

Н. Д. Лепешкин, В. В. Миккульский, В. В. Мижурин

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: mehposev@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРОБЛЕНИЯ СЕМЯН ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ ВЫСЕВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ШИРОКОЗАХВАТНОЙ СЕЯЛКИ С ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ БУНКЕРОМ

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований дробления семян элементами высевающей системы механической широкозахватной сеялки с централизованным бункером. Определены оптимальные значения зазора между стенками посевного ящика и витками шнека, и частота вращения шнека, которые позволяют осуществлять высев посевного материала в соответствии с агротребованиями.

Ключевые слова: высев, зазор, шнек, частота вращения, дробление.

N. D. Lepeshkin, V. V. Mikulsky, V. V. Mizhurin

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: mehposev@mail.ru

RESULTS OF A STUDY OF SEED CRUSHING BY ELEMENTS OF THE SEEDING SYSTEM OF A MECHANICAL WIDE-CAPACITY SEEDER WITH A CENTRALIZED BUNKER

Abstract. The article presents the results of experimental studies of seed crushing by elements of the seeding system of a mechanical wide-grip seeder with a centralized bunker. The optimal values for the gap between the walls of the seed box and the auger turns, and the auger rotation frequency, which allow for sowing of seed material in accordance with agricultural requirements, have been determined.

Keywords: seeding, gap, auger, rotation speed, crushing.

Введение

По результатам проведенных исследований, представленных в статье данного сборника «Исследования основных факторов, влияющих на качество высева механическими сеялками с централизованным бункером», было установлено, что наиболее существенное влияние на показатели качества, и в первую очередь, показатель дробления семян, который может не полностью соответствовать требованиям агротехники, оказывают зазор между стенками посевного ящика и витком шнека и частота вращения шнека.

Цель исследований – установить оптимальные значения указанных факторов, при которых дробление семян элементами системы высева перспективной механической сеялки будет соответствовать требованиям агротехники.

Основная часть

Для определения дробления посевного материала в зависимости от зазора между стенками посевного ящика, витком шнека (k) и частотой вращения шнека (n) были проведены полнофакторные эксперименты на высевах семян пшеницы, ржи, ячменя и овса. Исследования проводились на экспериментальной установке, техническое описание и принцип работы которой даны в статье данного сборника «Экспериментальная установка и приборы для исследования процесса двухступенчатого дозирования посевного материала к сошникам механической сеялки с цен-

трализованным бункером». Для каждой культуры было проведено по 4 опыта с числом дублей (повторностей) – 4. С целью исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними неконтролируемыми факторами, в ходе экспериментальных исследований была выполнена рандомизация опытов, под которой понимается чередование отдельных опытов в случайном порядке. Это позволяет сравнивать результаты подобных опытов вследствие усреднения влияния эффектов неконтролируемых факторов. Процедура рандомизации опытов выполнялась с помощью таблиц случайных чисел [1], при этом последовательно по столбцам таблицы были выбраны числа, соответствующие порядковым номерам проводимых опытов.

Уровни и интервалы варьирования факторов, план-матрица проведения опытов, с реализацией всех возможных упорядоченных комбинаций факторов, а также результаты исследований на примере опытов по высеву семян пшеницы представлены в таблице 1.

Значения факторов на нулевом уровне были выбраны по результатам ранее проведенных поисковых исследований [2].

Кодирование уровней факторов осуществлялось по формуле [3]

$$x_i = \frac{C_i - C_{0i}}{i}, \quad (1)$$

где x_i – кодированное значение уровня фактора; $C_i - C_{0i}$ – натуральные значения фактора (соответственно его текущее значение и значение на нулевом уровне); i – натуральное значение интервала варьирования фактора.

$$i = \frac{C_i^B - C_i^H}{2}, \quad (2)$$

где C_i^B и C_i^H – значение фактора соответственно на верхнем и нижнем уровнях.

