

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7484

УДК 630*65.011.54

Статья

Многоцелевая оптимизация параметров комбинированного корпуса плуга

Зимарин Сергей Викторович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), sezimarin@yandex.ru

Четверикова Ирина Владимировна

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), chivles@rambler.ru

Хрипченко Михаил Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), at-conf@yandex.ru

Получена: 1 ноября 2023 / Принята: 21 мая 2024 / Опубликовано: 10 июня 2024

Аннотация: Статья посвящена обоснованию оптимальных технологических параметров комбинированного корпуса плуга для основной обработки почвы. В рамках рациональной энергосберегающей технологии лесовосстановительных работ предлагаемый корпус плуга будет входить в конструкции многофункциональных орудий, позволяющих проводить качественную обработку почвы на нераскорчёванных вырубках. Качественная обработка почвы подразумевает полный оборот, укладку рядом с открытой бороздой почвенного пласта при максимальном сохранении его целостности. В работе проведены экспериментальные исследования по определению основных характеристик оценки качества обработки почвы предлагаемым орудием, в частности, поворот почвенного пласта и коэффициент его деформации, а также продольное и поперечное перемещение почвенной массы. Представлены результаты исследований зависимости угла поворота почвенного пласта, коэффициента его деформации, продольного и поперечного перемещения почвенной массы от трёх основных технологических параметров орудия, таких как угол атаки, угол наклона дискового корпуса и угол поворота отвала. Установлено, что наибольшее влияние на вышеназванные характеристики работы орудия оказывает угол атаки, менее значимое оказывает угол наклона дискового корпуса, совсем незначительно

на характеристики работы орудия влияет угол поворота отвала. Установлено, что при этом угол атаки и угол наклона дискового корпуса оказывают противоречивое влияние на процесс обработки. Так, например, увеличение угла атаки и снижение угла наклона дискового корпуса, с одной стороны, повышают оборот почвенного пласта, с другой — снижают его сохранность. В данной работе достигнута поставленная авторами первоначальная цель — лабораторное исследование процесса оборота и деформации почвенного пласта корпусом лесного плуга и определение его оптимальных параметров, которые влияют на обеспечение качественной обработки почвы. Получены регрессионные модели, позволяющие определять оптимальные технологические параметры комбинированного корпуса плуга, а именно: угол атаки 36° , угол наклона дискового корпуса 15° , угол поворота отвала 20° .

Ключевые слова: лесной комплекс; основная обработка почвы; нераскорчёванная вырубка; дисковые орудия; корпус плуга

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7484

Article

Multi-purpose optimization of parameters of the plow combined body

Sergey Zimarin

PhD in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), sezimarin@yandex.ru

Irina Chetverikova

PhD in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), chivles@rambler.ru

Michael Khripchenko

PhD in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), at-conf@yandex.ru

Received: 1 November 2023 / Accepted: 21 May 2024 / Published: 10 June 2024

Abstract: The article substantiates the optimal technological parameters of the plow combined body used for basic tillage. As part of the rational energy-saving technology of reforestation, the proposed plow body will be included in the design of multifunctional tools that allow for high-quality tillage in uncleared stands. The process of high-quality tillage includes a full turn of a soil layer and its laying next to an open furrow with the highest possible preservation of the layer's integrity. Experimental studies have been performed to determine the main characteristics of assessing the quality of tillage with the proposed tool, in particular, the rotation of the soil layer and its deformation coefficient, as well as the longitudinal and transverse displacement of the soil mass. The authors determined the dependences of the rotation angle of the soil layer, the coefficient of its deformation and the longitudinal and transverse displacement of the soil mass on three main technological parameters of the tool, such as: the approach angle and the angle of inclination of the disk housing, and the turning angle of the plow moldboard. It has been established that the approach angle has the greatest influence on the above-mentioned characteristics of the plow, the angle of inclination of the disk housing has a less significant effect, and the turning angle of the plow moldboard has a very insignificant effect on the characteristics of the plow. It has been found that in this case, the approach angle and the angle of inclination of the disk housing have a contradictory effect on the treatment process. For example, an increase

in the approach angle and a decrease in the angle of inclination of the disk housing increase the turnover of the soil layer while reducing its safety. In this work, the original goal set by the authors has been achieved: to study the process of turnover and deformation of the soil layer by the forest plow body and to determine its optimal parameters that affect high-quality of tillage. Regression models have been obtained that allow determining the optimal technological parameters of the plow combined body, namely: the approach angle 360, the angle of inclination of the disk body 150, the moldboard turning angle 200.

Keywords: forest complex; basic tillage; uncleared stands; disk tools; plow body

1. Введение

Восстановление лесов является глобальной проблемой и важнейшей задачей лесного комплекса. Одним из главных направлений совершенствования существующих технологий и техники для лесовосстановления является ресурсосбережение с уменьшением отрицательных последствий от воздействия машин на лесную среду. Актуальной технологией лесовосстановления на нераскорчёванных вырубках является бороздная обработка почвы, позволяющая избежать выполнения материально затратной операции по корчеванию пней. При этом существенно снижается негативное экологическое воздействие на почву, т. к. вместе с пнями удаляется верхний гумусированный слой почвы, а расчищенная площадь приобретает ложбинный профиль, что приводит к локальному заболачиванию. Лесные культуры, высаженные в таких условиях, слабо развиваются и зачастую гибнут [1—5].

