

Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, В. В. Мижурин

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: mehposev@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ВЫСЕВА МЕХАНИЧЕСКИМИ СЕЯЛКАМИ С ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ БУНКЕРОМ

Аннотация. В статье на основании проведенного априорного ранжирования и экспериментальных исследований установлено, что наиболее существенным фактором, оказывающим влияние на качество процесса дозирования посевного материала механической сеялки с централизованным бункером, является зазор между витками шнека и стенками посевного ящика, а также частота вращения шнека.

Ключевые слова: высев, зазор, шнек, частота вращения, фактор, неустойчивость высева, неравномерность высева, дробление.

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

SUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: mehposev@mail.ru

SOIL CULTIVATION AND SEEDING COMPLEX OF MACHINES FOR RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF GRAIN PRODUCTION IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Abstract. In the article, based on the conducted a priori ranking and experimental studies, it was established that the most significant factor influencing the quality of the seed dosing process of a mechanical seeder with a centralized hopper is the gap between the auger turns and the walls of the seed box, and the rotation speed of the auger.

Keywords: seeding, gap, auger, rotation speed, factor, seeding instability, seeding unevenness, crushing.

Введение

Одним из направлений повышения производительности при посеве зерновых является увеличение рабочей скорости и ширины захвата посевных машин (6 м и более). Поэтому посевные машины с механическим высевом начали вытесняться более технологичными посевными машинами с пневматическим высевом семян и гранул минеральных удобрений [1]. Основными конструктивными особенностями современных широкозахватных посевных машин с пневматическим высевом являются наличие централизованного бункера большой вместимости и быстрый перевод из транспортного положения в рабочее. Это, наряду с увеличением скорости и ширины захвата, также способствует повышению производительности. Вместе с тем одной из проблем пневматического высева является низкая точность распределения посевного материала по ширине захвата (поперечная неравномерность). Известно, что неравномерность распределения семян по сошникам при высеве зерновых и зернобобовых культур в пневматических высевальных системах, особенно на склоновых землях, превышает значения, регламентированные агропотребованиями, и составляет в среднем от 9,6 до 15,5 % для зерновых культур при допустимых для пневматических сеялок 5 % [2]. Установлено, что при неравномерности высева между сошниками выше 10 % наблюдается устойчивое снижение урожайности на 1–2 ц/га [3, 4]. Это обусловлено несовершенством технологического процесса распределения семян пневматической высевальной системой. Данных недостатков лишена предлагаемая нами перспективная схема

широкозахватной механической сеялки, которая имеет ряд отличительных особенностей. Применен централизованный бункер большого объема с двумя емкостями для посевного материала; подача посевного материала из централизованного бункера к сошникам осуществляется ступенчато: сначала посевной материал самотеком поступает в отдельные посевные ящики, а затем из них дозируется в каждый сошник. Распределение посевного материала в ящиках производится с помощью распределительного и обратного шнеков [5].

Цель исследований – установить факторы, которые могут оказать влияние на качество высева при использовании перспективных механических сеялок с централизованным бункером, выполненных по предложенной схеме.

Основная часть

Анализ работ [6–11], посвященных повышению качества высева посевного материала, а также взаимодействию элементов высевающей системы с посевным материалом, в том числе и со шнеками, позволил выявить 12 факторов, способных оказать влияние на качество высева: X_1 – норма высева; X_2 – влажность семян; X_3 – диаметр выпускных отверстий централизованного бункера сеялки; X_4 – диаметр шнека; X_5 – частота вращения шнека; X_6 – коэффициент трения посевного материала; X_7 – насыпная плотность посевного материала; X_8 – угол наклона желобков катушки; X_9 – зазор между стенками ящика и винтом шнека; X_{10} – рабочая длина катушки; X_{11} – шаг витка шнека; X_{12} – толщина активного слоя.

