

Э. В. Дыба, А. М. Хартанович

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com*

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВАЛКОВАНИЯ СУРЕПИЦЫ ГРЕБЕНЧАТЫМИ ГРАБЛЯМИ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Аннотация. В статье представлены исследования по оценке качества валкования сурепицы гребенчатыми граблями ГВГ-9,5 методом регрессионного анализа.

Ключевые слова: исследования, эксперимент, анализ, скорость, угол атаки, частота вращения, ротор, технология, показатели, урожайность, корма, сурепица, валок, проба.

E. V. Dyba, A. M. Khartanovich

*RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com*

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SURPITSA RAKE ROLLING BY REGRESSION ANALYSIS

Abstract. The article presents studies to assess the quality of raking of marmoset with rakes of GWG-9.5 by regression analysis.

Keywords: research, experiment, analysis, speed, angle of attack, frequency of injection, rotor, technology, indicators, yield, feed, marmot, roll, sample.

Введение

В результате теоретических исследований [1, 2] были получены аналитические выражения, позволяющие определить основные конструктивные и кинематические параметры рабочих органов граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5. Однако теоретические исследования не позволяют сделать вывод о том, что грабли-валкователи будут обеспечивать чистый подбор скошенной массы, так как при теоретическом исследовании невозможно учесть все факторы, влияющие на процесс. Кроме того, при теоретическом обосновании параметров граблей были приняты некоторые допущения. Поэтому необходимо проведение экспериментальных исследований.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось проверить достоверность полученных математических выражений, исследовать влияние основных конструктивных и кинематических параметров граблей-валкователей на качество валкования скошенной массы сурепицы, определить потери скошенной массы.

Экспериментальные исследования проводились в рамках договора от 21.04.2025 г. № 28 о научно-техническом сотрудничестве в производственных условиях с ОАО «Сейловичи». Исследовали влияние поступательной скорости движения агрегата, угловой скорости вращения ротора и угла атаки роторов на качество валкования скошенной массы сурепицы.

Основная часть

Влияние поступательной скорости движения агрегата, угловой скорости вращения ротора и угла атаки роторов на качество валкования скошенной массы сурепицы определяли, используя опытный образец граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5 (рисунок 1). Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5 предназначены для оборачивания, вспушивания и сгребания в валок сена,



Рисунок 1 – Опытный образец граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5

соломы и провяленной зеленой массы (бобовых и злаковых трав) [3–6]. Грабли агрегируются с сельскохозяйственными тракторами тягового класса 2, имеющими ВОМ частотой вращения $9,0 \text{ с}^{-1}$. Вид климатического исполнения У1 по ГОСТ 15150-69.

Грабли (рисунок 2) состоят из рамы 1, дышла 2, двух стрел поворотных 3, двух секций с гребенчатыми роторами 4, двух колес ходовых 5, навески 6, двух талрепов 7, кронштейнов 8, гидрооборудования 9, электрооборудования 10, тормозной системы 11 [4, 6].

Процесс сгребания (валкования) скошенной растительной массы осуществляется следующим образом – при движении граблей по проколу роторы с гребенками правой и левой секций,