В настоящее время бороздная вспашка выполняется лемешными и дисковыми плугами. Лемешные плуги способны полностью оборачивать почвенный пласт, сохраняя его целостность. Таким образом, обеспечивается заделка растительных остатков в верхний слой почвы, что ведёт к накоплению гумуса. При этом лемешные плуги на нераскорчёванных вырубках имеют низкую проходимость, т. к. плохо преодолевают встречающиеся препятствия и испытывают большие ударные нагрузки при встрече с ними, что приводит к выходу их из строя. Дисковые плуги, имея высокую проходимость в данных условиях работы, не способны обеспечить качественную обработку почвы в плане оборота и сохранности почвенного пласта ни при каких своих конструктивно-технологических параметрах [6—10].

Цель работы — лабораторное исследование процесса оборота и деформации почвенного пласта корпусом лесного плуга и определение его оптимальных параметров [11—16], обеспечивающих качественную обработку почвы (полностью обёрнутый почвенный пласт уложить рядом с открытой бороздой на необработанную поверхность почвы, сохранив его целостность).

2. Материалы и методы

Конструкция предлагаемого комбинированного корпуса плуга (рисунок 1) имеет стойку 1; в ступице стойки на подшипниках установлен сферический диск 2, который заторможен посредством пластинчатой пружины 4; к сферическому диску жёстко прикреплен отвал 3 с возможностью регулировки по высоте и углу наклона. Корпус плуга работает следующим образом: заторможенный сферический диск подрезает почвенный пласт; почвенный пласт, двигаясь по рабочей поверхности корпуса плуга, оборачивается и укладывается рядом с бороздой, сохраняя свою целостность под действием на него отвала. При встрече с препятствием сферический диск растормаживается и свободно перекатывается через препятствие, после преодоления препятствия сферический диск тормозится пластинчатой

пружиной. Такая конструкция позволяет сочетать достоинства дисковых орудий по преодолению препятствий на нераскорчёванных вырубках и лемешных плугов по качеству обработки почвы.

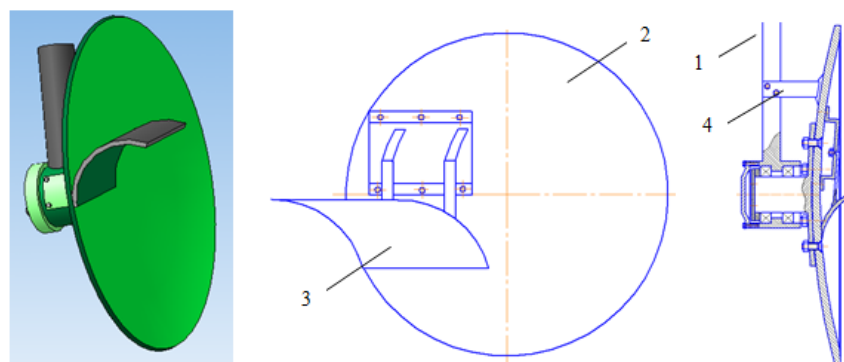


Рисунок 1. Конструкция корпуса плуга: 1 — стойка; 2 — сферический диск; 3 — отвал; 4 — пластинчатая пружина

Figure 1. Plow body design: 1 — rack; 2 — spherical disc; 3 — moldboard; 4 — plate spring

Качество обработки почвы экспериментальным корпусом плуга оценивалось методом закладки в почву кубиков со стороной 10 мм. Кубики закладывались поперёк движению орудия на удалении друг от друга 50 мм. Координаты шашек определялись профиломером-координатором с точностью замера 1 мм (фото 1). Координаты кубиков после прохода орудия замерялись следующим образом: X — в направлении движения корпуса плуга, Y — перпендикулярно направлению движения в горизонтальной плоскости; Z — перпендикулярно направлению движения в вертикальной плоскости.



Фото 1. Профиломер-координатор

Photo 1. Coordinator Profiler

Принятые характеристики для оценки качества обработки почвы:

- угол поворота пласта (ψ) характеризует способность комбинированного корпуса плуга оборачивать пласт, угол определялся из выражения (1):

$$\psi = \frac{\psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_n}{n-1} = \frac{\sum \arctg \frac{z_{k_i} - z_{k_1}}{y_{k_i} - y_{k_1}}}{n-1}, \quad (1)$$

где z_{k_1} , y_{k_1} — конечная вертикальная и поперечная координаты первой меченой шашки; z_{k_i} , y_{k_i} — конечная вертикальная и поперечная координаты других меченых шашек; n — число меченых шашек;

- коэффициент деформации почвенных слоёв ($K_{\text{д}}$) показывает, насколько под действием рабочего органов изменяется расстояние между частицами, располагавшимися до обработки на одной горизонтальной линии. Следовательно, коэффициент отражает сохранность почвенного пласта после воздействия на него корпуса плуга, коэффициент находится из выражения (2):

$$K_{\text{д}} = \frac{\sum \sqrt{(x_{k_i} - x_{k_{i-1}})^2 + (y_{k_i} - y_{k_{i-1}})^2}}{y_1 - y_n}, \quad (2)$$

где x_{k_i} — конечная продольная координата меченой шашки; y_{k_i} — конечная поперечная координата меченой шашки; y_1 — начальная поперечная координата первой меченой шашки; y_n — начальная поперечная координата последней меченой шашки;

- поперечное перемещение почвенной массы (y) показывает конечное положение слоя почвы, отражает оборот пласта и его сохранность (осыпание почвы в борозду), определяется как средняя арифметическая величина перемещения меченых частиц от края борозды из выражения (3):

$$y = \frac{\sum y_{k_i}}{n} - y_o, \quad (3)$$

где y_{k_i} — конечные поперечные координаты меченых шашек; y_o — координата края борозды; n — число частиц верхнего ряда;

- продольное перемещение почвенной массы (x) оказывает влияние на энергетику и интенсивность перемешивания почвенных слоёв, определяется как средняя арифметическая величина перемещения меченых шашек из выражения (4):

$$x = \frac{\sum x_{k_i}}{n} - x_o, \quad (4)$$

где x_{k_i} — конечные продольные координаты меченых шашек; n — число меченых шашек.

