технологии возделывания сельскохозяйственной культуры является обработка почвы, на долю которой приходится до 30 % от общих затрат энергии при возделывании сельскохозяйственных культур, поэтому разработка новых и совершенствование уже существующих конструктивных решений является актуальной задачей. Процесс обработки почвы направлен на создания такой ее структуры, чтобы условия роста и развития культурных растений были наиболее благоприятными. Обработку почвы в Краснодарском крае проводят различными сельскохозяйственными машинами и орудиями, среди которых можно выделить дисковые орудия, поскольку на них приходится до 35% от общего объема технологических операций по обработке почвы в различных технологиях возделывания.

Обработка почвы дисковыми ротационными орудиями производится при ее лушении и дисковании, при этом задачи указанных технологических операций имеют различный характер. Зачастую приходится вместо операции лушения стерни производить ее дискование. Почвообрабатывающие орудия для дискования почвы можно использовать для лушения только в случае достаточной степени крошения пласта и его перемешивания с почвой. Поэтому повышение степени крошения рабочими органами дисковых борон, а также снижение энергоемкости процесса является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Теоретическими и экспериментальными исследованиями процесса взаимодействия дисковых рабочих органов с почвой занимались множество отечественных и зарубежных ученых, к числу которых можно отнести Горячкина В. П., Панова И. М., Синеокова Г. Н., Канарева Ф. М., Нартова П. С., Бледных В. В., Трубилина Е. И., Vox G. E. P., Clyde A. W., Gordon E. D., Nerli N., Taylor P. A. и других.

Полученные ими результаты позволяют сделать вывод, что для увеличения степени крошения почвы необходимо повысить интенсивность ее деформации за счет концентрации напряжений в пласте. Концентрацию напряжений сжатия можно получить путем придания

пласту определенной траектории движения по поверхности рабочего органа. Однако существующие теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия сферического диска и почвой не позволяют дать описание этого процесса для рабочих органов с другими формами и кинематическими параметрами.

Рабочая гипотеза – повысить качество и снизить энергоемкость обработки почвы возможно за счет повышения концентрации напряжений возникающих в пласте при его движении вдоль рабочей поверхности диска, а также приданию ему определенной траектории движения.

Цель работы – обоснование конструктивных параметров и режимов работы дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны для повышения качества и снижения удельной энергоемкости технологического процесса обработки почвы.

Задачи исследований.

1. Провести конструктивно-технологический анализ почвообрабатывающих машин с дисковыми рабочими органами и определить перспективные направления их совершенствования.

2. Обосновать внутренние взаимосвязи конструктивных параметров дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны.

3. Получить теоретические зависимости для определения координат, скорости и ускорения произвольной точки дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны.

4. Получить функциональные зависимости для определения координат точек пересечения соседних дисковых рабочих органов, площади поперечного сечения обрабатываемого пласта, приходящийся на отдельно взятый рабочий орган и его тягового сопротивления при различных схемах ориентации, конструктивных и режимных параметров.

5. Разработать программу и методику экспериментальных исследований удельной энергоемкости обработки почвы дисковым рабочим органом с изменяющимся радиусом кривизны.

6. Экспериментально подтвердить теоретически полученные конструктивные параметры и режимы работы дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны.

7. Определить экономическую эффективность обработки почвы дисковыми рабочими органами с изменяющимся радиусом кривизны.

Объект исследования – процесс взаимодействия дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны с почвой.

Предмет исследования – закономерности влияния конструктивных параметров и режимов работы дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны на его качественные показатели и удельную энергоемкость обработки почвы.

Научную новизну работы составляют:

– функциональные зависимости внутренних взаимосвязей конструктивных параметров дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны: величины максимального и минимального радиусов кривизны, радиуса диска, угла между горизонталью и отрезком, соединяющим минимальный и максимальный радиусы кривизны, а также величины смещения произвольной точки при его повороте;

– теоретические зависимости для определения координат, скорости и ускорения произвольной точки дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны;

– функциональные зависимости для определения координат точек пересечения соседних дисковых рабочих органов, площади поперечного сечения обрабатываемого пласта, приходящийся на отдельно взятый рабочий орган и его тягового сопротивления при различных схемах ориентации, конструктивных и режимных параметров;

– уравнение регрессии удельной энергоемкости обработки почвы дисковыми рабочими органами с изменяющимся радиусом кривизны

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные зависимости для определения координат точек пересечения соседних дисковых рабочих органов и величины площади поперечного сечения пласта почвы, приходящиеся на отдельно взятый рабочий орган с учетом его перекрытия соседними дисками при различных схемах их ориентации, конструктивных и режимных параметрах могут быть использованы при выполнении исследований в области сни-

жения энергоемкости и повышения качества работы дисковых почвообрабатывающих рабочих органов.

Практическая значимость работы:

– разработана расширенная классификация дисковых борон, позволяющая наиболее полно структурировать их по технологическим и конструктивным признакам;

– получены интервалы расстояний между соседними дисковыми рабочими органами для соблюдения допустимой величины гребнистости дна борозды при различных схемах ориентации, которые рекомендуется использовать при эксплуатации дисковых почвообрабатывающих орудий;

– получены рекомендуемые диапазоны конструктивных параметров и режимов работы дисковых рабочих органов с изменяющимся радиусом кривизны, использование которых позволит повысить качество и снизить удельную энергоемкость обработки почвы.

Техническая новизна предложенного конструктивного решения подтверждена патентами РФ №152563 и №138453 на полезную модель.