Построчные выборочные дисперсии (ошибка опыта) рассчитывались по результатам параллельных опытов по следующему выражению:

$$S^2\{y_u\} = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_u)^2}{m-1}, \quad (3)$$

где m – повторность опытов; $\bar{y}_u$ – среднее арифметическое значение выходного параметра для одного опыта при m повторностях.

$$\bar{y}_u = \frac{\sum_{j=1}^m y_{ij}}{m}. \quad (4)$$

После проведения опытов с помощью критерия Кохрена, который основан на законе распределения отношения максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий, выполнялась проверка гипотезы об однородности дисперсий по выражению

$$G = \frac{S^2\{y_u\}_{\max}}{\sum_{u=1}^{m_i} S^2\{y_u\}} \leq G(\alpha, f_k, k), \quad (5)$$

где $G(\alpha, f_k, k)$ – табличное значение критерия Кохрена для уровня значимости α , числа степеней свободы числителя $f_1 = m_n - 1$ и знаменателя $f_2 = k$.

Табличное значение критерия Кохрена выбиралось по таблице 1 и для чисел степеней свободы $f_1 = 3$ и $f_2 = 4$ $G(\alpha, f_k, k) = 0,68$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Расчетные значения критерия Кохрена представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты исследования дробления семян элементами высевашей системы на примере высева семян пшеницы

Журнал планирования эксперимента				Наименование и обозначение исследуемого объекта													
Элементы системы высева механической сеялки с централизованным бункером																	
Контролируемые переменные (факторы) (условн. обозн.)				k	n	Априорные сведения				Особые указания							
Единицы изм. параметров				мм	об/мин	Параметр оптимизации: показатель дробления семян (ν) Изменяющиеся факторы: зазор между стенками посевного ящика и винтом шнека (k) и частота вращения шнека (n)				Масса навески отбиралась по ГОСТ 12 036-85 Масса 1 000 семян – 44,1 кг/м ³ Влажность семян – 14,1 % Эквивалентный диаметр – 3,5 мм							
Верхний уровень				26	100												
Нижний уровень				10	60												
Основной уровень				18	80												
Интервал варьирования				8	20												
Матрица планирования 2 ² в кодowych обозначениях переменных																	
номер точки плана n	Порядок реализации j опытов				Контролируемые режимы, характеристики, факторы i				Результаты эксперимента и дисперсии отклонений параметра оптимизации от среднего значения						Проверка адекватности модели		
	m_1	m_2	m_3	m_4	x_0	$x_1(k)$	$x_2(n)$	x_1x_2									
1	4	1	3	2	+1	–1	–1	+1	y_1	y_2	y_3	y_4	$\hat{y}_n$	D_j	$\hat{y}_{n,l}$	$(\hat{y}_n - \hat{y}_{n,p})^2$	
2	1	3	2	4	+1	+1	–1	–1	1,060	1,200	1,310	1,190	1,190	0,010	1,246	0,003	
3	2	4	1	3	+1	–1	+1	–1	0,120	0,210	0,300	0,350	0,245	0,010	0,189	0,003	
4	3	2	4	1	+1	+1	+1	+1	1,420	1,320	1,660	1,450	1,463	0,020	1,407	0,003	
Коэффициенты b_j					0,80	–0,53	0,08	–0,06	Проверка однородности дисперсий						Проверка адекватности модели		
Проверка значимости коэффициентов																	
$D\{y\}$	0,0	$D\{b_j\}$		0,00	0,00				$\sum D_j$		0,05		$\sum (\hat{y}_n - \hat{y}_{n,p})^2$		0,01		
g	0,95	$s\{b_j\}$		0,03	0,03				D_{jmax}		0,02		$D_{ад}$		0,05		
u_b	12	t_i (критерий Стьюдента)		29,34	19,41	2,96	2,04	G (критерий Кохрена)						F (критерий Фишера)			
$t_{кр} = t_{g;u}$	2,179	$t_i - t_{кр}$		27,16	17,24	0,79	–0,13	a						k_1			
Δb_j	0,06	$t_i > t_{кр}$		>	>	>	<	$G_{кр} = G_{\alpha; m-1; n}$						$F_{кр}$			
Вывод ($ b_j > \Delta b_j$)				знач.	знач.	знач.	нет	$G - G_{кр}$						$F - F_{кр}$			
				$Вывод (G < G_{кр})$						дисперсии однородны			$Вывод (F < F_{кр})$				
Уравнение регрессии																	
Уравнение регрессии (линейная модель)																	
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$																	
$y = 0,798 - 0,528x_1 + 0,081x_2$																	

Таблица 2 – Результаты оценки воспроизводимости опытов по критерию Кохрена

Наименование культуры	Значение критерия	
	Расчетное	Табличное
Пшеница	0,43	0,68
Рожь	0,29	0,68
Ячмень	0,35	0,68
Овес	0,39	0,68

Из данных таблицы 2 видно, что условие (5) выполняется для каждого значения параметра оптимизации. Следовательно, гипотеза об однородности построчных выборочных дисперсий не противоречит экспериментальным данным, что позволяет вычислить дисперсию воспроизводимости опытов по выражению

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{u=1}^k S^2\{y_u\}}{k}, \quad (6)$$

где k – количество опытов; число степеней свободы $f_s = k(m_n - 1)$.