Исследования были проведены в почвенном канале ВГЛТУ, загруженном почвой типа лёгких суглинков: твёрдость почвы 18 кг/см^2 , влажность 8 %, глубина обработки 15 см; конструктивные характеристики сферического диска комбинированного корпуса: наружный диаметр 770 мм, радиус кривизны 1200 мм.

Исследования предполагали построение регрессионных моделей влияния параметров комбинированного корпуса плуга (угол атаки, угол наклона корпуса плуга и угол поворота отвала) на оборот почвенного пласта и коэффициента его деформации на продольное и поперечное перемещение почвенной массы; с последующей оптимизацией вышеназванных параметров корпуса. Для решения поставленной задачи был реализован полный факторный эксперимент. Обозначение варьируемых факторов и их уровни представлены в таблице 1. Функции отклика: y_1 , мм — продольное перемещение почвенной массы; y_2 — коэффициент деформации почвенного пласта; y_3 , град. — поворот почвенного пласта; y_4 , мм — продольное перемещение почвенной массы.

Таблица 1. Определение уровней и интервалов варьирования факторов

Table 1. Levels and intervals of variation of factors

Фактор		Уровни факторов			Интервал варьирования	
Наименование	Обозначение		верхний	основной		нижний
	натуральное	нормализованное				
Угол атаки корпуса, град.	α	x_1	45	40	35	5
Угол наклона корпуса, град.	β	x_2	20	10	0	10
Угол поворота отвала, град.	θ	x_3	20	10	0	10

3. Результаты

Для проверки нормальности распределения выходных величин была проведена серия из 30 опытов при $\alpha = 35^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, результаты которых представлены в таблице 2.

Выполним проверку выборок y_1 , y_2 , y_3 , y_4 на выбросы по лимитам межквартильного размаха, статистики выборок представлены в таблице 3.

Таблица 2. Результаты серии опытов

Table 2. The experimental results

№	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	№	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	№	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
1	286	1,861	146	185	11	289	1,888	146	187	21	283	1,744	145	194
2	277	1,999	143	189	12	280	1,78	145	197	22	283	1,884	144	187
3	282	1,81	147	189	13	284	1,944	146	186	23	290	1,938	146	194
4	284	1,769	144	191	14	279	1,804	143	185	24	280	1,893	144	192
5	283	1,828	149	192	15	282	1,929	143	190	25	285	1,803	142	190
6	284	1,707	148	188	16	275	1,97	148	184	26	285	1,738	145	190
7	280	1,947	146	195	17	283	1,855	143	193	27	288	1,838	141	194
8	292	1,823	146	188	18	273	1,828	147	190	28	287	1,897	148	191
9	285	1,942	144	191	19	286	1,926	145	190	29	292	1,844	141	189
10	286	1,832	144	191	20	277	1,807	149	183	30	287	1,886	145	189

Таблица 3. Статистики выборок

Table 3. Sample statistics

Показатели	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
Первый квартиль (Q ₁)	280	1,8055	143,5	187,5
Третий квартиль (Q ₃)	286,5	1,9115	146	191,5
Межквартильный размах (IQR)	6,5	0,106	2,5	4
Нижний лимит	270	1,6465	139,75	181,5
Верхний лимит	296	2,0705	149,75	197,5
Минимум	273	1,707	141	197
Максимум	294	1,999	149	183
Эксцесс	-0,038	-0,61	-0,31	-0,18
Асимметричность	-0,07	-0,05	-0,2	-0,05

Максимальные и минимальные значения во всех выборках находятся в границах своих лимитов, следовательно, выборки не содержат выбросы.

Проанализируем показатели для откликов y₁, y₂, y₃, y₄, выполнив построение гистограмм распределения частот и полигонов частот (рисунки 2, 3, 4, 5); при этом табличные критические значения асимметрии (As) и эксцесса (Ex) по абсолютной величине для всех откликов превышают расчётные: $As_{крит} > As_{расч}$ и $Ex_{крит} > Ex_{расч}$ (для y₁: 0,865 > 0,04; 0,661 > 0,07; для y₂: 0,865 > 0,05; 0,661 > 0,62; y₃: 0,865 > 0,2; 0,661 > 0,32; y₄: 0,865 > 0,19; 0,661 > 0,05), что говорит о нормальном распределении выходных величин.