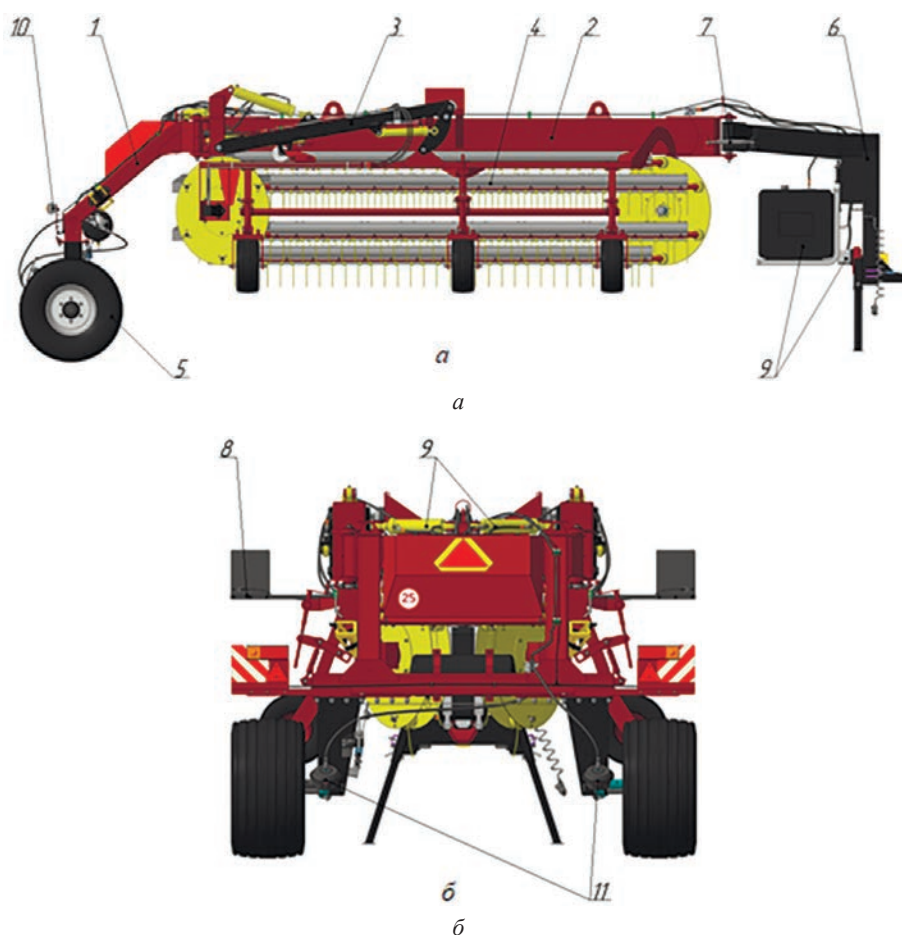


Рисунок 2 – Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5: а – вид сбоку; б – вид сзади; 1 – рама; 2 – дышло; 3 – стрела (поворотная); 4 – секция (с гребенчатым ротором); 5 – колесо ходовое; 6 – навеска; 7 – талреп; 8 – кронштейн; 9 – гидрооборудование; 10 – электрооборудование; 11 – тормозная система

вращаясь от привода гидромоторов под углом к направлению движения, подхватывают скошенную массу. Благодаря параллелограммному механизму рабочих секций зубья гребенок, совершая поступательное движение, перемещают подхваченную массу вдоль рабочей зоны, не давая ей при этом соприкоснуться с почвой до тех пор, пока масса не переместится в зону формирования валка. В процессе перемещения растительной массы в зону формирования валка рабочие органы граблей осуществляют их активное вспушивание и отделение от примесей (земли, пыли, камней и т. д.), обеспечивая таким образом «чистый» и хорошо продуваемый ветром валок.

Перечень основных средств измерений, применяемых при исследованиях, представлены в таблице 1. Приборы, определенные стандартными методиками, в таблице не приведены.

Таблица 1 – Перечень основных средств измерений, применяемых при исследованиях

Определяемая величина	Средство измерений	Погрешность
Температура воздуха, °С	Термометр ТЛ-40 ГОСТ 9177-74	±0,5
Относительная влажность воздуха, %	Психрометр	±2
Время, с	Секундомер типа СДС ГОСТ 5072-79	±0,2
Масса, кг, г	Весы типа ВНЦ, ВЛК-500Г-М Динамометр типа ДПУ	±0,1 ±10
Линейные размеры, мм	Линейка измерительная ГОСТ 427-75	±1
	Рулетка типа ЗПТЗ	±1
	Рулетка измерительная РИ-10-3-Д, кл. т. 3	±1
	Колесо измерительное INGCО электронное дорожное (HDMW23)	±0,5
Влажность, %	Инфракрасный анализатор кормов AgriNIR	±2,0
	Комбинированный прибор TESTO-44	±2,0
Частота вращения ротора, с ⁻¹	Тахометр ручной ДО-01Р	±0,5

Для изучения комплексного влияния конструктивных и кинематических параметров граблей-валкователей на качество валкования скошенной массы сурепицы применили методы физического моделирования и математической теории планирования эксперимента.