Поскольку дисперсии адекватны, то производим определение значений коэффициентов уравнений регрессии, которые являются оценками теоретических коэффициентов.

Уравнение регрессии имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i>j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (7)$$

где y – расчетное значение параметра оптимизации.

Для определения числовых значений коэффициентов уравнений регрессии использовали план эксперимента, в котором для любых двух столбцов матрицы выполняется следующее условие:

$$\sum_{i=1}^k x_{ui} x_{uj} = 0. \quad (8)$$

Коэффициенты уравнения регрессии определялись по выражениям

$$b_i = \sum_{u=1}^k x_{ui} \bar{y}_u / \sum_{u=1}^k x_{ui}^2, \quad (9)$$

$$b_0 = b'_0 - \bar{x}_i^2 \sum_{i=1}^n b_{ii}, \quad (10)$$

где i – номер строки расширенной матрицы планирования; k – количество опытов; $\bar{y}_u$ – среднее арифметическое результатов u -го опыта; b'_0 – оценка свободного члена квадратичного регрессионного уравнения (7), вычисленная для столбца с фиктивной переменной композиционного плана.

Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициент уравнения регрессии	Значение коэффициента			
	Пшеница	Рожь	Ячмень	Овес
b_0	0,798	0,813	0,795	0,789
b_1	–0,528	–0,531	–0,523	–0,525
b_2	0,081	0,049	0,053	0,084

В итоге регрессионные уравнения для параметра оптимизации каждой культуры принимают следующий вид:

– для пшеницы:

$$Y_1 = 0,798 - 0,528x_1 + 0,081x_2; \quad (11)$$

– для ржи:

$$Y_2 = 0,813 - 0,531x_1 + 0,049x_2; \quad (12)$$

– для ячменя:

$$Y_3 = 0,795 - 0,523x_1 + 0,053x_2; \quad (13)$$

– для овса:

$$Y_4 = 0,789 + 0,525x_1 + 0,084x_2. \quad (14)$$

Следующий этап обработки экспериментальных данных заключался в определении значимости полученных коэффициентов в уравнениях регрессии. Значимость коэффициентов уравнений проверялась по t -критерию Стьюдента согласно формуле определения доверительного интервала

$$\Delta b = \frac{t \cdot S^2\{y\}}{\sqrt{k}}. \quad (15)$$

Затем определялись доверительные интервалы соответствующих коэффициентов. Табличное значение t -критерия Стьюдента $t_{(\alpha, f_b)}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f_b = 12$ равно 2,179 [1]. Коэффициент уравнения регрессии статистически значим, если выполняется условие

$$|b_j| > \Delta b = t_{(\alpha, f_b)} S\{b_j\}, \quad (16)$$

где $t_{(\alpha, f_b)}$ – табличное значение t -критерия Стьюдента при уровне значимости α и числе степеней свободы f_b .

Согласно условию (16), все коэффициенты уравнений регрессии являются значимыми.

Проверка на адекватность уравнений регрессии (11) – (14) по экспериментальным данным проводилась по F -критерию Фишера.

Табличные значения критерия Фишера выбирались по таблице 1 для чисел степеней свободы f_b и $f_{ад}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Расчетные и табличные значения критерия Фишера представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Оценка адекватности уравнений регрессии по расчетным значениям критерия Фишера

Параметр оптимизации y по культурам	Пшеница	Рожь	Ячмень	Овес
Расчетное значение критерия Фишера F	4,18	3,31	3,49	4,20
Табличное значение критерия Фишера $F(\alpha, f_{ад}, f_b)$	4,75	4,75	4,75	4,75

Так как расчетные значения критерия Фишера не превышают табличные, то полученные уравнения адекватно описывают экспериментальные данные.

