

УДК 631.332

**В.М. Булгаков** , академік НААНУ, д-р техн. наук, **А.М. Борис** , інж.  
*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

**В.І. Василюк** , канд. техн. наук

*Відокремлений підрозділ “Ніжинський агротехнічний інститут” Національного університету біоресурсів і природокористування*

**М.В. Усенко** , канд. техн. наук

*Луцький національний технічний університет*

## Експериментальне дослідження руху мотоблока з садильною машиною на схилах

Обґрунтовано застосування розсадосадильної машини з механізмом поперечного переміщення садильних секцій. На основі багатofакторного експерименту визначено оптимальні значення факторів, при яких відхилення агрегату від заданого напрямку руху є мінімальним.  
**розсадосадильна машина, курсова стійкість, крутизна схилів**

**Постановка проблеми.** Однією з основних операцій з вирощування розсадних культур є їх садіння, якісне механізоване виконання якої вирішено в рівнинних умовах з застосуванням великогабаритної техніки. Механізація даної операції викликає певні труднощі в умовах схилів (до 12°), оскільки спостерігаються процеси порушення курсової стійкості агрегатів. Отже розробка агрегату для садіння розсади в умовах схилів є актуальною і важливою задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розсадосадильні машини СКН-6А, СРНМ-4 [5] призначені для роботи на рівнини. Застосування їх схилах призводить до відхилення від заданого напрямку руху і, відповідно, до неякісного виконання операції садіння розсади.

Найбільш перспективним є використання малогабаритної розсадосадильної машини з садильним апаратом дискового типу, яка агрегується з мотоблоком. Переваги даного агрегату, який обладнаний розробленим нами механізмом для пересування садильних секцій, описані в працях [2, 3, 4].

**Постановка завдання.** Визначення оптимальних значень факторів, при яких відхилення мотоблока з садильною машиною від заданого напрямку руху є мінімальним.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** При плануванні і проведенні багатofакторного експерименту користувались рекомендаціями Ю.П. Адлера [1].

Прийняли вихідним параметром відхилення (см) від заданого напрямку руху (нульової лінії) агрегату на поперечному схилі крутизною 12° (максимально для умов роботи даного агрегату), а вхідними факторами – вологість ґрунту ( $W$ , %) швидкість руху агрегату ( $V$ , м/с), глибину ходу сошника ( $h$ , см). Метою даних досліджень є визначення оптимальних значень вказаних факторів (в сфері збереження заданого напрямку руху агрегату на поперечному схилі і, відповідно, зберігання прямолінійності рядків рослин чи прямолінійного руху в міжрядді культур) при роботі на схилі крутизною до 12°.

Таким чином, маємо три кількісних фактори. Проведення повнофакторного експерименту при трьох факторах з трьома рівнями дослідження вимагає проведення 27 дослідів. Планування з застосуванням симетричних некомпозиційних планів Бокса-Бенкена дозволило зменшити кількість дослідів до 15.

Планування експериментального дослідження включало такі етапи:

- кодування факторів;
- складання таблиці факторів і рівнів варіювання;
- складання матриці планування;
- реалізація плану експерименту згідно з матрицею планування;
- складання рівняння регресії для визначення коефіцієнтів;
- оцінка значущості коефіцієнтів регресії;
- перевірка адекватності отриманої математичної моделі.

Спочатку закодували фактори для переведення натуральних значень у безрозмірні величини з метою побудови плану-матриці експерименту.

Таблиця 1 – Результати кодування факторів

Фактор	Натуральне позначення	Кодове позначення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання					
				Натуральні			Кодові		
				Верхній	Нижній	Нульовий	Верхній	Нижній	Нульовий
Вологість ґрунту $W$ , %	X1	x1	4	26	18	22	+1	-1	0
Швидкість руху агрегата $V$ , м/с	X2	x2	0,05	0,35	0,25	0,30	+1	-1	0
Глибина ходу сошника $h$ , см	X3	x3	2	10	6	8	+1	-1	0

Зв'язок між кодovими і натуральними значеннями факторів встановлюється залежністю:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (1)$$

де  $x_i$ ,  $X_i$  - відповідно кодове та натуральне значення  $i$ -го фактора;

$X_{i0}$  - натуральне значення  $i$ -го фактора на нульовому рівні;

$\Delta X_i$  - інтервал варіювання  $i$ -го фактора.