Основной задачей планирования эксперимента является получение статистической математической модели объекта исследования в виде полинома (уравнения регрессии) чаще всего первой или второй степени [7–12]. Уравнение регрессии позволит оценить влияние воздействующих факторов x_i на объем образованной диском канавки y :

$$y = b_0 + \sum_i^k b_i X_i + \sum_{i>j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=j}^k b_{ij} X_i^2, \quad (1)$$

где y – параметр оптимизации; X_i, X_j – кодовое обозначение факторов; b_0 – свободный член, равный выходу при $x_i = 0$; b_i – коэффициенты регрессии соответствующих факторов, указывающие на влияние того или иного фактора на изучаемый объект; b_{ij} – коэффициент регрессии соответствующих факторов двойного взаимодействия.

Чтобы устранить корреляцию между коэффициентами регрессии и трудности в оценке расчетных значений функции отклика, пользуются кодированными значениями факторов [7–12]

$$X_i = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_{i0}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

где $\bar{X}_i$ – натуральное значение i -го фактора; $\bar{X}_{i0}$ – натуральное значение фактора на нулевом уровне; ε_i – значение интервала варьирования фактора.

$$\varepsilon_i = \frac{\bar{X}_i^B - \bar{X}_i^H}{2}, \quad (3)$$

где $\bar{X}_i^B, \bar{X}_i^H$ – соответственно верхняя и нижняя границы изменения величины X_i .

При планировании эксперимента необходимо выбрать параметр оптимизации, т. е. параметр, по которому оценивается исследуемый объект и который связывает воедино все факторы. Правильно выбранный критерий оптимизации дает четкое представление о цели работы. Поэтому задача состоит в том, чтобы при помощи создания математической модели минимизировать критерий оптимизации путем соответствующего подбора факторов, действующих на изучаемый объект. Необходимо стремиться, чтобы параметр оптимизации выражался одним числом, имел ясный физический смысл и количественную оценку. В нашем случае критерием оптимизации выбран коэффициент вариации (v , %), являющийся основным показателем качества работы граблей гребенчатого типа и характеризующий потери сгребаемой массы.

Главным условием, определяющим наиболее полное соответствие изучаемого процесса его математическому описанию, является правильный выбор факторов, влияющих на процесс, а также областей варьирования, соответствующих условиям работы, с учетом работоспособности конструкции и возможности конструктивного исполнения рабочего органа [9]. В процессе валкования сурепицы влияние на величину потерь оказывают следующие факторы: поступательная скорость движения агрегата (ϑ_a , м/с), угловая скорость вращения ротора (ω , с^{-1}) и угол атаки роторов (ζ , град.). Уровни варьирования факторов были определены из следующих соображений:

- пределы изменения поступательной скорости движения агрегата, исходя из агротехнических требований, предъявляемых к валкованию кормов, ограничены максимальной и минимальной величинами ($\vartheta_{a\min} = 1,67$, м/с и $\vartheta_{a\max} = 3,33$ м/с). Изменение скорости движения агрегата осуществлялось непосредственно механизатором и контролировалось по показаниям спидометра энергосредства;

- пределы изменения угловой скорости вращения ротора (определены, исходя из технической характеристики граблей, а также рекомендаций по валкованию кормов граблями гребенчатого типа) ограничены максимальной и минимальной величинами ($\omega_{\min} = 1,02 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_{\max} = 2,02 \text{ с}^{-1}$). Регулировка угловой скорости вращения роторов производится с помощью двух регуляторов А (рисунок 3). При закручивании регуляторов (по часовой) угловая скорость вращения увеличивается, при откручивании (против часовой) – уменьшается;

- пределы изменения угловой скорости вращения роторов контролировались при помощи прибора ДО-01Р (рисунок 4);

- пределы изменения угла атаки роторов определены шириной захвата граблей, которая составляет 9,5 м и имеет возможность регулировки с помощью конструктивных особенностей граблей, ограничены максимальной и минимальной величинами ($\zeta_{\min} = 80^\circ$ и $\zeta_{\max} = 120^\circ$).