В результате анкетного опроса специалистов в области посева сельскохозяйственных культур составлен алгоритм для определения коэффициента конкордации (таблица 1).

Таблица 1 – Алгоритм определения коэффициента конкордации факторов, оказывающих влияние на качество высева посевного материала

Исследователь	Фактор											
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
1	3	8	7	6	11	4	1,5	10	12	9	5	1,5
2	1,5	1,5	4	3	12	5,5	7	8	9	5,5	10	11
3	1	8,5	8,5	7	10	3,5	6	12	11	2	5	3,5
4	2,5	2,5	5,5	5,5	11	8	10	7	12	9	4	1
5	9	8	6,5	6,5	12	4	5	11	10	2,5	1	2,5
$\sum_{j=1}^m a_{ij}$	17	28,5	31,5	28	56	25	29,5	48	54	28	25	19,5
$\sum_{j=1}^m a_{ij} - Z$	-15,5	-4,0	-1,0	-4,5	23,5	-7,5	-3,0	15,5	21,5	-4,5	-7,5	-13,0
Δ_i^2	240,25	16,0	1,0	20,25	552,25	56,25	9,0	240,25	462,25	20,25	56,25	169,0

В связи с тем, что при обработке анкетных данных были выявлены «связанные ранги», коэффициент конкордации вычислялся по формуле (1)

$$W = \frac{S_t}{\frac{1}{12} m_z^2 (n_z^3 - n_z) - m_z \sum_i T_i}, \quad (1)$$

где S_t – сумма квадратов отклонений; m_z – количество опрашиваемых специалистов; n_z – количество факторов; T_i – параметр.

$$S_t = \sum_{i=1}^n \Delta i^2, \quad (2)$$

где Δi^2 – квадрат отклонения; Δi – отклонение от средней суммы рангов.

$$\Delta i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - Z, \quad (3)$$

где Z – среднее значение всех сумм рангов; $\sum_{j=1}^{m_z} a_{ij}$ – сумма рангов.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} \sum_{j=1}^{m_z} a_{ij}}{n_z}. \quad (4)$$

$$Z = \frac{390}{12} = 32,5.$$

$$S_i = 1843.$$

Параметр T_i определялся по следующей зависимости:

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{m_z} (t_j^3 - t_j), \quad (5)$$

где t_j – j -е число одинаковых рангов в i -м ранжировании.

$$\sum_{i=1}^n T_i = \frac{1}{12} \left((1^3 - 1) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2) \right) = 2.$$

Подставив значения в формулу (1), получим

$$W = \frac{1843}{\frac{1}{12} 5^2 (12^3 - 12) - 5 \cdot 2} = 0,52.$$

Таким образом, коэффициент конкордации, позволяющий оценить степень согласованности мнений опрошенных специалистов, в нашем случае $W = 0,52$, что отлично от нуля.

Значимость коэффициента конкордации проверяли по критерию Пирсона χ^2 , который ввиду наличия «связанных рангов» определялся по формуле

$$\chi^2 = \frac{S_i}{\frac{1}{12} m_z n_z (n_z + 1) + \frac{1}{n_z - 1} \sum_{j=1}^{m_z} T_i}. \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{1843}{\frac{1}{12} 5 \cdot 12 (12 + 1) - \frac{1}{12 - 1} 2} = 27,576.$$

Согласно [13] для уровня значимости 5 % и числа степеней свободы $f = 11$, табличное значение критерия Пирсона равно

$$\chi_{\text{табл}}^2 = 19,681 < \chi^2 = 27,576.$$

Вследствие того, что табличное значение критерия меньше расчетного, с вероятностью $\alpha_d = 0,95$ можно утверждать, что согласованность мнения специалистов относительно влияния факторов на показатели качества не является случайным и оценивается коэффициентом конкордации $W = 0,52$.

По результатам ранжирования построена априорная диаграмма рангов (рисунок 1). Для этого по оси абсцисс отложены факторы в порядке возрастания их рангов, а по оси ординат – суммы рангов соответствующих факторов.

