

УДК 631.311

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

КОНСТРУКТИВНЫЕ И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО СРЕДСТВА

Николенко Александр Юрьевич
ассистент
SPIN-код автора: 9221-1391

Тарасенко Борис Федорович
д-р. техн. наук, профессор
SPIN-код автора: 7415-7870
Кубанский государственный аграрный университет, Россия, 350044, Краснодар, Калинин, 13

В работе определялись конструктивные параметры и режимы работы многофункционального средства из условия снижения тягового сопротивления. Были выбраны наиболее существенные факторы, влияющие на тяговое сопротивление. Интервалы варьирования факторов выбирались исходя из агро-требований и теоретических основ почвообрабатывающих машин. Экспериментальное средство было смонтировано на специальную раму с системой динамометрирования рабочих органов почвообрабатывающих машин. Полученные экспериментальные данные обрабатывались при помощи композиционного плана типа B_k . После получения уравнений с мнимыми коэффициентам производилось каноническое преобразование с целью определения оптимальных значений факторов и сравнение влияния двух факторов вблизи оптимума при помощи поверхностей отклика. Произведены выводы, в которых указаны оптимальные конструктивные и режимные параметры, при которых снижается тяговое сопротивление. Были найдены оптимальные значения выбранных факторов из условия снижения тягового сопротивления. Сравнено влияния двух факторов при зафиксированном оптимальном третьем и дана расшифровка показаний трехмерных графиков

Ключевые слова: ОСНОВНАЯ ОБРАБОТКА, ОПТИМИЗАЦИЯ, КАЧЕСТВО ПОЧВООБРАБОТКИ, ЭНЕРГОЗАТРАТЫ, ОБОРОТНЫЙ ПЛУГ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-217-030>

UDC 631.311

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

CONSTRUCTIVE AND OPERATIONAL PARAMETERS MULTIFUNCTIONAL TILLAGE TOOLS

Nikolenko Aleksandr Yurievich
Assistant
RSCI SPIN-code: 9221-1391

Tarasenko Boris Fedorovich
Dr.Sci.Tech., professor
RSCI SPIN-code: 7415-7870
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia 350044, Kalinina, 13

In the work, the design parameters and operating modes of the multifunctional tool were determined from the condition of reducing traction resistance. The most significant factors affecting traction resistance were selected. The intervals of variation of the factors were selected based on agricultural requirements and the theoretical foundations of tillage machines. The experimental tool was mounted on a special frame with a dynamometer system for working bodies of tillage machines. The experimental data obtained were processed using a B_k -type composite plan. After obtaining the equations with imaginary coefficients, a canonical transformation was performed in order to determine the optimal values of the factors and compare the influence of the two factors in the vicinity of the optimum using response surfaces. Conclusions have been drawn, which indicate the optimal design and operating parameters, which reduce traction resistance. The optimal values of the selected factors from the condition of reducing the drag were found. The effects of two factors with the optimal third fixed are compared and the interpretation of the three-dimensional graphs is given

Keywords: SOIL, BASIC PROCESSING, QUALITY OF TILLAGE, ENERGY CONSUMPTION, REVOLVING PLOW

Введение

Многофункциональное средство для обработки почвы применяется в сельскохозяйственном машиностроении, в частности для первичной обработки грунта с челночным перемещением техники по отвальным и безотвальным методам. В интенсивном земледелии правильная обработка почвы критически важна: ошибки при рыхлении слоя грунта провоцируют эрозию от ветра и осадков. Избыточное измельчение до пылеобразного состояния разрушает гранулометрический состав, делая почву уязвимой к ветровому выносу. Напротив, чрезмерное прессование с образованием крупных глыб тормозит гумусификацию в профиле почвы. Кроме того, уплотненный горизонт на дне канавы (плужная подошва) блокирует сток воды, вызывая подтопление пониженных участков полей.