Пределы изменения угла атаки роторов контролировали с помощью угломера Vorel 18798 (рисунок 5).

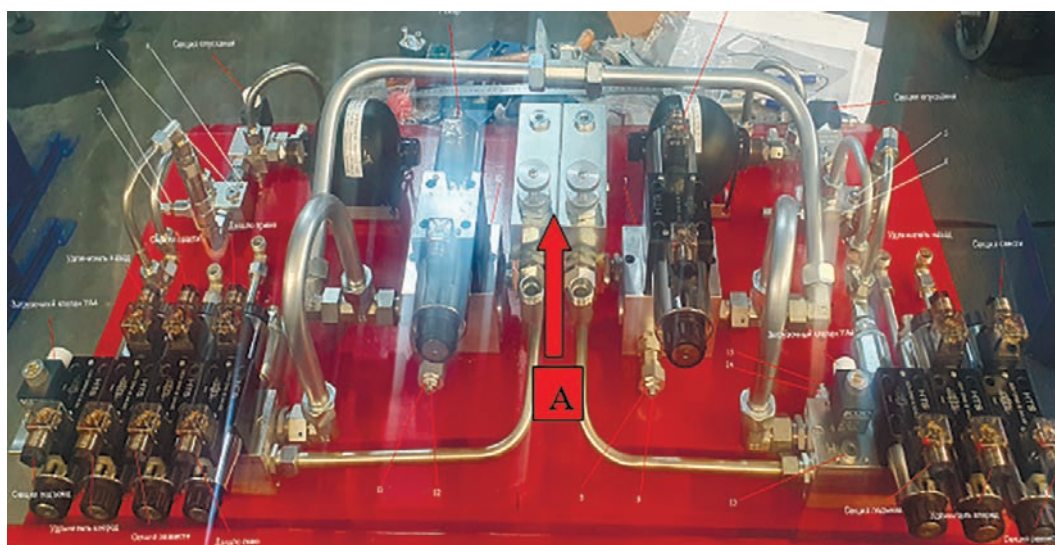


Рисунок 3 – Схема гидрооборудования граблей



Рисунок 4 – Контроль пределов изменения угловой скорости вращения ротора



Рисунок 5 – Регулировка угла атаки роторов

Уровни варьирования факторов и кодовые обозначения переменных приведены в таблице 2.

Для обработки данных многофакторного эксперимента в конечном итоге было решено использовать некомпозиционный план по методу Бокса – Бенкина. Повторность опытов – трехкратная. Некомпозиционные планы для трехфакторного эксперимента требуют постановки меньшего числа опытов по сравнению с соответствующими ротатбельными центральными композиционными планами второго порядка. Основой эксперимента является матрица, содержащая условия проведения всех опытов в соответствии с намеченным планом.

Таблица 2 – Уровни варьирования факторов и их кодовое обозначение

Наименование показателя	Варьируемые факторы		
	ϑ_a , поступательная скорость движения агрегата, м/с	ω , угловая скорость вращения ротора, c^{-1}	ζ , угол атаки роторов, град.
Кодовое обозначение факторов	x_1	x_2	x_3
Основные уровни ($X_i = 0$)	2,5	1,52	100
Интервалы варьирования	0,83	0,5	20
Нижние уровни ($X_i = -1$)	1,67	1,02	80
Верхние уровни ($X_i = +1$)	3,33	2,02	120

В данном плане выбранные переменные варьируются на трех уровнях: +1, 0, –1 (таблица 3), что упрощает и удешевляет эксперимент по сравнению с центральными композиционными ротатбельными планами второго порядка, где предусматривается использование каждого фактора на пяти уровнях [13–15]. Матрица плана Бокса – Бенкина представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица плана Бокса – Бенкина