Для использования уравнений (11) – (14) в инженерных расчетах запишем их в раскодированном виде, заменив кодовое значение факторов x_1 и x_2 на натуральные переменные

$$x_{1j} = \frac{2x_j - (x_{j\max} + x_{j\min})}{x_{j\max} - x_{j\min}}, \quad (17)$$

где x_j – натуральное значение фактора; $x_{j\max}$ – нижний предел натурального значения фактора; $x_{j\min}$ – верхний предел натурального значения фактора.

Тогда, подставляя значения в (17), получаем

$$x_1 = \frac{2x_1 - (x_{1\max} + x_{1\min})}{x_{1\max} - x_{1\min}} = \frac{2k - (26 + 10)}{26 - 10} = \frac{2k - 36}{16} = \frac{k - 18}{8} = 0,125k - 2,25.$$

$$x_2 = \frac{2x_2 - (x_{2\max} + x_{2\min})}{x_{2\max} - x_{2\min}} = \frac{2n - (100 + 60)}{100 - 60} = \frac{2n - 160}{40} = \frac{n - 80}{20} = 0,05n - 4.$$

Таким образом, уравнения (11) – (14) в раскодированном виде принимают следующий вид:

– для пшеницы:

$$D = 1,662 - 0,066k + 0,004n; \quad (18)$$

– для ржи:

$$D = 1,684 - 0,066k + 0,004n; \quad (19)$$

– для ячменя:

$$D = 1,669 - 0,065k + 0,004n; \quad (20)$$

– для овса:

$$D = 1,633 - 0,066k + 0,004n. \quad (21)$$

Заключительным этапом математической обработки экспериментальных данных являлось определение оптимальной области значений исследуемых факторов на основании анализа поверхностей отклика. Поверхности отклика, построенные по уравнениям регрессии (11) – (14), представлены на рисунках 1–4.

Подставляя значения параметров k и n в уравнения (18) – (21), получаем значение показателя дробления посевного материала. Для каждой культуры в зависимости от заданных параметров k и n . Результаты расчетов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Расчетное значение дробления по уравнениям регрессии (18) – (21) в зависимости от заданных параметров k и n

Значение показателей		Культура			
k , мм	n , об/мин	Пшеница	Рожь	Ячмень	Овес
Дробление, % (не более 0,3 % по ТНПА [4])					
10	60	1,242	1,264	1,259	1,213
10	80	1,322	1,344	1,339	1,293
10	100	1,402	1,424	1,419	1,373
18	60	0,714	0,736	0,739	0,685
18	80	0,794	0,816	0,819	0,765
18	100	0,874	0,896	0,899	0,845
26	60	0,186	0,208	0,219	0,157
26	80	0,266	0,288	0,299	0,237
26	100	0,346	0,368	0,379	0,317

Из анализа графической зависимости (рисунки 1–4), а также данных таблицы 5 установлены оптимальные параметры факторов, оказывающих существенное влияние на процесс посева посевного материала (таблица 6).

Таблица 6 – Оптимальные параметры факторов

Фактор	Область оптимума
Зазор между стенками ящика и винтом шнека k , мм	не менее 26
Частота вращения шнека n , об/мин	60–80