Рисунок 2. Графический анализ выборки для отклика y_1

Figure 2. Graphical Sample Analysis for a Response y_1



Рисунок 3. Графический анализ выборки для отклика y_2

Figure 3. Graphical Sample Analysis for a Response y_2

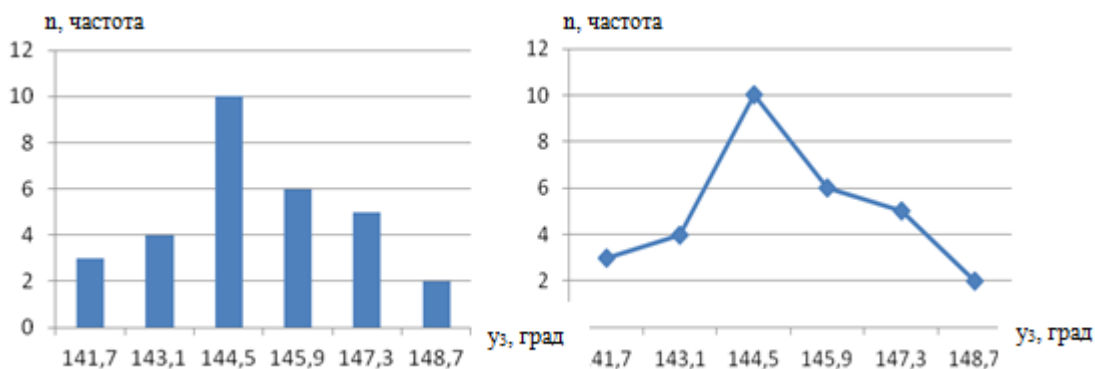


Рисунок 4. Графический анализ выборки для отклика y_3

Figure 4. Graphical Sample Analysis for a Response y_3



Рисунок 5. Графический анализ выборки для отклика y_4

Figure 5. Graphical Sample Analysis for a Response y_4

Выполним проверку по критерию χ^2 -Пирсона для утверждения гипотезы нормального распределения выходных величин. Для этого разбиваем выборку на шесть интервалов (таблица 4), количество интервалов (групп разбиения) определяем по формуле Стёрджесса: $m = 1 + 3,222 \cdot \lg N = 1 + 3,222 \cdot \lg 30 \approx 6$, где m — количество интервалов; N — число опытов (в нашем случае $N = 30$).

Таблица 4. Расчёт критерия Пирсона

Table 4. Calculation of the Pearson criterion

Для отклика y_1 (интервал с шагом $h = 3,5$)							Выражение для расчёта критерия Пирсона
Интервал	$y_{iл}$	$y_{iпр}$	y_i	p_i	p'_i	$\chi^2_{расч}$	
1	273	276,5	274,75	2	1,62495	3,21	$\chi^2_{расч} = \sum_{i=1}^m \frac{(p_i - p'_i)^2}{p'_i}$ $p'_i = \frac{h \cdot N}{\sigma_x^6} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z_i^2}{2}}$ $z_i = \frac{y_i - y_{cp}}{\sigma_x}$
2	276,5	280	278,25	6	4,790132		
3	280	283,5	281,75	6	8,224343		
4	283,5	287	285,25	10	8,224343		
5	287	290,5	288,75	3	4,790132		
6	290,5	294	292,25	3	1,62495		
Для отклика y_2 (интервал с шагом $h = 0,049$)							
1	1,707	1,756	1,73	3	1,69	1,65	
2	1,756	1,805	1,78	4	4,80		
3	1,805	1,854	1,82	8	8,09		
4	1,854	1,903	1,87	7	8,09		
5	1,903	1,952	1,92	6	4,80		
6	1,952	2,001	1,97	2	1,69		

Для отклика y_3 (интервал с шагом $h = 1,4$)						$y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m y_i p_i}{\sum_{i=1}^m p_i}$ $\sigma_x^e = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^m y_i^2 p_i}{N} \right) - y_{cp}^2}$	
1	141	142,4	141,7	3	1,84		2,11
2	142,4	143,8	143,1	4	5,17		
3	143,8	145,2	144,5	10	8,44		
4	145,2	146,6	145,9	6	8,00		
5	146,6	148	147,3	5	4,40		
6	148	149,4	148,7	2	1,40		
Для отклика y_4 (интервал с шагом $h = 2,4$)							3,15
1	183	185,4	184,2	4	2,059902		
2	185,4	187,8	186,6	3	5,723091		
3	187,8	190,2	189	11	8,916949		
4	190,2	192,6	191,4	6	7,79118		
5	192,6	195	193,8	5	3,817611		
6	195	197,4	196,2	1	1,049014		

Примечание: $y_{i\ л}$, $y_{i\ пр}$ — левая и правая границы интервала; y_i — средняя интервала; p_i — эмпирическая частота; p'_i — теоретическая частота; z_i — стандартизированная средняя интервала; y_{cp} — среднее взвешенное значение выборки; σ_x^e — взвешенное стандартное отклонение $\chi_{расч}^2$; расчётное значение критерия Пирсона. Табличное критическое значение критерия χ^2 -Пирсона равно 7,815, исходя из того, что расчётные значения критериев не превосходят табличное (для y_1 : 7,815 > 3,21; для y_2 : 7,815 > 1,65; для y_3 : 7,815 > 2,11; для y_4 : 7,815 > 3,15), принимаем гипотезу нормального распределения случайной величины в выборках.

Матрица планирования полного факторного эксперимента представлена в таблице 5, для исключения систематических ошибок проведена рандомизация опытов с помощью таблицы случайных чисел с учётом количества дублированных опытов.

Таблица 5. Матрица планирования эксперимента

Table 5. Experiment planning matrix

№	Рандомизация					x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	y_{1j}	S^2_{1j}	y_{2j}	S^2_{2j}	y_{3j}	S^2_{3j}	y_{4j}	S^2_{4j}
	1	2	3	4	5														
1	4	2	1	7	5	-1	-1	-1	1	1	1	285	33	1,84	0,0016	145	47	191	15
2	2	4	3	5	3	1	-1	-1	-1	-1	1	592	34	2,90	0,0013	178	5	286	19
3	3	6	4	4	8	-1	1	-1	-1	1	-1	254	8,3	1,45	0,0019	135	9	98	39
4	7	8	2	6	4	1	1	-1	1	-1	-1	492	50	2,44	0,0031	170	3	131	15
5	8	5	7	2	6	-1	-1	1	1	-1	-1	316	29	1,82	0,0055	153	24	170	39
6	1	7	8	3	1	1	-1	1	-1	1	-1	618	49	2,85	0,0052	178	6	276	83
7	5	3	6	1	2	-1	1	1	-1	-1	1	256	12	1,41	0,0021	138	44	96	25
8	6	1	5	2	7	1	1	1	1	1	1	499	21	2,47	0,0022	173	3	126	37

Примечание: $y_{1j}, S_{1j}^2, y_{2j}, S_{2j}^2, y_{3j}, S_{3j}^2, y_{4j}, S_{4j}^2$ — соответственно среднее значение и дисперсия откликов в опытах. Регрессионные модели влияния параметров комбинированного корпуса на отклики будем искать в виде многочленов: $y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$. Расчётные коэффициенты регрессии математических моделей представлены в таблице 6.