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
1	1	–1	–1	0	1	0	0	1	1	0
2	1	1	–1	0	–1	0	0	1	1	0
3	1	–1	1	0	–1	0	0	1	1	0
4	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
5	1	–1	0	–1	0	1	0	1	0	1
6	1	1	0	–1	0	–1	0	1	0	1
7	1	–1	0	1	0	–1	0	1	0	1
8	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
9	1	0	–1	–1	0	0	1	0	1	1
10	1	0	1	–1	0	0	–1	0	1	1
11	1	0	–1	1	0	0	–1	0	1	1

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
12	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sum_{\text{кв}}$	15	8	8	8	4	4	4	8	8	8

Обработка результатов экспериментальных данных многофакторного эксперимента позволяет получить точную математическую формулу зависимости результирующей функции от трех выбранных наиболее значимых факторов. Построенные поверхности отклика 3D и их сечения позволят сделать подробный анализ результатов эксперимента и подготовить научные выводы по результатам экспериментальных исследований [9].

В нашем случае факторное пространство описывается уравнением регрессии в виде полинома второй степени, который имеет следующий вид [12]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (4)$$

Таким образом, по результатам расчета было получено уравнение регрессии второго порядка

$$y_{\text{п.к.}} = 1,673 + 0,386x_1 + 1,611x_2 - 0,213x_3 + 1,395x_1^2 + 1,122x_2^2 + 0,7x_3^2 - 0,207x_1x_3 + 0,34x_2x_3. \quad (5)$$

Следующим этапом работы является проверка математической модели на адекватность. Адекватность уравнения регрессии по плану Бокса – Бенкина проводили путем анализа расчетной среднеквадратичной дисперсии без проверки математической модели на адекватность [13, с. 14].

Экспериментальное значение критерия Фишера рассчитаем по формуле

$$F_3 = \frac{\max(S_{\text{воспр}}^2; S_{\text{ад}}^2)}{\min(S_{\text{воспр}}^2; S_{\text{ад}}^2)}, \quad (6)$$

где $S_{\text{воспр}}^2$ – дисперсия воспроизводимости; $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum S_j^2}{n}. \quad (7)$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{5,454}{3} = 1,818.$$

Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости определяется по формуле

$$f_{\text{воспр}} = N(n-1), \quad (8)$$

где N – число опытов на нулевом уровне (в данном случае $N = 15$); n – число повторности (в данном случае $n = 3$);

$$f_{\text{воспр}} = 15(3-1) = 30.$$

Дисперсию адекватности определяют по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n\phi}{N-B}, \quad (9)$$

где ϕ – сумма квадратов разности между средним опытным и расчетным значениями параметра оптимизации; B – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Суммы квадратов разности между средним опытным и расчетным значениями параметра оптимизации определяем для каждого опыта по формуле

$$\Phi = \sum_{n=1}^k (y_{\text{сп}} - y_{\text{рас}})^2. \quad (10)$$

Расчетное значение параметра y в j -м опыте рассчитывается по формуле

$$y_j^p = b_0 + b_1 X_{1n} + b_2 X_{2n} + b_3 X_{3n} + b_{11} X_{1n}^2 + b_{22} X_{2n}^2 + b_{33} X_{3n}^2 + b_{12} X_{1n} X_{2n} + b_{13} X_{1n} X_{3n} + b_{23} X_{2n} X_{3n}. \quad (11)$$

Тогда

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{3 \cdot 9,692}{15 - 8} = 4,154. \quad (12)$$