Методы исследования. Исследование проводилось с использованием методов анализа, синтеза и восхождения от абстрактного к конкретному. Теоретические исследования базировались на основных положениях математики и теоретической механики. Экспериментальные исследования проводились на основе методов планирования многофакторных экспериментов, математической статистике и оптимизации.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований внедрены в учебно-опытном хозяйстве «Кубань» Кубанского ГАУ (г. Краснодар), и в КФХ «Горбуново» (Краснодарский край, Кавказский район), а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

– математические взаимосвязи конструктивных параметров дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны;

– теоретические зависимости для определения координат, скорости и ускорения произвольной точки дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны;

– функциональные зависимости для определения координат точек пересечения соседних дисковых рабочих органов, площади поперечного сечения обрабатываемого пласта, приходящийся на отдельно взятый рабочий орган и его тягового сопротивления при различных схемах ориентации, конструктивных и режимных параметров;

– уравнение регрессии удельной энергоемкости обработки почвы дисковыми рабочими органами с изменяющимся радиусом кривизны;

– результаты сопоставления теоретических и экспериментальных исследований конструктивных параметров и режимов работы дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны.

Степень достоверности результатов исследований.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением фундаментальных основ теоретической механики, а также использованием общеизвестных методик проведения экспериментальных исследований. Достоверность экспериментальных исследований подтверждается воспроизводимостью результатов при их рандомизированном дублировании. Сходимость теоретических и экспериментальных данных подтверждается низкой относительной ошибкой в пределах не более 5% при уровне значимости 0,95. Полученные в ходе выполнения исследований результаты качественно совпадают с результатами, представленными в независимых источниках. Обработка результатов исследований проводилась с использованием программного обеспечения *Math Cad* и *MS Excel*.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на Всероссийских конференциях молодых ученых в 2016–2017 г. (г. Краснодар), Международной научно-практической конференции, в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016» (г. Ставрополь), 12-ой Международной научной конференции по сельскохозяйственному машиностроению «ИНТЕРАГРМАШ-2019» (г. Ростов-на-Дону), научных

конференциях факультета механизации КубГАУ в 2016–2018 г. (г. Краснодар).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 19 научных работ, из них 10 в изданиях из перечня ВАК РФ, получены 2 патента РФ на полезную модель, 1 публикация в журнале Scopus.

Общий объем публикаций составляет 17,7 печатных листа, из них личный вклад автора 5,6 печатных листа

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, включает в себя 60 рисунков и 17 таблиц. Список литературы насчитывает 104 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлена значимость обработки почвы как важнейшего структурного элемента любой технологии возделывания сельскохозяйственной культуры. Указано ее существенное влияние на большую часть физико-механических свойств почвы, а также на ее структуру и состояние. Исходя из предъявляемых требований, можно сделать заключение, что лушение почвы должно приводить к более интенсивному крошению почвы и ее перемешиванию с пожнивными остатками по сравнению с дискованием.

При выполнении конструктивно-технологического анализа выявлено, что при работе в тяжелых почвенно-климатических условиях дисковые бороны имеют высокую энергоемкость, а степень крошения почвы за один проход агрегата не соответствует агротехническим требованиям. Разработана расширенная классификация дисковых орудий, которая включает в себя уже существующие признаки, а также признаки, позволяющие наиболее полно структурировать их по технологическим и конструктивным особенностям.

С целью определения перспективных направлений совершенствования дисков был проведен анализ патентной информации, на основании которого можно выделить следующие основные пути повышения степени крошения пласта: изменение траектории движения почвенного пласта и предание ему большей скорости; повышение удельного давления на пласт; повышения интенсивности резания пласта; создание на рабочих органах вибрации.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями дисковых рабочих органов занимались множество отечественных и зарубежных ученых, к числу которых можно отнести Горячкина В. П., Синеокова Г. Н., Канарева Ф. М., Нартова П. С., Трубилина Е. И., Taylor P. A. и др. Однако существующие теоретические исследования рассматривают процесс взаимодействия только сферического диска с почвой и не позволяют дать описание этого процесса для рабочих органов с другими формами и кинематическими параметрами.

На основании проведенного анализа предложена конструктивно-технологическая схема дискового рабочего органа, выполненного с изменяющимся радиусом кривизны. В соответствии с вышеизложенным сформулированы проблемная ситуация, цель и задачи исследований.

Во **второй главе** обоснована взаимосвязь конструктивных параметров дискового рабочего органа (рисунок 1) с изменяющимся радиусом кривизны: величины максимального ρ_{max} и минимального ρ_{min} радиусов кривизны, радиуса диска R и угла ψ_4 между горизонталью и отрезком, соединяющим минимальный и максимальный радиусы, а также смещения k произвольной точки по лучу при его повороте, которые определяются соответствующими выражениями:

$$\psi_4 = \arccos \sqrt{\frac{R^2}{\rho_{max}^2 + \rho_{min}^2 + 2\rho_{max}\rho_{min} \cos(\arcsin(\frac{b}{\rho_{max}}) + \arccos(\frac{R - \rho_{max} \cos \psi_1}{\rho_{min}}))}}, \quad (1)$$

$$k = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{\arccos(\frac{(\rho_{max}^2 + \rho_{min}^2) \cos^2 \psi_4 - R^2}{2\rho_{max}\rho_{min} \cos^2 \psi_4})}. \quad (2)$$