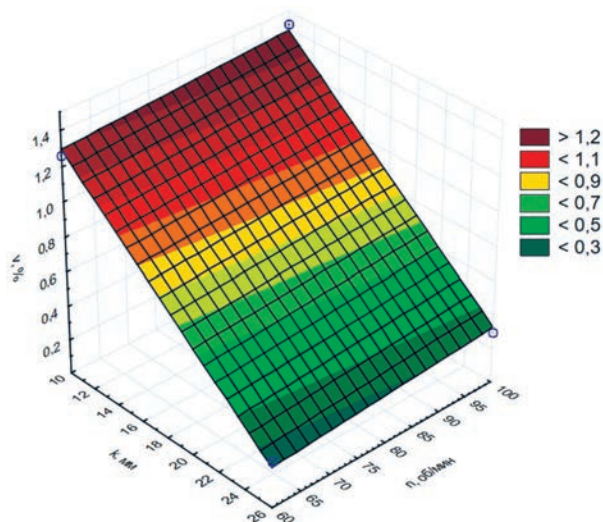


Рисунок 1 – Поверхность отклика $v = f(k; n)$ при высеве пшеницы

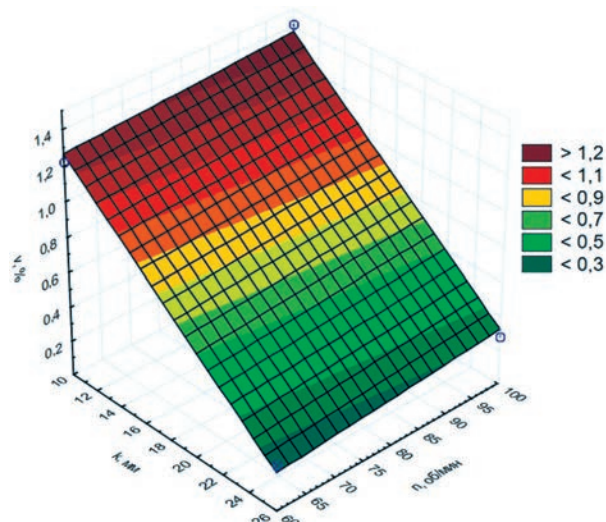


Рисунок 2 – Поверхность отклика $v = f(k; n)$ при высеве ржи

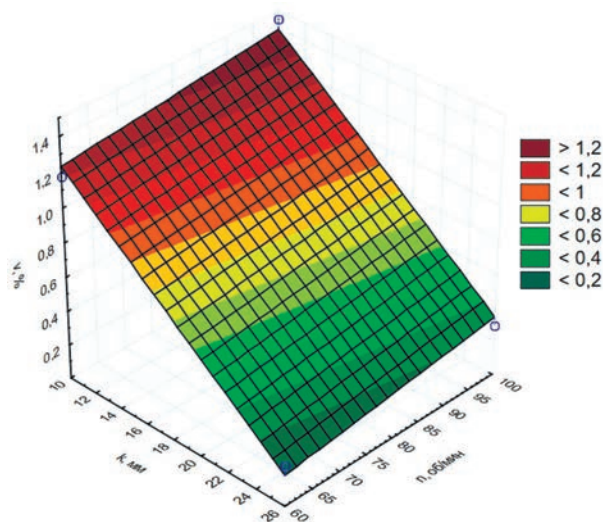


Рисунок 3 – Поверхность отклика $v = f(k; n)$ при высеве ячменя

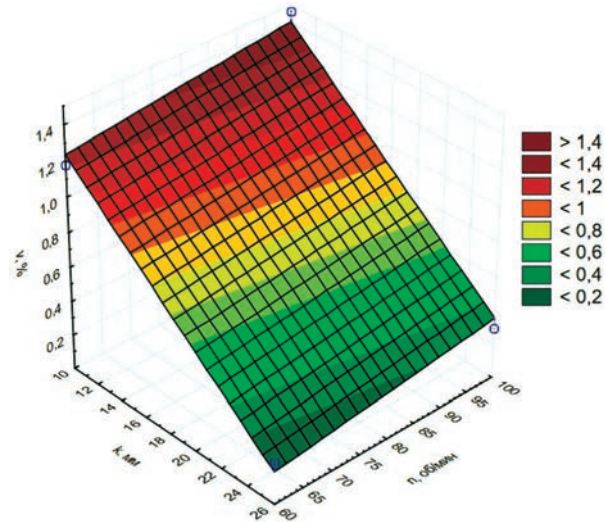


Рисунок 4 – Поверхность отклика $v = f(k; n)$ при высеве овса

Заключение

На основании полученных экспериментальных данных установлены оптимальные значения зазора между стенками ящика и винтом шнека k , который должен составлять не менее 26 мм, и частоты вращения шнека $n = (60-80)$ об/мин. Это позволит осуществлять высев семян механической широкозахватной сеялкой с централизованным бункером с их дроблением в пределах, допустимых агротребованиями.

Список использованных источников

1. Хайлис, Г. А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – М. : Колос, 1994. – 169 с.
2. Обоснование конструктивной схемы и основных параметров системы посева с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам механической широкозахватной зерновой сеялки: отчет о НИР (заключ.) / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; рук. В. В. Микульский, исполн. Н. Д. Лепешкин, В. В. Мижурин, А. В. Иваненко, А. М. Злотник. – Мн., 2025. – 320 с. – № ГР 20240251.
3. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Мн. : БГУ, 1982. – 302 с.
4. Машины посевные и посадочные. Правила установления показателей назначения: ТКП 078–2007 (02150). – Введ. 06.08.2007 – Мн. : Бел. научн. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК, 2007. – 40 с.