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод о том, что полученное уравнение регрессии второго порядка адекватно, так как среднеквадратичное отклонение на нулевом уровне больше расчетного:

$$|S_{y0}^2| > |S_{\Delta U}^2| \rightarrow 4,154 > 1,818. \quad (13)$$

Поскольку $S_{\text{ад}}^2 > S_{\text{воспр}}^2$ ($4,154 > 1,818$), тогда

$$F_3 = \frac{4,154}{1,818} = 2,285. \quad (14)$$

Выбираем табличное значение критерия Фишера $F_{f \text{ числ}; f \text{ знач}; p}$, в котором на первом месте стоит число степеней свободы большей дисперсии, а на втором – число степеней свободы меньшей дисперсии, при доверительной вероятности $p = 0,95$.

$$F_{7; 30; 0,95} = 2,334. \quad (15)$$

Поскольку $F_{7; 30; 0,95} = 2,334 > F_3 = 2,285$, то полученное уравнение регрессии адекватно.

Для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодируем уравнение регрессии (5). Для этого найдем натуральные значения факторов, используя формулы (2) и (3).

Фактор поступательной скорости движения агрегата (ϑ_a , м/с)

$$x_1 = \frac{\vartheta_a - 2,5}{0,83}. \quad (16)$$

Фактор угловой скорости вращения ротора (ω , с⁻¹)

$$x_2 = \frac{\omega - 1,52}{0,5}. \quad (17)$$

Фактор угла атаки роторов (ζ , град.)

$$x_3 = \frac{\zeta - 100}{20}. \quad (18)$$

Подставив в уравнение (5) натуральные значения факторов x_1 , x_2 , x_3 , получим следующую функцию отклика в натуральных показателях:

$$y_{\text{п.к.}} = 39,253 - 8,413 \vartheta_a - 13,822 \omega - 0,381 \zeta + 2,025 \vartheta_a^2 + 4,488 \omega^2 + 0,002 \zeta^2 - 0,013 \vartheta_a \zeta + 0,034 \omega \zeta. \quad (19)$$

При анализе уравнения регрессий второго порядка (19) установлено, что оно имеет все члены переменных. Адекватность уравнений в кодированном виде при уровне значимости 0,05 %, говорит о том, что погрешность вычислений при реализации полученных моделей на практике в установленном диапазоне варьирования факторов не превысит 5 %.

На основании реализации эксперимента и проверки воспроизводимости опытов $G_3 = 0,289 \leq \leq G_{2; 15; 0,95} = 0,335$ получена полиномиальная адекватная $F_3 = 2,285 \leq F_{7; 30; 0,95} = 2,334$ модель влияния конструктивных и кинематических параметров граблей гребенчатого типа на качество валкования скошенной массы сурепицы. Уравнение (5) определяет характер и степень влияния факторов (x_1 , x_2 и x_3) на качество валкования. Графическая интерпретация уравнения регрессии представляет собой поверхности отклика (рисунки 6, 7, 8).