Таким образом, в результате представленного анализа наиболее значимыми факторами, по мнению специалистов, влияющими на процесс высева посевного материала системой высева

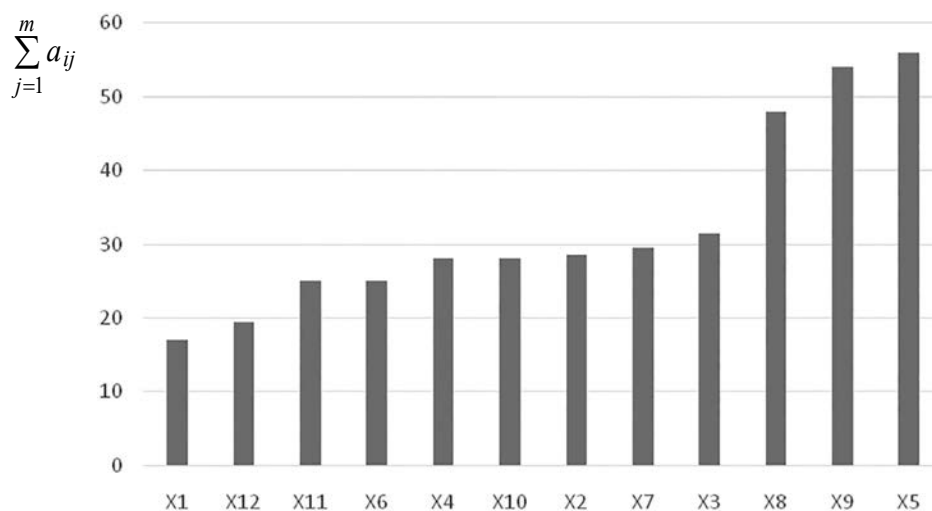


Рисунок 1 – Априорная диаграмма рангов

с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам механической широкозахватной зерновой сеялки, являются зазор между стенками ящика и винтом шнека (фактор X_9) и частота вращения шнека (фактор X_5).

Для подтверждения данного вывода были проведены предварительные исследования на высеве семян различных культур и гранулированных минеральных удобрений, в ходе которых определялись неустойчивость высева (коэффициент вариации) v , %, неравномерность высева H_p , % и дробление посевного материала, %. При этом постоянными были приняты такие факторы, как диаметр выпускного отверстия централизованного бункера $D = 120$ мм, диаметр шнека $D_{\text{шн}} = 100$ мм, шаг витков шнека $S = 100$ мм, диаметр вала шнека $d_b = 32$ мм, угол наклона желобков катушки $\alpha = 15^\circ$.

Численные значения указанных факторов были определены в результате ранее проведенных теоретических исследований [14]. Переменными факторами были зазор между стенками ящика и винтом шнека (k), а также частота вращения шнека (n).

Для проведения исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка, эмитирующая работу системы высева механической сеялки с централизованным бункером (рисунок 2).

Техническое описание и принцип работы установки, а также применяемые приборы отражены в статье данного сборника «Экспериментальная установка и приборы для исследования процесса двухступенчатого дозирования посевного материала к сошникам механической сеялки с централизованным бункером».