Определение конструктивных и режимных параметров почвообрабатывающих машин является фундаментальной задачей сельскохозяйственного машиностроения, направленной на оптимизацию работы оборудования для основной и предпосевной культивации почвы. Конструктивные параметры включают геометрию рабочих органов (ширину стойки, угол атаки, тип лемеха), размеры шасси и кинематику агрегата, определяющие качество обработки, энергоемкость и долговечность машины. Режимные параметры охватывают скорость движения, глубину вспашки, нагрузку на тягу и условия эксплуатации (влажность почвы, тип грунта), влияющие на производительность и минимизацию эрозии.

Правильный расчет этих параметров позволяет снизить энергозатраты на 15–25%, повысить равномерность крошения почвы и предотвратить образование плужной подошвы. В условиях интенсивного земледелия Краснодарского края, с преобладанием черноземов и рисков эрозии, такая оптимизация обеспечивает устойчивость агросистем и рост урожайности. Настоящий анализ опирается на методы моделирования потока, экспери-

ментальные данные и стандарты ГОСТ, предлагая рекомендации для проектирования многофункциональных челночных агрегатов.

Определение оптимальных конструктивных и режимных параметров работы сельскохозяйственных средств и машин является одним из важнейших этап проектирования и конструирования. Данный этап позволяет оптимизировать главный показатель работы средства исходя от регулируемых факторов. У почвообрабатывающих машин одним из важнейших критериев оптимизации стало тяговое сопротивление так как определение его обеспечивает рациональную комплектацию сельскохозяйственной машины с трактором. Факторами для работы почвообрабатывающей машины выбираются те параметры, которые наиболее сильно влияют на выбранный критерий оптимизации.

Цель исследований

Целью данного исследования является определения параметров и режимов работы многофункционального почвообрабатывающего средства.

Материалы и методы

Для проведения экспериментального исследования был применен симметричный композиционный план B_k т.к. ядро этого плана является полным факторным экспериментом. После обработки данных эксперимента установлены формы поверхности отклика, для углубленного анализа были применены двумерные сечения. Композиционный симметричный план B_k выделяется среди других методов планирования эксперимента благодаря ряду ключевых преимуществ. В отличие от ротационных планов или центрально-композиционных планов, план B_k обеспечивает полную ортогональность оценок линейных, квадратичных эффектов и взаимодействий. Симметричное расположение точек минимизирует корреляцию коэффициентов регрессии, повышая точность модели на

20–30% при том же числе опытов. По сравнению с полным многоуровневым планом, V_k требует в 2–3 раза меньше опытов при сопоставимой точности для квадратичных поверхностей. План V_k ротатабелен, что обеспечивает одинаковую дисперсию предсказаний по всей области исследования — преимущество перед несимметричными планами.

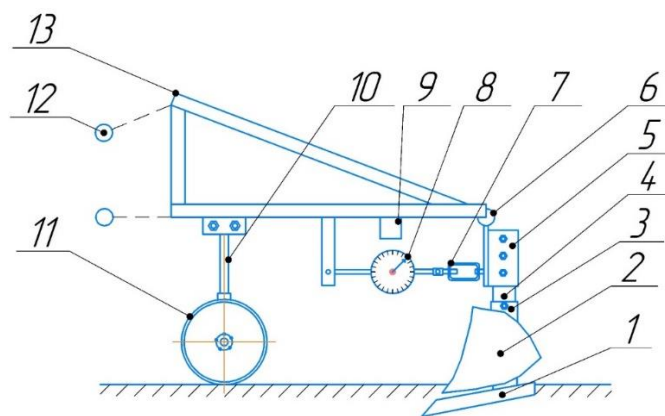
Результаты

Изготовлено многофункциональное почвообрабатывающее средство в соответствии с патентом на полезную модель РФ №225628 [1] рисунок 1. Изготовленное средство представляет собой стойку с треугольной лапой, на которую закреплен поворотный механизм из подвижного и неподвижного кольца с прикрепленными отвалами для оборота пласта.



Рисунок 1 – Экспериментальный рабочий орган

Была разработана специальная установка патент РФ №2010116516/13 [2] (рисунок 2) для проведения экспериментальных исследований, с помощью которой измерялась величина тягового сопротивления рабочего органа многофункционального почвообрабатывающего средства во время работы.