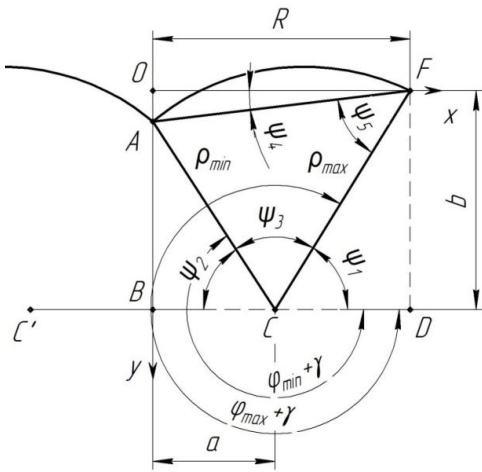


Рисунок 1 – Схема к определению параметров спирали

Для определения искомых параметров использовали схему, показанную на рисунке 2. Изначально фиксировали положение произвольной точки M на рабочей поверхности диска, используя различную величину угла поворота φ_i , которая будет изменяться от φ_{min} до φ_{max} , и соответствующий радиус кривизны ρ_i . Тогда величина проекций произвольной точки относительно начала отсчета будет определяться выражениями и обозначениями:

где ψ_1 – величина угла между осью OX и максимальным радиусом кривизны; b – смещение начала спирали по оси OY .

Процесс взаимодействия дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны с почвой, прежде всего, характеризуется траекторией движения, скоростью и ускорением его произвольной точки.

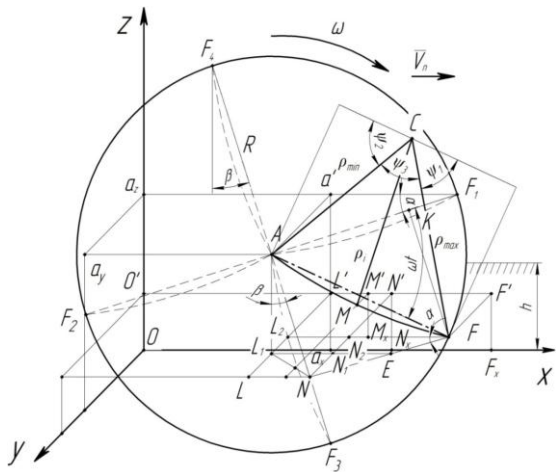


Рисунок 2 – Схема для определения траектории произвольной точки рабочей поверхности дискового рабочего органа

$$\rho_{\min} \sin \psi_2 - k \varphi_i \sin(\psi_2 + \varphi_i - \varphi_{\min}) = A_1, \quad (3)$$

$$\rho_{\min} \cos \psi_2 - k \varphi_i \cos(\psi_2 + \varphi_i - \varphi_{\min}) = B_1. \quad (4)$$

где ψ_2 – величина угла между осью OX и минимальным радиусом кривизны; φ_i – угол поворота спирали для образования радиуса кривизны ρ_i произвольной точки.

При этом координаты, абсолютная скорость и ускорение произвольной точки будут описываться соответствующими выражениями:

$$x = V_n t + B_1 \cos \alpha \cos \omega t + B_1 \sin \alpha \sin \beta \sin \omega t + A_1 \sin \alpha \cos \beta, \quad (5)$$

$$y = B_1 \cos \alpha \sin \beta \sin \omega t - B_1 \sin \alpha \cos \omega t + A_1 \cos \alpha \cos \beta + \frac{R \sin(\alpha + \psi_4)}{\cos \psi_4}, \quad (6)$$

$$z = A_1 \sin \beta - B_1 \cos \beta \sin \omega t + R \cos \beta, \quad (7)$$

$$V_M = \sqrt{V_n^2 + B_1^2 \omega^2 + 2V_n B_1 \omega (\sin \alpha \sin \beta \cos \omega t - \cos \alpha \sin \omega t)}, \quad (8)$$

$$a_M = B_1 \omega^2. \quad (9)$$

где x, y, z – координаты произвольной точки; V_n – поступательная скорость диска; α – угол атаки диска; β – угол наклона оси вращения диска к горизонту; ω – угловая скорость вращения диска; V_M – абсолютная скорость произвольной точки диска; a_M – абсолютное ускорение произвольной точки диска.

В самом общем случае на дисковой бороне взаимная ориентация рабочих органов может быть в одном направлении, в свал и развал. При различных схемах ориентации дисков будут различные показатели их работы, и в первую очередь, гребнистость дна борозды, которая будет зависеть от расстояния между соседними дисками и характеризоваться координатой нижней точки пересечения, определяемой выражением:

$$b = R_1 \sin \alpha_1 \sqrt{\frac{2zR_1 \cos \beta_1 - z^2}{R_1^2 \cos^2 \beta_1}} + R_2 \sin \alpha_2 \sqrt{\frac{2zR_2 \cos \beta_2 - z^2}{R_2^2 \cos^2 \beta_2}} + zC_2 + A_2 - B_2. \quad (10)$$

где b – расстояние между соседними дисками вдоль оси OY , м; R_1 и R_2 – радиусы дисков, м; α_1 и α_2 – углы атаки дисков, град; β_1 и β_2 – углы установки дисков к вертикали, град; ω_1 и ω_2 – угловые скорости