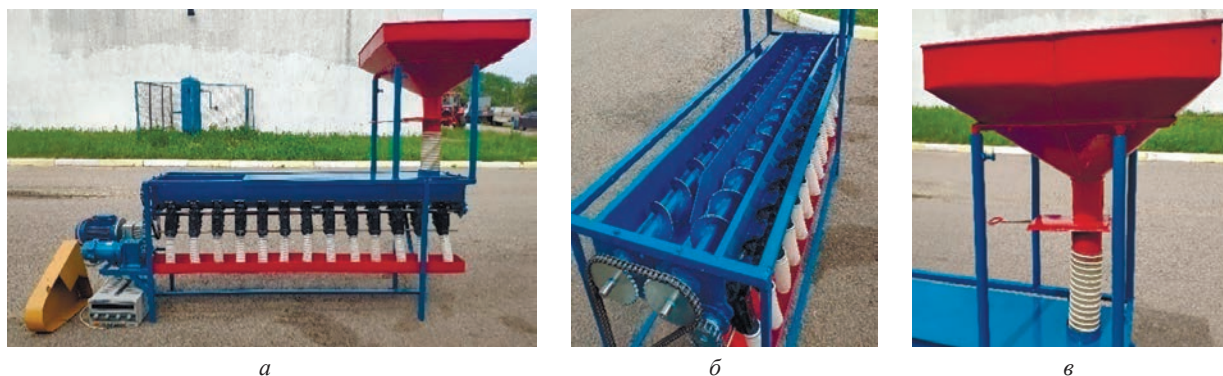


Рисунок 2 – Экспериментальная установка с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам: а – экспериментальная установка централизованной двухступенчатой подачи семян и удобрений к сошникам; б – макетный образец шнеко-катушечного распределителя семян и удобрений; в – макетный образец бункера с блоком дозатора зерна и удобрений

Перед проведением экспериментальных исследований определялись основные физико-механические свойства посевного материала, при этом использовались семена посевных кондиций. Влажность посевного материала определялась влагомером ЭВЛАС-2М, объемная масса – объемным и весовым методом, геометрические параметры – штангенциркулем ШЦ-I-125-0,05 (ГОСТ 166-89). Результаты исследований посевного материала представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Физико-механические свойства семян

Показатель	Среднее значение показателя			
	Культура			
	Пшеница	Рожь	Ячмень	Овес
Масса 1 000 семян, г	44,1	38,9	42,3	36,8
Влажность семян, %	14,1	13,8	14,2	14,3
Объемная масса, кг/м ³	735	679	710	706
Эквивалентный диаметр, мм	3,5	3,8	4,0	3,6

Таблица 3 – Физико-механические свойства гранулированного суперфосфата

Показатели	Среднее значение показателя
Влажность, %	2,5
Плотность, кг/м ³	990
Фракционный состав, %:	
– менее 1;	0,2
– от 1 до 2 мм;	51,3
– от 2 до 3 мм;	46,5
– от 3 до 5 мм;	2
– более 5 мм	–

Анализ данных, приведенных в таблицах 2 и 3, показывает, что физико-механические свойства культур, которые в значительной степени влияют на технологический процесс высева, отличаются между собой незначительно.

Все эксперименты проводились на хозяйственной норме высева в трехкратной повторности.

Привод и регулировка частоты вращения катушек высевающих аппаратов и распределительного шнека производились с помощью электродвигателей, в цепи питания которых были установлены соответственно источник питания MastechHY 3030E с регулятором мощности и преобразователь частоты векторный M680 фирмы «Oni». Регулировка зазора между стенками ящика и витками шнека производилась с помощью пластин. Частота вращения катушки, а также частота вращения распределителя шнекового определялись с помощью тахометра электронного UT 370. Вес отобранных проб посевного материала определялся с помощью электронных весов ВЭУ-6-1/2 (ТУ 25-7724-010-98) с точностью до 0,01 г, а вес отобранных проб посевного материала для изучения дробления и травмирования – с помощью электронных весов MAX 50 «Radwag» с точностью до 0,001 г. Повреждение посевного материала изучали визуальным методом с использованием электронного микроскопа Andostar AD209 с 13–80-кратным увеличением.