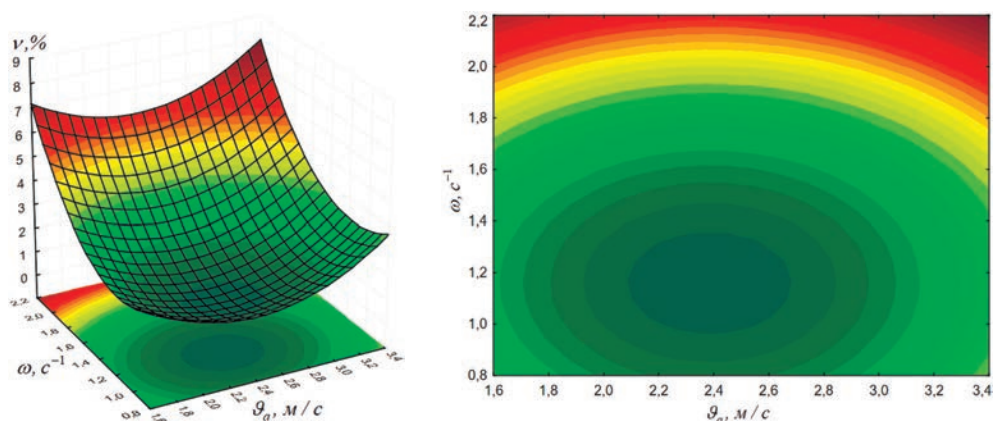


Рисунок 6 – Поверхность отклика и ее двумерное сечение $v = f(\theta_a; \omega)$

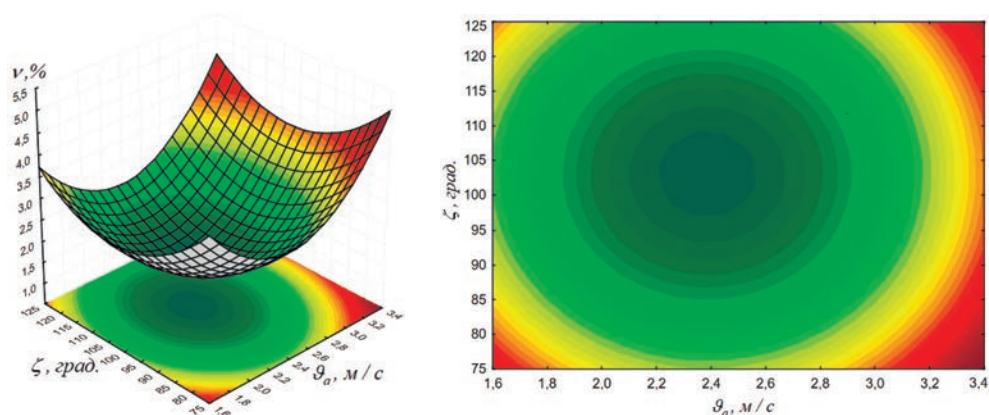


Рисунок 7 – Поверхность отклика и ее двумерное сечение $v = f(\theta_a; \zeta)$

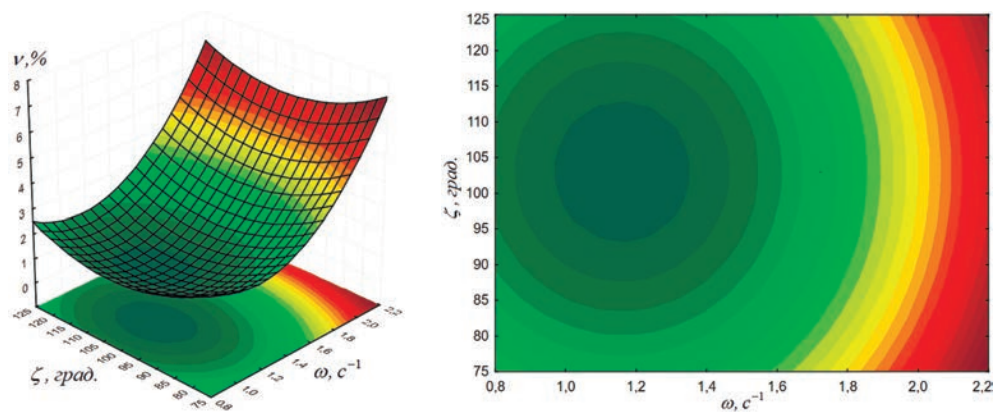


Рисунок 8 – Поверхность отклика и ее двумерное сечение $v = f(\omega; \zeta)$

Анализ полученного уравнения регрессии (19) и поверхностей отклика (рисунки 6–8) позволил выявить следующее. Вытянутость эллипса показывает преобладание одного фактора над другим, степень влияния его на показатель качества валкования сурепицы (потерь). Анализ двумерных сечений показывает, что центры эксперимента находятся в исследуемой зоне и расчетные данные согласуются с экспериментальными, что позволяет установить оптимальные параметры для различных сочетаний факторов [9, 16].