Таблица 6. Коэффициенты регрессии математических моделей

Table 6. Regression coefficients of the mathematical model

Отклик	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}
y_1	414,1	136,2	-39	8,2	-15,9	-0,15	-5,85
y_2	2,15	0,52	-0,21	-0,01	-0,008	0,0043	-4,55
y_3	158,6	16,05	-4,75	1,95	1,6	-1	-0,2
y_4	171,68	33,03	-59,1	-4,83	-17,38	1,025	2,98

Выполним построение регрессионных моделей, предварительно оценив однородность дисперсий опытов и значимость коэффициентов, затем адекватность модели, оценки математических моделей представлены в таблице 7. По G -критерию Кохрена проводим проверку однородности дисперсий опытов. Выбрав наибольшие дисперсии опытов, определим расчётное значение G -критерия. Неравенства $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ выполняются для всех откликов, что позволяет сделать вывод об однородности дисперсий опытов.

Таблица 7. Оценка математических моделей

Table 7. Evaluation of mathematical models

Отклик	$S_{\text{наиб}}^2$	$G_{\text{расч}}$	$G_{\text{табл}}$	$S\{b_i\}$	$t_{\text{табл}} S\{b_i\}$	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$
y_1	50	0,21	2,74	0,86	2,36	0,49	4,17
y_2	0,0055	0,24		0,008	0,023	0,69	
y_3	47	0,33		0,442	0,665	0,35	
y_4	83	0,30		0,92	2,53	1,03	

Примечание: $S_{\text{наиб}}^2$ — наибольшая дисперсия опытов; $G_{\text{расч}}$ — расчётный G -критерий Кохрена; $G_{\text{табл}}$ — табличный G -критерий Кохрена; $S\{b_i\}$ — среднее квадратичное отклонение коэффициентов регрессии; $t_{\text{табл}} S\{b_i\}$ — уровень значимости коэффициентов регрессии; $t_{\text{табл}}$ — критерий Стьюдента; $F_{\text{расч}}$ — расчётный критерий Фишера; $F_{\text{табл}}$ — табличный критерий Фишера.

Отбросив незначимые члены уравнений, получим регрессионные модели в виде выражений (5)—(8):

$$y_1 = 414,1 + 136,2x_1 - 39x_2 + 8,2x_3 - 15,9x_1x_2 - 5,85x_2x_3, \quad (5)$$

$$y_2 = 2,15 + 0,52x_1 - 0,21x_2, \quad (6)$$

$$y_3 = 158,6 + 16,05x_1 - 4,75x_2 + 1,95x_3, \quad (7)$$

$$y_4 = 171,68 + 33,03x_1 - 59,1x_2 - 4,83x_3 - 17,38x_1x_2 + 2,98x_2x_3. \quad (8)$$

Адекватность полученных моделей проверим по F -критерию Фишера, для всех моделей выполняются неравенства $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, следовательно, модели считаем адекватными.

Из анализа модели (5) следует (рисунок 6): наиболее сильно на продольное перемещение почвенной массы оказывает влияние изменение угла атаки, существенное — изменение угла наклона; малозаметное — изменение угла поворота отвала (по абсолютной величине: $b_1 > b_2 > b_3$). При этом с увеличением угла атаки и угла поворота отвала продольное перемещение почвенной массы повышается, а с увеличением угла наклона — уменьшается ($b_1, b_3 > 0$; $b_2 < 0$); заметное влияние на изменение продольного перемещения почвенной массы оказывает двойное взаимодействие факторов x_1 и x_2 .

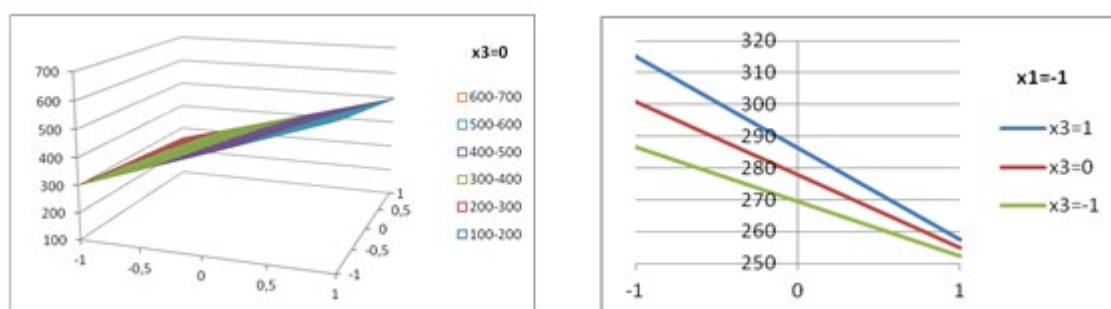


Рисунок 6. График зависимости продольного перемещения почвенной массы от параметров комбинированного корпуса плуга

Figure 6. Graph of the dependence of the longitudinal movement of the soil mass on the parameters of the combined plow body

Из анализа модели (6) следует (рисунок 7): наиболее определяющее влияние на деформацию почвенного пласта оказывает изменение угла атаки, заметное — изменение угла наклона; изменением угла поворота отвала можно пренебречь (по абсолютной величине: $b_1 > b_2$). При этом с увеличением угла атаки деформация пласта повышается, а с увеличением угла наклона — снижается ($b_1, b_3 > 0$; $b_2 < 0$). Поверхность отклика целевой функции y_2 может быть аппроксимирована плоскостью (незначимость коэффициентов $b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ и b_{123}).