Методика проведения исследований

Неустойчивость высева семян зерновых культур и минеральных удобрений определяли при минимальной, хозяйственной и максимальной нормах высева взятием проб непосредственно после дозирующего устройства. Пробы отбирали после установки дозирующего устройства на заданную норму высева. Отбор проб производили в трехкратной повторности на каждой заданной норме высева. Семена и удобрения, высеянные дозирующим устройством, собирали в емкость и определяли их массу. Обработка данных при определении неустойчивости высева заключалась в определении:

– среднего значения исследуемого параметра (масса посевного материала)

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} x_i}{n_c}, \quad (7)$$

где i – номер дозирующего устройства; n_c – количество дозирующих устройств, шт.; $x_{\text{ср}}$ – среднее значение параметра (масса посевного материала), г;

– среднего квадратического отклонения

$$S_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (x_i - x_{\text{ср}})^2}{n_c - 1}}. \quad (8)$$

– коэффициента вариации

$$v = \frac{S_M}{x_{\text{ср}}}. \quad (9)$$

Неравномерность высева семян и удобрений определяли при хозяйственной норме высева взятием проб непосредственно после дозирующего устройства. После установки на заданную хозяйственную норму высева отбирали пробы в трехкратной повторности. Семена и удобрения, высеянные каждым дозирующим устройством, собирали в емкости и определяли их массу. При обработке данных вычисляли следующие показатели:

1) среднюю массу семян и удобрений, высеянных i -м дозирующим устройством из всех повторностей q_i , г, вычисляют по формуле

$$\bar{q}_i = \frac{\sum_{j=1}^n q_i}{n}, \quad (10)$$

где q_i – масса семян, высеянных i -м дозирующим устройством в j -й повторности, г; n – число повторностей, шт.;

2) среднюю массу семян, высеянных одним дозирующим устройством, q , г, вычисляют по формуле

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} \bar{q}_i}{n_a}, \quad (11)$$

где n_a – число дозирующих устройств, шт.;

3) отклонение массы семян в высева i -м дозирующим устройством от среднего значения Δq_i , г вычисляют по формуле

$$\Delta q_i = \bar{q}_i - \bar{q}; \quad (12)$$

4) среднеарифметическое отклонение $\Delta \bar{q}_i$, г, вычисляют по формуле

$$\Delta \bar{q}_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} |\Delta q_i|}{n_a}; \quad (13)$$

5) неравномерность высева семян между дозирующими устройствами H_p , %, определяют по формуле

$$H_p = \frac{\Delta \bar{q}_i}{\bar{q}} 10^2. \quad (14)$$

Семена и минеральные удобрения на дробление отбирали во время определения неравномерности высева отдельными дозирующими устройствами на хозяйственной норме высева, объединяя для этого в среднюю пробу семена, высеянные всеми дозаторами за повторность опыта. Из каждой средней пробы выделяли две навески. Масса навески – по ГОСТ 12037-81 [15]. Из каждой навески выделяли битые (дробленые) семена. Дробленые семена взвешивали с погрешностью $\pm 0,01$ г. Массовую долю семян дробленых (Д, %), вычисляли по формуле

$$Д = \frac{m_{др}}{m_n} 10^2, \quad (15)$$

где $m_{др}$ – масса семян дробленых, выделенных из навески, г; m_n – общая масса семян в навеске, г.

Предварительно содержание дробленых семян было определено в исходном материале. По разнице содержания дробленых семян, прошедших через элементы системы высева установки и в исходном материале, определяли дробление семян элементами установки.

Результаты исследования

Результаты экспериментальных исследований влияния конструктивных параметров и режимов работы широкозахватной механической сеялки с централизованным бункером на качество высева посевного материала представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели качественной оценки процесса дозирования посевного материала системой высева с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам механической широкозахватной зерновой сеялки