сти режущих кромок дисков, c^{-1} ; z – координата точки пересечения соседних дисков;

$$A_2 = R_1(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \sin \beta_1), \quad (11)$$

$$B_2 = R_2(\sin \alpha_2 + \cos \alpha_2 \sin \beta_2), \quad (12)$$

$$C_2 = \operatorname{tg} \beta_2 \cos \alpha_2 - \operatorname{tg} \beta_1 \cos \alpha_1. \quad (13)$$

Выражение 10 позволяет определить высоту расположения над дном борозды точки пересечения соседних дисков при их различных параметрах и расстоянии между ними, или же задаваясь агротехническим допуском рассчитать необходимое расстояние между соседними дисками для соблюдения гребнистости. Для случая, когда $R_1 = R_2 = R$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, $|\beta_1| = |\beta_2| = |\beta|$ координаты точек пересечения соседних дисков будут определяться по выражениям:

$$z_{1,2}^o = (R \pm \sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4 \sin^2 \alpha}}) \cos \beta, \quad (14)$$

$$z_{1,2}^p = \frac{A_3 + \cos \alpha \cos \beta \sin \beta (2R \cos \alpha \sin \beta + b) \pm B_3}{C_3}, \quad (15)$$

$$z_{1,2}^c = \frac{A_3 + \cos \alpha \cos \beta \sin \beta (2R \cos \alpha \sin \beta - b) \pm B_3}{C_3}. \quad (16)$$

где $z_{1,2}^o$, $z_{1,2}^p$, $z_{1,2}^c$ – координаты точек пересечения соседних эллипсов вдоль оси OZ при их ориентации соответственно одинаковой, «в развал» и «в свал»;

$$A_3 = 2R \sin^2 \alpha \cos \beta; \quad (17)$$

$$B_3 = \sin \alpha \cos \beta \sqrt{4R^2 \cos^2 \alpha (\cos^2 \beta + 2 \sin^2 \beta) + 4R^2 (1 - 2 \cos^2 \alpha) - b^2}; \quad (18)$$

$$C_3 = 2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta + 2 \sin^2 \alpha. \quad (19)$$

Поскольку гребнистость дна борозды будет определяться только нижней точкой пересечения, то в выражениях 11–13 последний член необходимо брать со знаком минус.

Для определения площади поперечного сечения пласта проходящегося на один диск (Рисунок 3) при различной ориентации рабочих органов определяли площадь фигуры $ANFCE$, которая будет определяться выражениями:

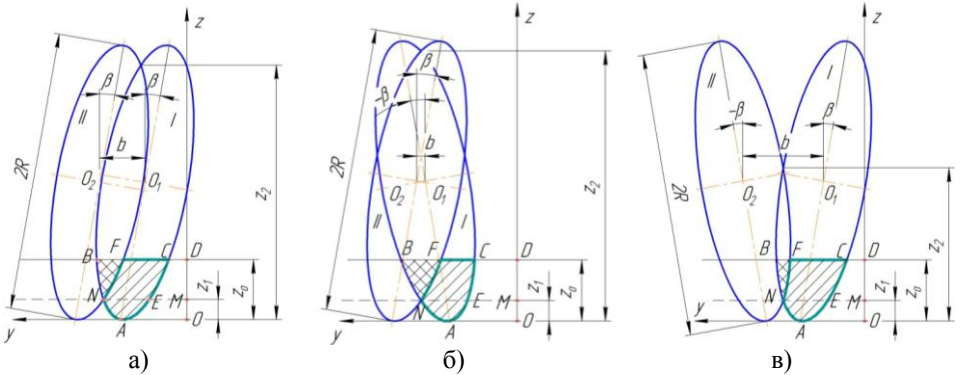


Рисунок 3 – Схема для определения площади поперечного сечения пласта, приходящиеся на один диск при одинаковой (а) ориентации соседних рабочих органов, при ориентации «в развал» (б) и «в свал» (в)

При одинаковой ориентации:

$$S_{ANFCE}^o = b(z_0 - z_1^o) + R^2 \sin \alpha \cos \beta \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin A_5 + A_5 \sqrt{1 - A_5^2} \right). \quad (20)$$

При ориентации «в развал»:

$$S_{ANFCE}^p = (b + 2R \cos \alpha \sin \beta)(z_0 - z_1^p) + \cos \alpha \operatorname{tg} \beta (z_1^{p2} - z^2) + R^2 \sin \alpha \cos \beta \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin A_6 + A_6 \sqrt{1 - A_6^2} \right). \quad (21)$$

При ориентации «в свал»:

$$S_{ANFCE}^c = (b - 2R \cos \alpha \sin \beta)(z_0 - z_1^c) + \cos \alpha \operatorname{tg} \beta (z^2 - z_1^{c2}) + R^2 \sin \alpha \cos \beta \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin A_7 + A_7 \sqrt{1 - A_7^2} \right). \quad (22)$$

где

$$A_5 = \frac{z_1^o}{R \cos \beta} - 1; \quad (23)$$

$$A_6 = \frac{z_1^p}{R \cos \beta} - 1; \quad (24)$$

$$A_7 = \frac{z_1^c}{R \cos \beta} - 1. \quad (25)$$

Тогда с учетом выражений 23–25 тяговое сопротивление в зависимости от ориентации рабочих органов будет определяться по выражениям:

$$R_{\text{д.б.}}^o = k_3 S_{\text{ANFCE}}^o, \quad (26)$$

$$R_{\text{д.б.}}^p = k_3 S_{\text{ANFCE}}^p, \quad (27)$$

$$R_{\text{д.б.}}^c = k_3 S_{\text{ANFCE}}^c. \quad (28)$$

где $R_{\text{д.б.}}^o$, $R_{\text{д.б.}}^p$, $R_{\text{д.б.}}^c$ – тяговое сопротивление диска соответственно при одинаковой ориентации, «в развал» и «в свал», Н; k_3 – удельная энергоёмкость обработки почвы, Н/м².