Нульовим вважається рівень, що займає центр інтервалу (середнє значення фактора). Результати кодування факторів наведені в таблиці 1.

Таким чином, програмою експериментальних досліджень передбачається вивчення даного питання у відповідності з планом в натуральних величинах факторів.

Для дослідження роботи експериментальної садильної машини на схилах до 12° (максимальний в даних дослідженнях і, відповідно, являє собою найбільший інтерес) застосували планування багатофакторного експерименту.

На основі таблиці 1 склали таблицю 2, в якій наведена план-матриця дослідів, значення вихідного параметру (відхилення від нульової лінії).

Таблиця 2 - План-матриця дослідів

№ дослідю	Значення кодованих факторів			Вихідний параметр $y$ , %/год.			Середнє арифметичне значення вихідного параметра,
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_{u_1}$	$y_{u_2}$	$y_{u_3}$	$\bar{y}_u$
1	1	1	0	4	4	4.5	4.167
2	-1	1	0	4	4.5	4	4.167
3	1	-1	0	7	6.5	6.5	6.667
4	-1	-1	0	5.5	5	5.5	5.333
5	1	0	1	8	7.5	7	7.5
6	-1	0	1	7	7	7.5	7.167
7	1	0	-1	4	3.5	4	3.833
8	-1	0	-1	3	3	3.5	3.167
9	0	1	1	7.5	7.5	7	7.333
10	0	-1	1	8	8.5	8.5	8.333
11	0	1	-1	3	3.5	3	3.167
12	0	-1	-1	4	4.5	4.5	4.333
13	0	0	0	3	3.5	3	3.167
14	0	0	0	3	3	3	3
15	0	0	0	3.5	2.5	3	3

Відхилення  $\Delta\bar{y}$  рахували від нульової лінії, яка була намічена безпосередньо перед початком руху (роботи) садильної машини на відстані 5 см від крайньої точки даної машини в нижню сторону схилу. Відстань 5 см була прийнята у відповідності з попередніми експериментами, згідно з якими це максимальна величина відхилення в найгірших умовах роботи садильного агрегату вниз по схилу.

Перевірка відтворюваності дослідів при однаковому числі повторюваностей для кожної точки плану проводиться за критерієм Кохрена, табличне значення якого позначимо  $G_{\text{табл}}(0,05; n; f_u)$ , де 0,05 означає 5 %-й рівень значущості (дорівнює  $1-\alpha$ , де  $\alpha$  – довірча ймовірність);  $n$  – число незалежних оцінок дисперсії (число дослідів);  $f_u = m_0 - 1$  – число ступенів вільності кожної оцінки, тут  $m_0$  – число повторюваностей.

Процес відтворюваний за умови:

$$G \leq G_{\text{табл.}}(0,05; n; f_u), \quad (2)$$

де

$$G = \frac{S_{u\text{max}}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2}$$

Нелінійний характер очікування функцій відгуку в області факторного простору поданий у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (3)$$

Коефіцієнти регресії після реалізації плану експерименту визначено за такими формулами:

$$b_0 = 0,33333 \sum_{j=1}^n y_j - 0,16667 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 y_j ; \quad (4)$$

$$b_i = 0,08333 \sum_{j=1}^n x_{ij} y_j ; \quad (5)$$

$$b_{ii} = 0,125 \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 y_j + 0,0625 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 y_j - 0,16667 \sum_{j=1}^n y_j ; \quad (6)$$

$$b_{ir} = 0,25 \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{rj} y_j ; \quad (7)$$

де  $j$  – номер дослідів в матриці планування;  
 $n$  – кількість дослідів в матриці планування;  
 $y_j$  – значення функції відгуку в  $j$ -му досліді;  
 $k$  – кількість факторів;  
 $x_{ij}, x_{rj}$  – кодовані значення  $i$ -го чи  $r$ -го фактору в  $j$ -му досліді;  
 $i, r$  – номери факторів.