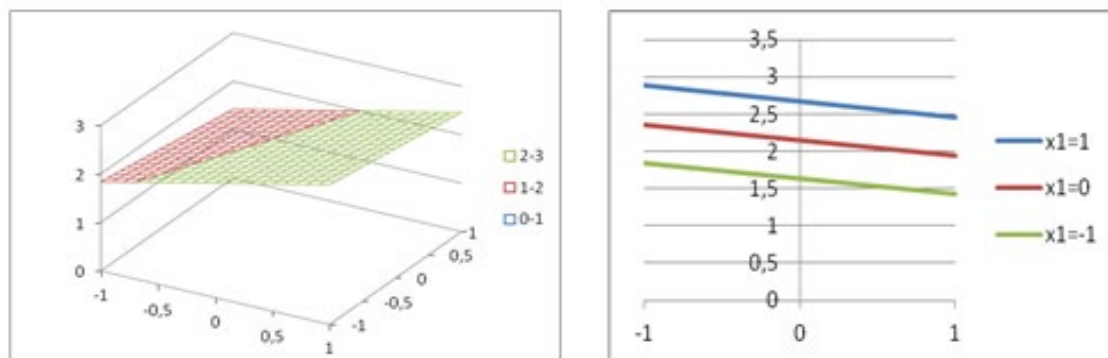


Рисунок 7. График зависимости деформации почвенного пласта от параметров комбинированного корпуса плуга

Figure 7. Graph of the dependence of the deformation of the soil layer on the parameters of the combined plow body

Из анализа модели (7) следует (рисунок 8): наибольшее влияние на оборот пласта оказывает изменение угла атаки, менее сильное — изменение угла наклона; наименьшее — изменение угла поворота отвала (по абсолютной величине: $b_1 > b_2 > b_3$). При этом с увеличением как угла атаки, так и угла поворота отвала оборот пласта повышается, а с увеличением угла наклона — уменьшается ($b_1, b_3 > 0$; $b_2 < 0$). Поверхность отклика целевой функции y_1 может быть аппроксимирована плоскостью (незначимость коэффициентов b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123}).

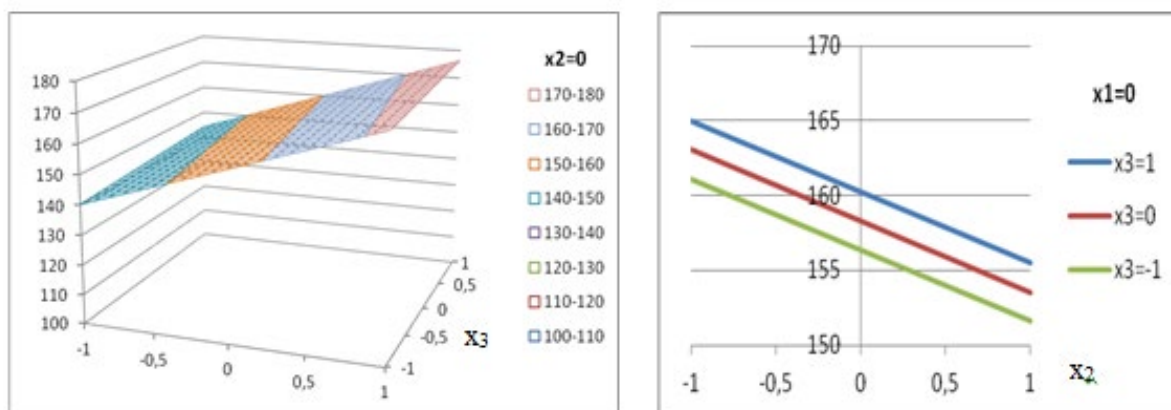


Рисунок 8. График зависимости оборота почвенного пласта от параметров комбинированного корпуса плуга

Figure 8. Graph of the dependence of the turnover of the soil layer on the parameters of the combined plow body

Из анализа модели (8) следует (рисунок 9): определяющим образом на процесс продольного перемещения почвенной массы оказывает влияние изменения угла наклона, менее заметное — изменение угла атаки; несущественное — изменение угла поворота отвала (по абсолютной величине: $b_2 > b_1 > b_3$). При этом с ростом угла наклона и угла поворота отвала продольное перемещение почвенной массы уменьшается, а с ростом угла атаки — повышается ($b_1, b_3 > 0$; $b_2 < 0$); заметное влияние на изменение поперечного перемещения почвенной массы оказывает двойное взаимодействие факторов x_1 и x_2 .