Используя различные комбинации выражений 26–28, а также величину перекрытия при различной ориентации рабочих органов, определяемых по выражениям 20–22 можно определить тяговое сопротивление дисковой борона с любым расположением рабочих органов. Для 4-х рядной дисковой борона при схеме ориентации одинаковое – «в развал» – одинаковое – «в свал» увеличение угла атаки от $\alpha = 10^\circ$ до $\alpha = 25^\circ$ приводит к повышению общего тягового сопротивления в среднем на 230 Н, а увеличение угла наклона диска к вертикали от $\beta = 0^\circ$ до $\beta = 20^\circ$ к его снижению в среднем на 30 Н.

В третьей главе представлены программа и методика проведения экспериментальных исследований. В качестве параметра оптимизации приняли удельную энергоёмкость процесса обработки почвы, а агротехнические параметры использовали в качестве ограничивающего параметра.

Выбор наиболее значимых факторов проводили в три этапа. На первом этапе проверяли соответствие их основным требованиям, предъявляемым при проведении активного эксперимента. На втором этапе использовали анализ априорной информации и результаты научных исследований. Дальнейших процесс отсеивания факторов проводили с использованием метода экспертных оценок. Оценку согласованности мнений экспертов проверяли с помощью коэффициента конкордации, который оказался равен 0,73, а в качестве независимых факторов выбраны x_1 – угол атаки, x_2 – поступа-

тельная скорость движения; α_3 – угол установки диска к вертикали; α_4 – интенсивность изменения кривизны рабочей поверхности. В качестве плана эксперимента выбран план Бокса-Бенкина. Для расстановки рабочих органов для 4-х рядной дисковой бороны приняли схему одинаковое – «в развал» – одинаковое – «в свал».

Изготовление опытных дисковых рабочих органов с изменяющимся радиусом кривизны проводили в специально изготовленной пресс-форме (рисунок 4). Для установления требуемого угла атаки и угла установки диска к вертикали была спроектирована стойка рабочего органа с индивидуальным креплением к раме, а также с изменением требуемых углов (рисунок 5).



Рисунок 4 – Внешний вид пресс-формы для изготовления дисковых рабочих органов с изменяющимся радиусом кривизны



Рисунок 5 – Внешний вид стойки, подшипникового узла и опытного рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны

Установку изготовленных рабочих органов для проведения полевого эксперимента проводили на стандартную раму прицепной дисковой бороны БДМ-4×4П после демонтажа стандартных режущих узлов. Агрегатировалась борона с трактором Т-150К.

Полевой эксперимент по определению удельной энергоёмкости обработки почвы дисковыми рабочими органами с изменяющимся радиусом кривизны, а также агротехнических показателей проводился на территории УОХ «Кубань» ФГБОУ ВО Кубанского ГАУ при дисковании стерни озимой пшеницы на тяжелосуглинистом, не каменистом, выщелочном черноземе в соответствии с действующими ГОСТ-ми и рекомендациями. Определение удельной энергоёмкости E процесса обработки почвы дисковыми рабочими органами с изменяющимся радиусом кривизны проводилось косвенным путем. Определение величины тягового сопротивления производилось при помощи тензозвена, которое присоединялось к согласующему устройству МС-5, и измерительной информационной системой ИП-264.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований работы дисковых рабочих органов с изменяющимся радиусом кривизны, на основании которых сделан вывод, что условия проведения эксперимента соответствуют условиям эксплуатации машин аналогичного назначения. При этом средние значения степени крошения почвы для опытных и сферических дисков составляют $K_{cp}^u = 85,7\%$ и $K_{cp}^c = 78,4\%$, стандартные отклонения $\sigma^u = 3,1\%$ и $\sigma^c = 4,4\%$, а коэффициенты вариации $V^u = 0,036\%$ и $V^c = 0,056\%$ соответственно, что позволяет сделать вывод о большей равномерности степени крошения почвы при работе дисковых рабочих органов с изменяющимся радиусом кривизны, а интенсивность крошения почвы увеличивается от 5% до 12%. Доверительный интервал для исследуемых выборок составляет $t_{\alpha\sigma\delta} = 3,9331$ при разнице между средними 7,28%. Также проводились исследования степени заделки пожнивных остатков, минимальная величина которой составила 60%, а максимальная 68%. Подрезание сорной растительности составило 100%, а стандартное отклонение глубины обработки соответствовало агротехническим требованиям.

По результатам экспериментальных исследований получено уравнение регрессии, которое в нормализованном виде будет определяться соответствующим выражением:

$$y = 708,889 - 19,138x_1 + 33,2233x_2 - 10,723x_3 + 31,1942x_4 - 55,915x_1x_2 + \\ + 57,835x_1x_3 - 23,165x_1x_4 + 14,2525x_2x_3 + 19,4975x_2x_4 - 47,92x_3x_4 - \\ - 17,473x_1^2 + 19,1522x_2^2 - 35,432x_3^2 + 18,446x_4^2, \quad (20)$$

где y – удельная энергоёмкость; x_1 – угол атаки α , x_2 – поступательная скорость движения V ; x_3 – угол установки диска к вертикали β ; x_4 – интенсивность изменения кривизны рабочей поверхности $\Delta\varphi$.