Для определения значений факторов, при которых функция (5) достигает экстремума (в данном случае минимума), необходимо взять частные производные по x_i и, приравняв к нулю, решить полученную систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_2} = 1,611 + 2,244x_2 + 0,34x_3; \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = -0,213 + 1,4x_3 - 0,207x_1 + 0,34x_2. \end{cases} \quad (20)$$

Затем полученные значения факторов подставляли в уравнение регрессии (19), определяли коэффициенты вариации и сравнивали полученные данные. Согласно проведенному анализу, рациональными параметрами граблей-валкователей гребенчатых, при которых обеспечивается качественное выполнение процесса валкования кормов с минимальными потерями, являются следующие значения: поступательная скорость движения агрегата $\vartheta_a = 2,4$ м/с, угловая скорость вращения ротора $\omega = 1,16$ с⁻¹ и угол атаки роторов $\zeta = 103^\circ$.

Заключение

В результате экспериментальных исследований подтверждены достоверность теоретических исследований и правильность выбора конструктивных и кинематических параметров граблей гребенчатого типа. Расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований не превышает 5 %. Обоснованы оптимальные конструктивные и кинематические параметры граблей-валкователей гребенчатых, обеспечивающие стабильную и качественную его работу: поступательная скорость движения агрегата $\vartheta_a = 2,4$ м/с, угловая скорость вращения ротора $\omega = 1,16$ с⁻¹ и угол атаки роторов $\zeta = 103^\circ$. Полученные уравнение регрессии (5) и поверхности отклика (рисунки 6–8) позволили выявить, что из варьируемых факторов наибольшее влияние на потери оказывает поступательная скорость движения агрегата, затем – угловая скорость вращения ротора и в меньшей мере – угол атаки роторов. Уравнение регрессии позволяет установить значение факторов.

Таким образом, мы определили значения факторов, при которых обеспечивается процесс валкования с наименьшим коэффициентом вариации для рассматриваемой культуры. Результаты исследований свидетельствуют, что обоснованные параметры и режимы работы граблей обеспечивают выполнение агротехнических требований к заготовке кормов.

Список использованных источников

1. Обзор и анализ конструкции граблей-валкователей гребенчатого типа / В. В. Миккульский, Э. В. Дыба, Л. И. Трофимович, П. В. Яровенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн., 2023. – Вып. 56. – С. 188–196.
2. Дыба, Э. В. Обоснование основных параметров граблей-валкователей гребенчатого типа ГВГ-9,5 / Э. В. Дыба, В. В. Миккульский // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. наука, 2022. – Вып. 55. – С. 57–65.
3. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Технические условия ТУ ВУ 100230575.522-2023 / разработ.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» // государственная регистрация № 069799 от 07.12.2023 г. – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 26 с.
4. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Руководство по эксплуатации ГВГ 00.00.000 РЭ / разработ.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 66 с.

5. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Паспорт ГВГ 00.00.000 ПС / разраб.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 8 с.
6. Обосновать параметры, разработать и освоить производство прицепных гребенчатых граблей-валкователей : отчет о НИОКР (заключ.) / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» ; рук. темы Э. В. Дыба. – Мн., 2023. – 295 с. – № ГР 20213721.
7. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов : учеб. пособие / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Ленинград : Колос, 1972. – 199 с.
8. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 338 с.
9. Хайлис, Г. А. Исследование сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – М. : Колос, 1994. – 169 с.
10. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г. Н. Веденяпин. – М. : Колос, 1973. – 199 с.
11. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
12. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
13. Христофорова, И. А. Проведение активного эксперимента при разработке состава шихты для производства керамических изделий : метод. указания / И. А. Христофорова. – Владимир : Владим. гос. ун-т, 2000. – 24 с.
14. Каледина, Н. Б. Влияние параметров печатного процесса на липкость краски / Н. Б. Каледина, Д. М. Медяк // Труды БГТУ. – Мн. : БГТУ, 2011. – № 9 (147). – С. 23–27.
15. Голубцова, Е. С. Влияние температуры и времени спекания, марки порошка и количества добавки диоксида натрия на теплопроводность нитрида алюминия / Е. С. Голубцова, Б. А. Каледин, Н. Б. Каледина // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 88–90.
16. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования : учеб.-метод. комплекс / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Мн. : БГАТУ, 2010. – 276 с.