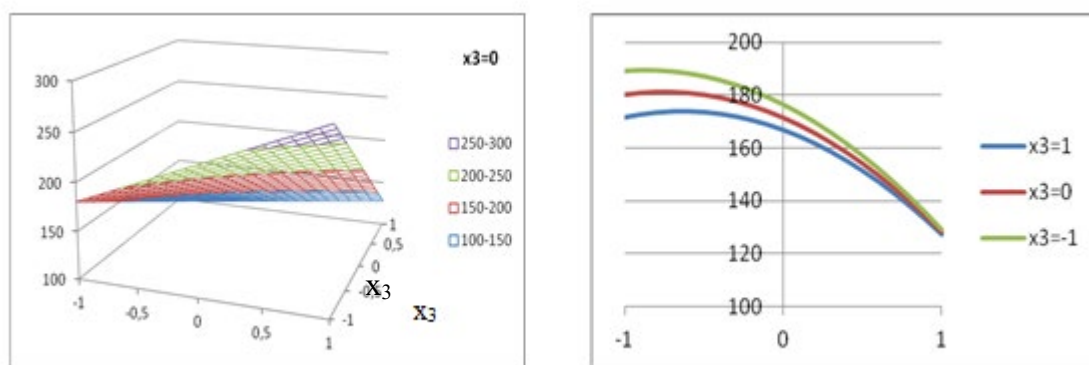


Рисунок 9. График зависимости поперечного перемещения почвенной массы от параметров комбинированного корпуса плуга

Figure 9. Graph of the dependence of the transverse movement of the soil on the parameters of the combined plow body

Определим оптимальные параметры комбинированного корпуса плуга, обеспечивающие полный оборот почвенного пласта и его сохранность в виде сплошной ленты. Для этого необходимо обеспечить поворот почвенного пласта на угол неустойчивого равновесия (145°), далее, по достижении данного угла поворота, целостный почвенный пласт полностью оборачивается под действие силы тяжести. При этом для обеспечения целостности (сохранности) почвенного пласта необходимо не допускать его существенных деформаций, приводящих к разрушению пласта на отдельные куски (коэффициент деформации не более 1,62); уменьшить продольное перемещение почвенных частиц для снижения энергоёмкости процесса и увеличить продольное перемещение почвенных частиц для предотвращения осыпания почвы в борозду. Таким образом, необходимо решить следующую оптимизационную задачу:

$$y_1 = 414,4 + 136,2x_1 - 39x_2 + 8,2x_3 - 15,9x_1x_2 - 5,85x_2x_3 \rightarrow \min$$

$$y_2 = 2,15 + 0,52x_1 - 0,21x_2 \rightarrow \min$$

$$y_3 = 158,6 + 16,05x_1 - 4,75x_2 + 1,95x_3 \rightarrow \max$$

$$y_4 = 171,7 + 33x_1 - 59,1x_2 - 4,8x_3 - 17,4x_1x_2 - 2,98x_2x_3 \rightarrow \max$$

$$\text{Ограничения: } -1 \leq x_1 \leq 1, -1 \leq x_2 \leq 1, -1 \leq x_3 \leq 1, y_2 \leq 1,62, y_3 \geq 145$$

Численное решение данной задачи при помощи надстройки «Поиск решения» в Excel: $x_1 = -0,82$; $x_2 = 0,48$; $x_3 = 1$. Используя выражение: $X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{I_i}$, где X_i , x_i — соответственно нормализованное и натуральное значения фактора; I_i — интервал варьирования; x_{i0} — натуральное значение основного уровня, найдём оптимальные значения комбинированного корпуса плуга, при которых обеспечиваются полный оборот и сохранность почвенного пласта: угол атаки (α) 36^0 ; угол наклона (β) 15^0 ; угол поворота отвала (θ) 20^0 .

4. Заключение

Проведено экспериментальное исследование комбинированного корпуса плуга для лесных площадей, который может входить в конструкции многофункциональных (комбинированных) орудий, разрабатываемых в рамках рациональной ресурсосберегающей технологии лесовосстановительных работ, исключаяющей корчёвку пней.

Получены регрессионные модели влияния технологических параметров орудия, таких как угол атаки, угол наклона дискового корпуса и угол поворота отвала на качественные показатели его работы (оборот и сохранность почвенного пласта). Установлено, что наибольшее влияние на вышеназванные характеристики работы орудия оказывает угол атаки, менее значимое — угол наклона дискового корпуса, третьестепенное — угол поворота отвала. При этом угол атаки и угол наклона дискового корпуса оказывают противоречивое влияние на процесс обработки. Так, увеличение угла атаки и снижение угла наклона дискового корпуса, с одной стороны, повышают оборот почвенного пласта, с другой — снижают его сохранность.

Определены оптимальные параметры комбинированного корпуса плуга [угол атаки (α) 36^0 ; угол наклона (β) 15^0 ; угол поворота отвала (θ) 20^0], обеспечивающие полный оборот почвенного пласта и его сохранность в виде сплошной ленты. Для этого необходимо обеспечить поворот почвенного пласта на угол неустойчивого равновесия (145^0), далее по достижении данного угла поворота целостный почвенный пласт полностью оборачивается под действие силы тяжести. При этом для обеспечения целостности (сохранности) почвенного пласта необходимо не допускать его существенных деформаций, приводящих к разрушению пласта на отдельные куски (коэффициент деформации не более 1,62).

Список литературы

1. Зимарин С. В. Дисковый корпус плуга с гиперболоидным отвалом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1 (13-1). С. 47—49. DOI: 10.15393/j2.art.2016.3201.
2. Лягоскин М. А., Алиев Н. В., Дручинин Д. Ю. Особенности выполнения основной обработки почвы на вырубках // Молодой учёный. 2017. № 14 (148). С. 92—96.