Проверка полученных в результате проведения эксперимента данных по критерию Стьюдента позволяет сделать вывод об отсутствии грубых ошибок при его проведении. Однородность дисперсий полученных выборок подтверждается расчетным значением критерия Кохрена $G_3 = 0,1001$, которое меньше табличного $G_T = 0,2167$. Величина дисперсии воспроизводимости эксперимента $\sigma_y^2 = 180,33$. Расчетное значение критерия Фишера $F_p = 1,132$, при табличном $F_T = 2,2$. Для полученного уравнения регрессии точка экстремума в факторном пространстве в нормализованном виде имеет следующие координаты: $x_1 = 0,3914$, $x_2 = -0,295$; $x_3 = 0,2177$; $x_4 = -0,161$. При проведении анализа полученное уравнение регрессии преобразовывали до типовой канонической формы, которое после преобразования будет иметь вид:

$$Y - 696.564 = -17,473x_1^2 + 20,067x_2^2 - 36,347x_3^2 - 28x_4^2, \quad (21)$$

Исследования степени влияния независимых факторов на критерий оптимизации проводили с помощью поверхностей откликов и их двухмерных сечений, которые представлены на рисунках 6-11.

Полученные данные позволяют сформировать следующие рекомендуемые диапазоны: для угла атаки $\alpha \in [15,5:18,8]$ град, для поступательной скорости движения $V \in [7,4:13,3]$ км/ч, для угла установки диска к вертикали $\beta \in [5,4:12,2]$ град, для интенсивности изменения кривизны $\Delta\varphi \in [425:1020]$ мм/об.

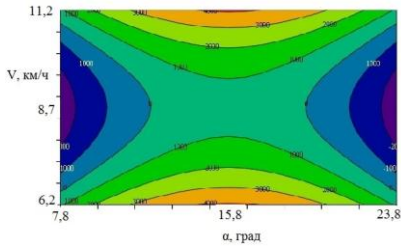


Рисунок 6 – Сечение поверхности удельной энергоёмкости обработки почвы от угла атаки α и поступательной скорости движения V

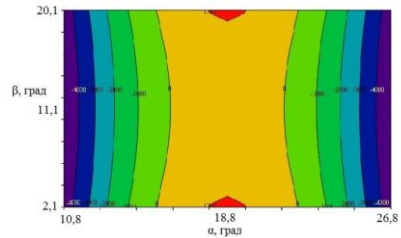


Рисунок 7 – Сечение поверхности удельной энергоёмкости обработки почвы от угла атаки α и угла наклона к вертикали β

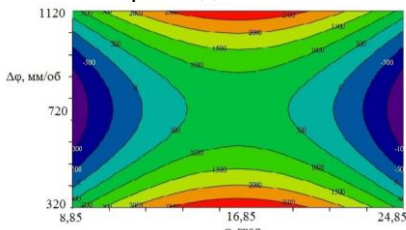


Рисунок 8 – Сечение поверхности удельной энергоёмкости обработки почвы от угла атаки α и интенсивности изменения кривизны $\Delta\varphi$

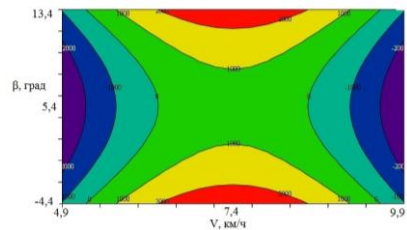


Рисунок 9 – Сечение поверхности удельной энергоёмкости обработки почвы от поступательной скорости движения V и угла наклона к вертикали β

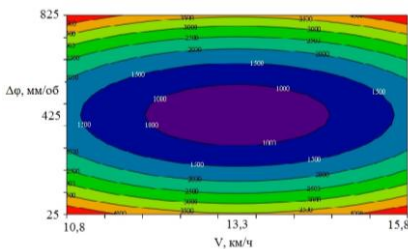


Рисунок 10 – Сечение поверхности удельной энергоёмкости обработки почвы от поступательной скорости движения V и интенсивности изменения кривизны $\Delta\varphi$

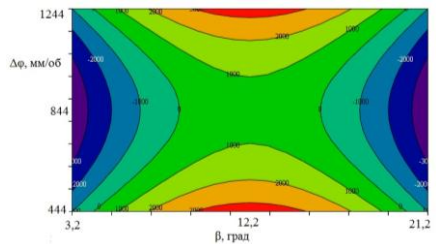


Рисунок 11 – Сечение поверхности удельной энергоёмкости обработки почвы от угла наклона к вертикали β и интенсивности изменения кривизны $\Delta\varphi$

В процессе проведения эксперимента проводилось исследование величины площади поперечного сечения обрабатываемого пласта при изменении угла атаки α и угла наклона к вертикали β диска.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований и их сравнение представлены на рисунке 12.

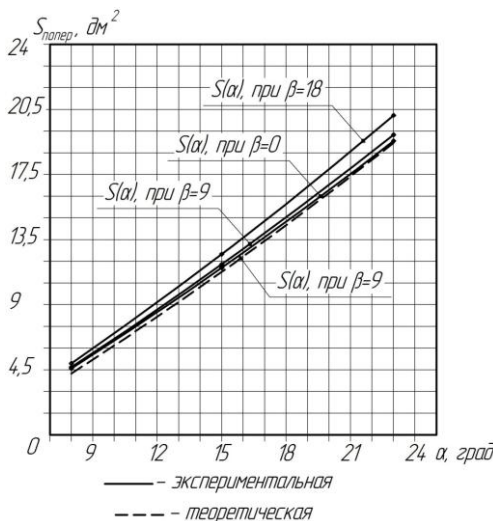


Рисунок 12 – Результаты исследований величины площади поперечного сечения пласта при условии соблюдения величины гребнистости дна борозды

Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать вывод об их согласованности. Относительная ошибка в полученных результатах не более чем 5 %.