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

Рисунок 2 – Конструктивная схема экспериментальной установки

К основным факторам, определяющим эффективность многофункционального почвообрабатывающего средства, относятся конструктивные параметры (ширина стойки, положение отвала, угол заточки лезвия) и режимные характеристики (скорость перемещения, глубина вспашки), а также физико-механические свойства грунта — сопротивление резанию, агрегация и влажность. Анализ этих параметров позволил установить: геометрия рабочих органов спроектирована для оптимального переворота и крошения почвенного слоя при одновременном снижении тягового сопротивления на 15–20%, что обеспечивает высокую производительность в условиях черноземов Краснодарского края.

Рассмотрев основные параметры, влияющие на тяговое сопротивление многофункционального комбинированного рабочего органа, были выбраны параметры испытаний выбран диапазон изменения параметров, а также уровни их варьирования. Были изучены условия испытаний и процесс их проведения.

В качестве основных факторов были выбраны: скорость поступательного движения (v_p), угол поворота отвала (β), глубина обработки (h), диапазоны вариации которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированные обозначения	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Скорость движения (v_p), км/ч	x_1	1	6	8	10
Угол поворота отвала (β), град	x_2	3	42	45	48
Глубина обработки (h), м	x_3	0,02	0,18	0,21	0,24

Уровни факторов были выбраны так, чтобы теоретически рассчитанные оптимумы и существующие ограничения находились в центре интервалов варьирования.

Первый фактор (x_1) скорость перемещения рабочего органа варьировался от 6 до 10 км/ч. Численное значение скорости движения определили, зная расстояние пути прохода трактора и замером времени прохода. На тракторе постоянная скорость подбиралась включением различных передач и равномерной подачей газа.

Второй фактор (x_2) угол поворота отвала принимал значения от 42° до 48° . Второй параметр фиксировался поворотным механизмом системы отвалов под определенным углом, выставленным при помощи угломера.

Третий фактор (x_3) глубина обработки изменялся в диапазоне от 0,18 до 0,24 м. Третий параметр выставлялся путем перестановки стойки в различные отверстия и при помощи регулировки по высоте опорного колеса и подкладки доски определенной толщины чтобы учесть продавливание почвы во время эксперимента.

Матрица плана эксперимента представлена в табл. 2.

Таблица 2 – Матрица планирования эксперимента при оптимизации параметров многофункционального почвообрабатывающего средства

Кодированное значение переменных			Натуральное значение переменных			Усилие, Н
			Скорость движения v_p , км/ч	Угол поворота отвала (β), град	Глубина обработки (h), м	
x_1	x_2	x_3				
+1	+1	+1	10	48	0,24	9600
-1	+1	+1	6	48	0,24	10300
+1	-1	+1	10	42	0,24	9300
-1	-1	+1	6	42	0,24	11000
+1	+1	-1	10	48	0,18	9800
-1	+1	-1	6	48	0,18	11000
+1	-1	-1	10	42	0,18	9900
-1	-1	-1	6	42	0,18	12100
+1	0	0	10	45	0,21	7150
-1	0	0	6	45	0,21	8600
0	+1	0	8	48	0,21	8550
0	-1	0	8	42	0,21	9000
0	0	+1	8	45	0,24	7650
0	0	-1	8	45	0,18	8300

Эксперименты проводились по утвержденным стандартным процедурам. Рандомизацию последовательности опытов осуществляли с использованием таблицы случайных чисел. Результаты исследований по оптимизации конструктивных и режимных параметров рабочего органа многофункционального агрегата обрабатывали по методике [3].

Полученные данные обрабатывали в Mathcad Prime 10 на ПК с Windows 10. На основе результатов формировали вариационный ряд, который анализировали методами математической статистики.