Дисперсії коефіцієнтів регресії та їх коваріації визначено за формулами:

$$S_{b_0}^2 = 0,33333 S_y^2 ; \quad (8)$$

$$S_{b_i}^2 = 0,08333 S_y^2 ; \quad (9)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = 0,1875 S_y^2 ; \quad (10)$$

$$S_{b_{ir}}^2 = 0,25 S_y^2 ; \quad (11)$$

$$\text{cov}_{b_0 b_{ii}} = -0,16667 S_y^2 ; \quad (12)$$

$$\text{cov}_{b_{ii} b_{rr}} = 0,0625 S_y^2 ; \quad (13)$$

Значимість коефіцієнтів регресії перевіряли шляхом порівнювання абсолютної величини цих коефіцієнтів з їх довірчими інтервалами. Довірчі інтервали розраховували згідно з формулами:

$$\Delta b_0 = t_{0,05;f_1} S_{b_0} ; \quad (14)$$

$$\Delta b_i = t_{0,05;f_1} S_{b_i} ; \quad (15)$$

$$\Delta b_{ir} = t_{0,05;f_1} S_{b_{ir}} ; \quad (16)$$

$$\Delta b_{ii} = t_{0,05;f_1} S_{b_{ii}} ; \quad (17)$$

де  $t_{0,05;f_1}$  – табличне значення критерію Ст'юдента при 5%-му рівні значущості та  $f_1 = n_0 - 1$  – числа ступенів вільності дисперсії відтворюваності ( $n_0$  – кількість дослідів у центрі плану).

Коефіцієнт регресії вважали статистично значущим, коли його абсолютна величина більша довірчого інтервалу або рівна йому. Незначущі коефіцієнти видаляли із моделі.

Перевірку адекватності рівняння проводили за допомогою  $F_f$  – критерію Фішера. Адекватність отриманої моделі матиме місце, якщо розрахункове значення критерію  $F_{f_2;f_1}^{розп.}$  менше табличного для прийнятого рівня значимості:

$$F_{f_2;f_1}^{\text{розр.}} \leq F_{0,05;f_2;f_1}^{\text{табл.}}, \quad (18)$$

де  $F_{0,005;f_2;f_1}^{\text{розр.}}$  – табличне значення критерію Фішера при 5%-му рівні значущості і ступенях вільності дисперсії неадекватності  $f_2$  та дисперсії відтворюваності  $f_1$ .

$f_2 = n - k'$  – число ступенів вільності дисперсії неадекватності з урахуванням числа  $k'$  залишених коефіцієнтів регресії (у тому числі і  $b_0$ ).

Розрахункове значення критерію Фішера становить:

$$F_{f_2;f_1}^{\text{розр.}} = \frac{S_{\text{неад.}}^2}{S_y^2}, \quad (19)$$

де  $S_{\text{неад.}}^2$  – дисперсія неадекватності, яка визначена з  $f_2$  - числом ступенів вільності;

$S_y^2$  – дисперсія відтворюваності експерименту, яка визначена з  $f_1$  - числом ступенів вільності.

Згідно з матрицею планування експерименту, кількість дослідів на нульовому рівні рівна трьом. Це дозволило використати для визначення дисперсії відтворюваності експерименту таку формулу:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (20)$$

де  $u$  – номер дослідів в центрі плану;

$y_{0u}$  – значення функції відгуку в  $u$ -му досліді в центрі плану;

$\bar{y}_0$  – середнє арифметичне значення функції відгуку отримане за результатами  $n_0$  дослідів у центрі плану;

Дисперсію неадекватності визначали, користуючись наступною формулою:

$$S_{\text{неад.}}^2 = \frac{SS_{\text{неад.}}}{f_2}. \quad (21)$$

При розрахунку дисперсії  $S_{\text{неад.}}^2$  враховували ту обставину, що при проведенні експериментів з усіх дослідів плану повторювався тільки один (дослід в центрі плану). Тому, сума квадратів  $SS_{\text{неад.}}$  дорівнює:

$$SS_{\text{неад.}} = n_0 (y'_{0'} - \bar{y}_0)^2 + \sum_{j=1}^{n-n_0} (y'_{j'} - y_j)^2, \quad (22)$$

де  $y'_{0'}$  – значення функції відгуку в досліді із центру плану, що розраховане за рівнянням регресії;

$y'_{j'}$  – значення функції відгуку в  $j$ -му досліді, що розраховане за рівнянням регресії;

$y_j$  – значення функції відгуку в  $j$ -му досліді, що визначене експериментально.