На основании полученных результатов экспериментальных исследований удельная энергоёмкость обработки почвы при работе дисковой бороны БДМ-4×4П со сферическими дисками составляет $E_c = 68,2 \text{ кДж/м}^3$, а дисковыми рабочими органами с изменяющимся ра-

диусом кривизны при условии соблюдения высоты гребнистости дна борозды $E_э = 62,34 \text{ кДж/м}^3$, т. е. на 9,4 % меньше.

При определении экономической эффективности обработки почвы дисковыми рабочими органами с изменяющимися радиусами кривизны в качестве базовой машины для сравнения принимали агрегат Т-150К+БДМ-4×4П со стандартными сферическими дисками. Полученные результаты свидетельствуют, что при обработке почвы дисковыми рабочими органами с изменяющимся радиусом кривизны совокупные затраты денежных средств снижаются на 82 руб./га., что позволяет получить годовой экономический эффект в размере 48 тыс. руб. на один агрегат Т-150К+БДМ-4×4 при его нормативной загрузке. При этом дополнительные капиталовложения в размере 97 тыс. руб. окупятся за 2 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. В результате конструктивно-технологического анализа почвообрабатывающих машин с дисковыми рабочими органами установлено, что наиболее перспективным направлением совершенствования дисковых орудий для обработки почвы является повышение степени крошения и равномерности перемешивания почвы и пожнивных остатков рабочими органами, а также снижение энергоемкости процесса, которое можно добиться путем повышения концентрации напряжений возникающих в пласте при его движении вдоль рабочей поверхности диска, а также приданию ему новой траектории движения, которая обеспечит снижение возникающих динамических сопротивлений.

2. Получены выражения, позволяющие обосновать взаимосвязи величины максимального ρ_{max} и минимального ρ_{min} радиусов кривизны, радиуса диска R и угла ψ_4 между горизонталью и отрезком, соединяющим минимальный и максимальный радиусы, а также величины смещения k произвольной точки по лучу при его повороте. При радиусе диска $R \in [210; 300]$ мм, величина угла между горизонталью и отрезком, соединяющим минимальный и максимальный радиусы кривизны, лежит в интервале $\psi_4 \in [6; 15]$ град, величина смещения произвольной точки по лучу в интервале $k \in [180; 100]$ мм/об, при $\Delta\rho \in [60; 100]$ мм.

3. Получены теоретические зависимости для определения координат, скорости и ускорения произвольной точки дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны. Для диска $R = 280$ мм рациональные конструктивные параметры и режимы работы находятся в интервалах: угол атаки $\alpha > 15^\circ$, скорость движения орудия $V_n < 14$ км/ч, при угле наклона диска к вертикали $\beta > 10^\circ$, интенсивность изменения кривизны рабочей поверхности должна быть $\Delta\varphi > 800$ мм/об.

4. Получена функциональная зависимость для определения координат точек пересечения соседних дисковых рабочих органов при

различных схемах ориентации, конструктивных и режимных параметров. При допустимой величине гребнистости дна борозды равной $h_2 = 40$ мм и $h_2 = 50$ мм, радиусе дисков $R = 280$ мм, углах атаки $\alpha = 20^\circ$ и углах наклона дисков к вертикали $\beta = 10^\circ$ в случае одинаковой ориентации расстояние между соседними дисками должно быть $b_{40} < 70$ мм и $b_{50} < 80$ мм, для ориентации «в развал» – $b_{40} < 20$ мм и $b_{50} < 50$ мм, а для ориентации «в свал» – $b_{40} < 175$ мм и $b_{50} < 185$ мм соответственно.

5. Получены функциональные зависимости, определяющие величину площади поперечного сечения пласта почвы, приходящиеся на отдельно взятый рабочий орган и его тяговое сопротивление при различных схемах ориентации соседних дисков, конструктивных и режимных параметров. Для 4-х рядной дисковой бороны при схеме ориентации дисков: одинаковое – «в развал» – одинаковое – «в свал», увеличение угла атаки от $\alpha = 10^\circ$ до $\alpha = 25^\circ$ приводит к повышению общего тягового сопротивления в среднем на 230 Н, а увеличение угла наклона диска к вертикали от $\beta = 0^\circ$ до $\beta = 20^\circ$ приводит к его снижению в среднем на 30 Н.

6. Разработана программа и методика экспериментальных исследований, которая позволяет при условии соблюдения максимальной величины гребнистости дна борозды исследовать агротехнические показатели работы дисковых рабочих органов с изменяющимся радиусом кривизны, а также косвенным путем определить удельную энергоёмкость через среднеарифметическое значение частного от измеренного фактического тягового сопротивления агрегата и площади поперечного сечения обрабатываемого пласта.