Среднее значение критерия тягового сопротивления вычислили по десяти значениям. Полученные данные сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Статистические характеристики отклика по опытам

№ опыта	Среднее значение \bar{X} , Н	Стандартное отклонение S , Н	Ошибка выборочной средней S_x , Н	Коэффициент вариации, V	Относительная ошибка P , %	Абсолютная ошибка m , Н
1	9600	177,951	56,273	1,854	0,586	134,175
2	10300	188,562	59,628	1,831	0,579	142,176
3	9300	139,443	44,096	1,499	0,474	105,140
4	11000	145,297	45,947	1,321	0,418	109,554
5	9800	94,281	29,814	0,962	0,304	71,088
6	11000	141,421	44,721	1,286	0,407	106,632
7	9900	88,192	27,889	0,891	0,282	66,497
8	12100	194,365	61,464	1,606	0,508	146,551
9	7150	97,183	30,732	1,359	0,430	73,276
10	8600	100,000	31,623	1,163	0,368	75,400
11	8550	86,442	27,335	1,010	0,320	65,177
12	9000	137,437	43,461	1,527	0,483	103,627
13	7650	94,281	29,814	1,232	0,390	71,088
14	8300	91,287	28,868	1,100	0,348	68,830

Для функции отклика использовали уравнение регрессии второго порядка. Обработав экспериментальные данные получили уравнение с минимальными коэффициентами:

$$y = 7125 - 725x_1 - 205x_2 - 325x_3 + 250x_1x_2 + 125x_1x_3 + 100x_2x_3 + 750x_1^2 + 1650x_2^2 + 850x_3^2, \quad (1)$$

где y – тяговое усилие, Н;

x_1 – скорость движения;

x_2 – угол поворота отвала;

x_3 – глубина обработки.

Полученные коэффициенты регрессионного уравнения (1) были проверены по критерию Стьюдента. Все коэффициенты оказались значимы.

Адекватность модели подтверждалась критерием Фишера: вычисленное значение $F = 3,18$ оказалось ниже табличного (4,74), что свидетельствует о ее достаточной точности.

Эксперименты показали, что во всех комбинациях факторов модель обеспечивала выполнение агротехнических норм по качеству вспашки — в частности, по степени крошения почвы и стабильности глубины обработки.

Продифференцировав уравнение (1) по каждой из переменных, и приравняв производные нулю, получили систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = -725 + 250x_2 + 125x_3 + 1500x_1 \\ \frac{dy}{dx_2} = -205 + 125x_1 + 100x_3 + 3300x_2 \\ \frac{dy}{dx_3} = -325 + 125x_1 + 100x_2 + 1700x_3 \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы уравнений определило координаты центра поверхности отклика: $x_1 = 0,4667$, $x_2 = 0,0221$, $x_3 = 0,1556$.

Подставив эти значения в уравнение регрессии, получили оптимальное значение целевого параметра в центре поверхности: 6928,3 Н – значение тягового сопротивления.

Для углубленного анализа взаимодействия двух факторов поблизости от оптимума выполнено каноническое преобразование с фиксацией одного фактора на оптимальном уровне, что дало каноническую форму поверхности отклика. Уравнение регрессии в этой форме принимает вид:

$$Y - 6928,3 = 750 \cdot X_1^2 + 1653,11 \cdot X_2^2 - 846,89 \cdot X_3^2, \quad (3)$$

где Y – значение тягового сопротивления многофункционального средства,

X_1, X_2, X_3 – новые оси координат.

Чтобы детальнее визуализировать поверхность отклика, ее исследовали посредством двумерных разрезов.

Для этого в исходное уравнение (3) подставим $x_3 = 0,1556$. Тогда:

$$Y_{12} = 7095 - 705,55 \cdot x_1 - 189,44 \cdot x_2 + 250 \cdot x_1 \cdot x_2 + 750 \cdot x_1^2 + 1650 \cdot x_2^2, (4)$$

где Y_{12} – значение тягового сопротивления.

Каноническое преобразование с последующим решением системы линейных уравнений дало координаты центра поверхности отклика: $x_1 = 0,4667, x_2 = 0,0221$.

Подстановка этих значений в уравнение регрессии позволила вычислить оптимальный параметр, $x_3 = 0,1556$, при этом величина отклика составила 6928,3 Н.

Уравнение регрессии в канонической форме примет вид:

$$Y_{12} - 6928,3 = 732,96 \cdot X_1^2 + 1667,03 \cdot X_2^2. (5)$$

Поверхность отклика (рисунок 3) представляет собой эллиптический параболоид с экстремумом в центре (рисунок 4), что обусловлено одинаковыми знаками коэффициентов. В этой комбинации факторов доминирующее влияние на отклик оказывает угол поворота отвала.