Обробка даних здійснювалася на ПЕОМ за допомогою розробленої у середовищі програми Mathcad 15 даних результатів трифакторного експерименту, згідно з трирівневим планом другого порядку Бокса-Бенкена, дозволила отримати рівняння регресії, що описує відхилення від заданого напрямку руху (нульової лінії) агрегату на поперечному схилі залежно від вологості ґрунту ( $W$ , %), швидкості руху агрегату ( $V$ , м/с) і глибини ходу сошника ( $h$ , см).

Перевірка відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена:

$$G = 0,167 \leq G_{\text{табл}}(0,05; n; f_u) = 0,335.$$

Оскільки розглядуваний процес відтворюваний, то вираховуємо коефіцієнти рівняння регресії.

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії проводилась за допомогою критерію Стьюдента, в програмі Mathcad 15. Критерій Стьюдента при 5%-му рівні значущості та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності  $f_1 = 2$  складає  $t(0,05; 2) = 4,3$ .

Довірчі інтервали коефіцієнтів регресії становлять:

$$\Delta b_0 = 0,239, \Delta b_j = 0,146, \Delta b_{jr} = 0,207, \Delta b_{jj} = 0,215. \quad (23)$$

В результаті розрахунку на ЕОМ одержано рівняння виду:

$$y = 3,056 + 0,292x_1 - 0,729x_2 + 1,979x_3 - 0,333x_1x_2 + 0,826x_1^2 + 1,201x_2^2 + 1,535x_3^2, \quad (24)$$

де  $x_1$  – кодоване значення вологості ґрунту;  $x_2$  – кодоване значення швидкості руху агрегату;  $x_3$  – кодоване значення глибини ходу сошника.

Перевірку адекватності отриманого рівняння регресії (24) проводили за допомогою критерію Фішера  $F_p$ .

Розрахункове значення  $F_p$  – критерію Фішера становило:  $F_p = 7,141$  при дисперсії неадекватності  $S_{\text{неад}}^2 = 0,054$  і дисперсії відтворюваності  $S_y^2 = 0,0092$ .

Табличне значення критерію Фішера при прийнятому 5%-му рівні значущості складало:

$$F_m(0,05; f_2; f_1) = 19,4, \quad (25)$$

де  $f_2$  – число ступенів вільності дисперсії неадекватності ( $f_2 = 7$ );  $f_1$  – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності ( $f_1 = 2$ ).

Оскільки  $F_p = 5,85 \leq F_{\text{табл}}(0,05; f_2; f_1) = 19,4$ , то отримана модель адекватна.

Остаточне рівняння із факторами в натуральному виді набуде вигляду:

$$y(W, V, h) = 79,713 - 1,6996W - 266,25V - 5,149h - 1,667W \cdot V + 0,052W^2 + 480,55V^2 + 0,383h^2. \quad (26)$$

За отриманим рівнянням регресії (26) було побудовано поверхню відгуку (рис.1), яка показує залежність відхилення агрегату  $\Delta \bar{y}$  від швидкості руху  $V$  і глибини занурення  $h$  сошника при сталій вологості ґрунту  $W$ .

Аналіз отриманої моделі і дослідні дані показали, що вплив фактору  $x_1$  (вологість ґрунту  $W$ ) на значення виходу малий і тому його можна стабілізувати на нульовому рівні, який є найбільш розповсюдженим при проведенні експериментів, тобто  $W \approx 22\%$ . Найбільш прийнятне з експлуатаційної точки зору глибина ходу сошника  $h \approx 9$  см.