7. По результатам проведенных экспериментальных исследований получено адекватное уравнение регрессии удельной энергоёмкости обработки почвы дисковыми рабочими органами с изменяющимся радиусом кривизны, на основании анализа которой, определено, что для данных почвенно-климатических условий при угле атаки $\alpha = 18,1$ град, поступательной скорости движения $V = 9,76$ км/ч, угле наклона диска к вертикали $\beta = 11$ град и интенсивности изменения кривизны $\Delta\varphi = 935,6$ мм/об, удельная энергоёмкость обработки почвы составит

$E_s = 62,34 \text{ кДж/м}^3$, что на 9,4 % меньше чем при работе сферических дисков в тех же условиях. При этом степень крошения почвы составит $K = 85,7 \%$, что на 7,3 % выше при работе стандартных сферических дисков. Относительная ошибка результатов экспериментальных исследований величины поперченной площади обрабатываемого пласта составляет не более 5 % от полученных в ходе теоретических исследований.

8. Рассчитанные показатели экономической эффективности обработки почвы позволяют сделать вывод, что при работе с дисковыми рабочими органами с изменяющимся радиусом кривизны совокупные затраты денежных средств снижаются на 82 руб./га, дополнительные капиталовложения окупаются за 2 года, а верхний предел цены новой техники повысится по сравнению с базовой.

Основные положения диссертационной работы опубликованы:

– в изданиях, индексируемых в *Scopus*:

1. Konovalov V. Analytical study of the design parameters of the grinding unit of disk harrows / V. Konovalov, S. Konovalov, V. Igumnova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – P. 403.

– в изданиях, рекомендованных *ВАК*:

2. Коновалов В. И. Повышение технологической надежности дисковых борон и луцильников / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 6. – С. 12–15.

3. Коновалов В. И. Заглубляющая способность дисковых борон и луцильников / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, В. В. Кравченко // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 11. – С. 31–34.

4. Коновалов В. И. Рабочие органы дисковых борон и луцильников / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, О. В. Данюкова // Политематический сетевой электронный научный

журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – 2013. – № 91. – С. 752–771.

5. Коновалов В. И. Ротационные дисковые рабочие органы – как базовый элемент в комбинированных агрегатах для обработки почвы и посева / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, О. В. Данюкова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – 2013. – № 91. – С. 465–497.

6. Коновалов В. И. Дисковые бороны и лушительники в системе основной и предпосевной обработки почвы. Проблемы и пути их решения / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, С. В. Белоусов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – 2013. – № 88. – С. 662–671.

7. Коновалов В. И. Повышение технологической эффективности дисковых борон / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов // Сельский механизатор. – 2013 – № 3. – С. 8–9.

8. Коновалов В. И. Заглубляющая способность дисковых борон и лушительников / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, В. В. Кравченко // Сельский механизатор. – 2013 – № 11. – С. 14–15.

9. Коновалов В. И. Равновесие дисковых борон и лушительников в горизонтальной плоскости / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 40. – С. 166–169.

10. Коновалов В. И. Экономическая эффективность применения многорядных дисковых борон и лушительников / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 53. – С. 253–254.

11. Коновалов В. И. Теоретическое исследование способов повышения эффективности эксплуатации дисковых почвообрабатывающих орудий / Е. И. Трубилин, В. И. Коновалов, С. И. Коновалов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 65. – С. 165–171.

– *патенты:*

12. Пат. 138453 Российская Федерация, МПК А 01 В 21/08, А 01 В 7/00 (2006.01). Рабочий орган дискового почвообрабатывающего орудия [Текст] / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов ; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет. – Заявл. 2013138242/13 ; опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8. – 5 с. : ил.

13. Пат. 152563 Российская Федерация, МПК А 01 В 21/00 (2006.01). Рабочий орган дискового почвообрабатывающего орудия [Текст] / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов ; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет. – Заявл. 2014146819/13 ; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 16. – 5 с. : ил.

– в прочих изданиях:

14. Коновалов В. И. Повышение технологической эффективности дисковой бороны / В. И. Коновалов, С. И. Коновалов // Сборник статей по материалам 73-й научно-практической конференции преподавателей (Краснодар, 2018). – 2018 – С. 293-294.

15. Коновалов В. И. Модернизация дисковой бороны БДМ-4×4ПМ / В. В. Курочкин, В. И. Коновалов // Сборник статей по материалам 73-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2017 год (Краснодар, 2018). – 2018 – С. 372-374.

16. Коновалов В. И. Обзор конструкций индивидуальных стоек крепления дисковых рабочих органов / А. С. Семенов, В. И. Коновалов, С. И. Коновалов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко. (Краснодар, 2017). – 2017 – С. 624-625.

17. Коновалов В. И. Направления совершенствования конструкций дисковых борон для сохранения курсовой устойчивости / О. А. Стерлигов, В. И. Коновалов, С. И. Коновалов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И. С. Косенко. (Краснодар, 2017). – 2017 – С. 638-639.

18. Коновалов В. И. Анализ направлений совершенствования дисковых почвообрабатывающих орудий / В. И. Коновалов // Сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2016 (Краснодар, 2017). – 2017 – С. 301-302.

19. Коновалов В. И. Курсовая устойчивость дисковых орудий / Е. И. Трубилин, В. И. Коновалов // Научно-технический прогресс в АПК: проблемы и перспективы. Международная научно-практическая конференция, в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016». (Ставрополь, 2016). – 2016 – С. 114-119.

Подписано к печати 09.11.2020 г.

Бумага офсетная

Уч.-изд. л. 1

Тираж 100 экз.

Формат 60×84 1/16

Офсетная печать

Заказ № _____

Отпечатано в типографии Кубанского ГАУ
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13