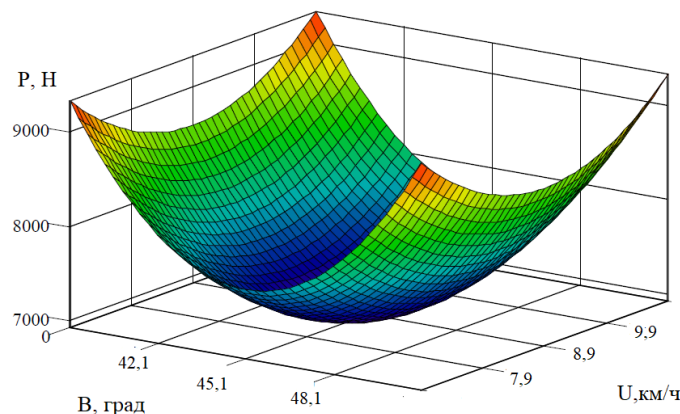


Рисунок 3 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления от скорости движения и угла поворота отвала

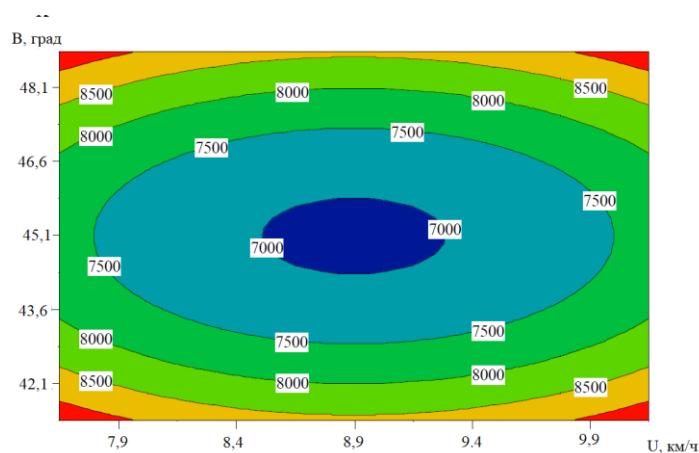


Рисунок 4 – Двухмерное сечение поверхности отклика зависимости тягового сопротивления от скорости движения и угла поворота отвала.

Далее рассмотрим влияние скорость движения средства и глубины обработки на значение величины тягового сопротивления при постоянном угле поворота отвала. Для этого в исходное уравнение подставим значение x_2 . Уравнение примет вид:

$$Y_{13} = 7121 - 719,47 \cdot x_1 - 322,79 \cdot x_3 + 125 \cdot x_1 \cdot x_3 - 750 \cdot x_1^2 - 850 \cdot x_3^2. \quad (6)$$

Определим значение параметра тягового сопротивления в центре поверхности отклика, когда остальные факторы фиксированы соответственно в точках центра поверхности отклика получим значение тягового сопротивления равное 6928,3 Н.

Уравнение регрессии в канонической форме имеет вид:

$$Y_{13} - 6928,3 = 719,96 \cdot X_1^2 - 880,04 \cdot X_3^2. \quad (7)$$

Поверхность отклика (рисунок 5) имеет форму эллиптического параболоида с минимумом в центре (рисунок 6), благодаря совпадению знаков коэффициентов. Среди взаимодействующих факторов преобладающее воздействие на тяговое сопротивление обеспечивает глубина вспашки, поскольку $B_{33} > B_{11}$.