3. Modeling of double action disc harrow draft force based on tillage depth and forward speed / I. Ranjbar, M. Rashidi, H. F. Lehmalı [et al.] // Middle east journal of scientific research. 2013. Vol. 17, no. 8. P. 1061—1067.
4. Karmakar S., Kushwaha R. L. Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics // Transactions of the ASAE. 2005. Vol. 48, no. 3. P. 923—932.
5. Modeling the effect of weight and forward speed on the performance of disc plough / O. M. Olatunji, A. J. Akor, B. A. Ozogu [et al.] // Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. 2009. Vol. 8, no. 2. P. 130—149. Text. Image: electronic.
6. Sharifat K. Modeling soil movement by tillage tools // Canadian Biosystems Engineering. 2000. Vol. 42, no. 4. P. 165—172.
7. Патент на изобретение 2727834 С1, 24.07.2020 / С. В. Зимарин, М. В. Драпалюк, М. С. Хрипченко, И. В. Четверикова. Заявл. № 2019144354 от 24.12.2019.
8. Нартов П. С. Дисковые почвообрабатывающие орудия. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1972. 181 с.
9. Chaudhary A. Testing of tillage implements: disc plough, mouldboard plough and disc harrow. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.25608.67840.
10. Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years / M. G. Freitas [et al.] // Forest Ecology and Management. 2019. No. 438. P. 224—232. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.024.
11. Зимарин С. В., Четверикова И. В. К обоснованию параметров корпуса дискатора для нераскорчёванных вырубков // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 3. С. 97—110. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5382.
12. Зимарин С. В., Хрипченко М. С., Четверикова И. В. Исследование параметров новой конструкции мультиблока для ресурсосберегающего восстановления дубрав // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 118—133. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6263.
13. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий / С. В. Малюков, М. Н. Лысыч, Л. Д. Бухтояров [и др.] // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 2 (50). С. 128—141.
14. Soil-cutting simulation and parameter optimization of rotary blade's three-axis resistances by response surface method / G. Zhang, Z. Zhang, M. Xiao [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. P. 164.
15. Laboratory studies of extinguishing a forest ground fire with soil / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin [et al.] // AIP Conference Proceedings. Series 2: Proceedings of the II International Conference on Advances in Materials, Systems and Technologies, CAMSTech-II 2021. 2022. P. 030031.
16. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain / K. Uotila K. [et al.] // Silva Fenn. 2010. Vol. 44, no. 3. P. 511—524.

References

1. Zimarin S. V. The disc plough body with a hyperboloidal dump. *Relevant directions of scientific research of the 21st century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 2-1 (13-1), pp. 47—49. doi: 10.15393/j2.art.2016.3201. (In Russ.)
2. Lyagoskin M. A., Aliev N. V., Druchinin D. U. Particularities of basic soil cultivation on cutting-down. *Young scientist*, 2017, no. 14 (148), pp. 92—96. (In Russ.)
3. Ranjbar I., Rashidi M., Lehmalı H. F., Mirmoradi M., Abdolalizadeh E. Modeling of double action disc harrow draft force based on tillage depth and forward speed. *Middle east journal of scientific research*, 2013, vol. 17, no. 8, pp. 1061—1067.

4. Karmakar S., Kushwaha R. L. Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics. *Transactions of the ASAE*, 2005, vol. 48, no. 3, pp. 923—932.
5. Olatunji O. M., Akor A. J., Ozogu B. A., Burubai W., Davies R. M. Modeling the effect of weight and forward speed on the performance of disc plough. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 2009, vol. 8, no. 2, pp. 130—149. Text. Image: electronic.
6. Sharifat K. Modeling soil movement by tillage tools. *Canadian Biosystems Engineering*, 2000, vol. 42, no. 4, pp. 165—172.
7. Zimarin S. V., Drapalyuk M. V., Hrypchenko M. S., Chetverikova I. V. Patent of invention 2727834 Urgent1, 24.07.2020. Request apostille 2019144354 from 24.12.2019. (In Russ.)
8. Nartov P. S. Disk tillage tools. Voronezh, VSU Publishing House, 1972. 181 p. (In Russ.)
9. Chaudhary A. *Testing of tillage implements: disc plough, mouldboard plough and disc harrow*, 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.25608.67840.
10. Freitas M. G. [et al.]. Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years. *Forest Ecology and Management*, 2019, no. 438, pp. 224—232. doi: 10.1016/j.foreco.2019.02.024.
11. Zimarin S. V., Chetverikova I. V. To substantiate the parameters of the discator housing for uncorrected cuttings. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 97—110. doi: 10.15393/j2.art.2020.5382. (In Russ.)
12. Zimarin S. V., Khripchenko M. S., Chetverikova I. V. Investigation of parameters of a new multiblock design for resource-saving restoration of oak forests. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 118—133. doi: 10.15393/j2.art.2022.6263. (In Russ.)
13. Malyukov S. V., Lysych M. N., Bukhtoyarov L. D., Pozdnyakov E. V., Gnusov M. A., Shavkov M. V., Petkov A. F. Analysis of disk working bodies of forest tillage tools. *Forestry Journal*, 2023, vol. 13, no. 2 (50), pp. 128—141. (In Russ.)
14. Zhang G., Zhang Z., Xiao M., Bartos P., Bohata A. Soil-cutting simulation and parameter optimization of rotary blade's three-axis resistances by response surface method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, p. 164.
15. Gnusov M. A., Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu., Zimarin S. V. Laboratory studies of extinguishing a forest ground fire with soil. *AIP Conference Proceedings. Series 2: Proceedings of the II International Conference on Advances in Materials, Systems and Technologies, CAMSTech-II 2021*, 2022, p. 030031.
16. Uotila K. [et al.]. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. *Silva Fenn.*, 2010, vol. 44, no. 3, pp. 511—524.