Слід зазначити, що найкраще значення функції відгуку рівне 5 см, що відповідає практично паралельному руху агрегату відносно нульової лінії. Отже оптимальні значення факторів:  $W \approx 22\%$ ,  $h \approx 9$  см,  $V \approx 0,3$  м/с, при яких відхилення  $\Delta \bar{y}$  агрегату від заданого напрямку руху становить 5 см, що і показує наочно поверхня відгуку на рисунку 1

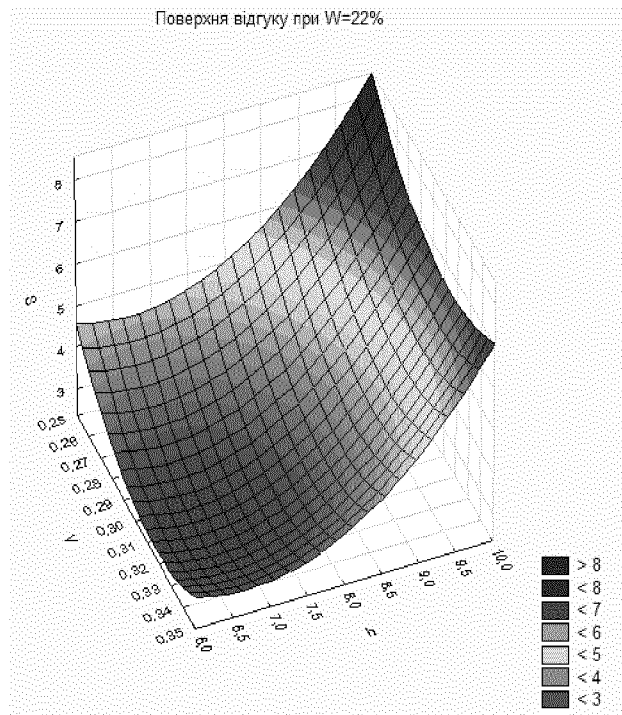


Рисунок 1 – Поверхня відгуку математичної моделі для садильного агрегату

**Висновок.** Експериментальні дослідження підтверджують, що основні параметри садильної машини забезпечують курсову стійкість експериментального агрегату при роботі на схилах крутістю до 12°.

### Список літератури

1. Адлер Ю.П. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее / Ю.П. Адлер. – М.: Знание, 1962. – 64 с.
2. Войтович В.В. Визначення сил і зміщень розсадосадильного агрегату при роботі на поперечних схилах / В.В. Войтович, М.В. Усенко // Наук. вісн. Нац. аграр. ун-ту: зб. наук. пр. – 2005. – № 92/2 - С. 41-46.
3. Войтович В.В. Визначення сил, що діють на сошник садильної машини з пересувними секціями / В.В. Войтович, М.В. Усенко // Зб. наук. праць ВДАУ. – 2005. – Вип. 23 - С. 156-162.
4. Пат. 77774 Україна, МКВ А01С 11/02, А01В 15/00. Розсадосадильна машина / Усенко М.В., Войтович В.В., Божидарник В.В.; Луцький державний технічний університет. – № 20041008388; заявл. 15.10.2004; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
5. Чубарин М.И. Рассадопосадочные машины / М.И. Чубарин. –М.: Машиностроение, 1972. –209 с.

*В.Булгаков, А.Борис, В.Василюк, М.Усенко*

#### **Експериментальное исследование движения мотоблока с посадочной машиной на склонах**

Обосновано применение рассадопосадочной машины с механизмом поперечного перемещения посадочных секций. На основе многофакторного эксперимента определены оптимальные значения факторов, при которых отклонения агрегата от заданного направления движения минимальны.

*V.Bulgakov, A.Boris, V.Vasiljuk, M. Usenko*

#### **Research of process of the deflection of movement direction on slopes of the motor-block with seedlings planting machine**

The employment of seedlings planting machine with the mechanism of transverse displacement of planting sections is substantiated. On the basis of multiple-factor experiment optimum values of factors by which the deflections of the unit of the set direction of movement are minimum are defined.

Одержано 12.10.12