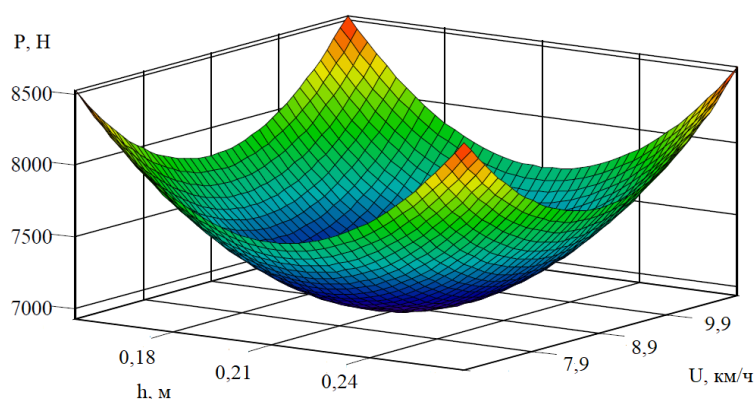


Рисунок 5 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления от плотности почвы и скорости движения

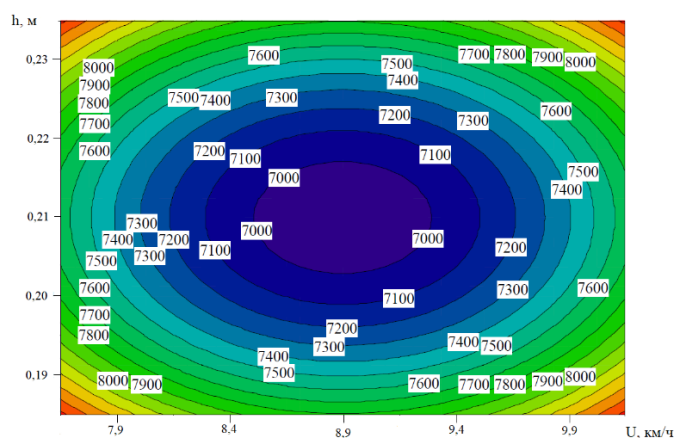


Рисунок 6 – Двухмерное сечение поверхности отклика тягового сопротивления от плотности почвы и скорости движения агрегата

Рассмотрим влияние угла поворота отвала и глубины обработки на величину тягового сопротивления при постоянной скорости движения. Для этого в исходное уравнение подставим значение x_1 . Уравнение примет вид:

$$Y_{23} = 6950 + 88,33 \cdot x_2 - 266,66 \cdot x_3 - 100 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1650 \cdot x_2^2 - 850 \cdot x_3^2. \quad (8)$$

Подставим найденные значения в уравнение и определим значение тягового сопротивления в центре поверхности отклика, когда остальные факторы фиксированы. Получили значение тягового сопротивления равное 6928,3 Н.

Уравнение регрессии в канонической форме примет вид:

$$Y_{23} - 6928,3 = 1653,11 \cdot X_2^2 + 846,89 \cdot X_3^2. \quad (9)$$

Поверхность отклика (рисунок 7) формирует эллиптический параболоид с экстремумом в центре (рисунок 8), то следует из одинаковых знаков коэффициентов. В паре взаимодействующих факторов определяющее влияние на отклик оказывает угол поворота отвала, так как $B_{22} > B_{33}$.

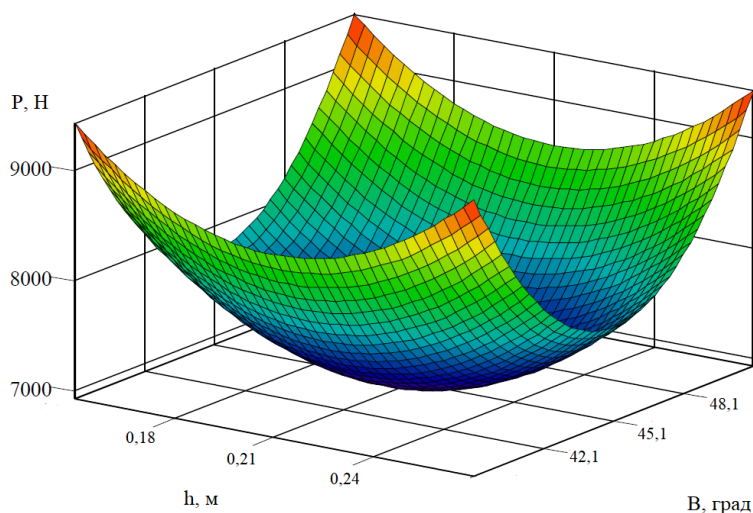


Рисунок 7 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления от глубины обработки и угла поворота отвала

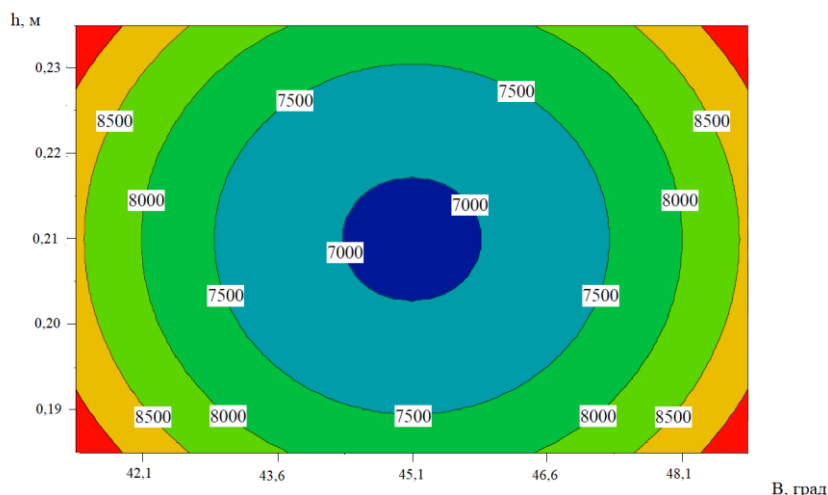


Рисунок 8 – Двухмерное сечение поверхности отклика тягового сопротивления от глубины обработки и угла поворота отвала

Выводы

Установлены оптимальные параметры, режимы работы комбинированного рабочего органа с учетом конструктивных особенностей факторы приняли следующие значения: оптимальная скорость движения $v_p = 8,9$ км/ч; оптимальный угол поворота отвала $\beta_2 = 45^\circ$; оптимальная глубина обработки $h = 0,21$ м; величина горизонтальной составляющей силы сопротивления почвы составила 6928,3 Н.

Библиографический список

1. Патент на полезную модель № 225628 U1 Российская Федерация, МПК А01В 5/10, А01В 35/16. Плуг-рыхлитель : № 2024103804 : заявл. 14.02.2024 : опубл. 26.04.2024 / Б. Ф. Тарасенко, А. Ю. Николенко, С. Ю. Орленко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина".
2. Патент № 2436270 С1 Российская Федерация, МПК А01В 63/112, G01L 5/13. Полевая установка для испытаний почвообрабатывающих рабочих органов : № 2010116516/13 : заявл. 26.04.2010 : опубл. 20.12.2011 / Б. Ф. Тарасенко, С. А. Твердохлебов, Н. И. Богатырев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный аграрный университет".
3. Universal Tillage Implement / В. Tarasenko, А. Nikolenko, V. Drobot // Acta Technologica Agriculturae. – 2025. – Vol. 28, No. 1. – P. 26-31.

References

1. Patent na poleznuju model' № 225628 U1 Rossijskaja Federacija, MPK A01B 5/10, A01B 35/16. Plug-ryhlitel' : № 2024103804 : zajavl. 14.02.2024 : opubl. 26.04.2024 / B. F. Tarasenko, A. Ju. Nikolenko, S. Ju. Orlenko [i dr.] ; zajavitel' Fede-ral'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija "Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni I.T. Trubilina".
2. Patent № 2436270 C1 Rossijskaja Federacija, MPK A01B 63/112, G01L 5/13. Polevaja ustanovka dlja ispytanij pochvoobrabatyvajushhix rabochih organov : № 2010116516/13 : zajavl. 26.04.2010 : opubl. 20.12.2011 / B. F. Tarasenko, S. A. Tverdohlebov, N. I. Bogatyrev [i dr.] ; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Kubanskij gosudarstvennyj ag-rarnyj universitet".
3. Universal Tillage Implement / B. Tarasenko, A. Nikolenko, V. Drobot // Acta Techno-logica Agriculturae. – 2025. – Vol. 28, No. 1. – P. 26-31.