Культура	Фактор		Показатель качества процесса высева		
	Зазор между стенками ящика и винтом шнека	Частота вращения шнека	Неустойчивость высева	Неравномерность высева	Дробление
	мм	об/мин	%		
Пшеница	10	60	1,06	2,88	1,190
	26	60	0,72	2,94	0,245
	10	100	0,51	2,94	1,463
	26	100	0,94	2,25	0,295
Рожь	10	60	1,12	2,64	1,260
	26	60	0,89	2,55	0,268
	10	100	0,96	2,69	1,427
	26	100	0,73	2,71	0,297
Ячмень	10	60	1,27	2,86	1,223
	26	60	1,06	2,45	0,292
	10	100	0,91	2,97	1,414
	26	100	0,93	2,3	0,281
Овес	10	60	0,98	2,76	1,174
	26	60	0,62	2,54	0,237
	10	100	0,79	2,39	1,454
	26	100	1,04	2,89	0,292
Суперфосфат	10	60	2,82	5,26	–
	26	60	2,30	4,54	–
	10	100	2,89	5,93	–
	26	100	2,01	4,89	–
Горох	10	60	1,08	2,6	0,740
	26	60	1,72	2,42	0,273
	10	100	1,97	2,22	0,851
	26	100	1,03	2,13	0,264
Рапс	10	60	2,81	2,60	–
	26	60	2,90	2,59	–
	10	100	2,92	2,44	–
	26	100	3,06	2,93	–

Анализ результатов, представленных в таблице 4, показывает, что при изменении зазора между стенками посевного ящика и витками шнека с 10 до 26 мм и частоты вращения шнека с 60 до 100 об/мин, показатели качества при высеве различных культур изменяются следующим образом:

– неустойчивость общего высева зерновых культур (пшеница, рожь, ячмень, овес) изменяется в пределах от 0,51 до 1,27 %, зернобобовых (горох) – в пределах от 1,03 до 1,97 %, крестоцветных (рапс) – от 2,81 до 3,06 % и гранулированных минеральных удобрений (суперфосфат) – от 2,01 до 2,89 %, что соответствует требованиям ТНПА для механических сеялок (не более 3 % для зерновых, 4 % для зернобобовых культур и 10 % для удобрений) [2]);

– неравномерность высева между отдельными высевающими аппаратами зерновых культур изменяется в пределах от 2,30 до 2,97 %, зернобобовых – от 2,13 до 2,60 %, крестоцветных – от 2,81 до 3,06 % и удобрений – от 2,01 до 2,82 %, что соответствует требованиям ТНПА для механических сеялок (не более 3 % для зерновых, 4 % для зернобобовых культур и 10 % для удобрений);

– дробление семян зерновых изменяется от 0,237 до 1,463 %, зернобобовых – от 0,264 до 0,851 %, что не соответствует требованиям ТНПА для зерновых по верхнему пределу (не более 0,3 % для зерновых и 1,0 % для зернобобовых).

Заключение

Априорным ранжированием установлено, что факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на качество высева механической сеялки с централизованным бункером, в конструкции которой используются шнеки, наиболее существенное влияние оказывают зазор между стенками посевного ящика и витком шнека, а также частота вращения шнека.

Экспериментально установлено, что при уменьшении зазора между стенками посевного ящика и витком шнека с 26 до 10 мм и увеличении частоты вращения шнека с 60 до 100 об/мин дробление семян увеличивается и для зерновых культур превышает требуемый ТНПА показатель. При этом показатели неравномерности распределения семян по сошникам и неустойчивости общего высева не превышают регламентированные ТНПА показатели.

С учетом полученных результатов, подтверждающих влияние зазора между стенками посевного ящика и витком шнека и частоты вращения шнека на показатели качества, и, в первую очередь, показатель дробления, который не полностью соответствует требованиям ТНПА, необходимо продолжить исследования и определить оптимальные значения зазора и частоты вращения.

Список использованных источников

1. Лепешкин, Н. Д. К обоснованию конструктивно-технологической схемы широкозахватной зерновой сеялки / Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, В. В. Мижурин // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. наука, 2025. – Вып. 58. – С. 126–131.
2. Машины посевные и посадочные. Правила установления показателей назначения: ТКП 078 – 2007. – Введ. 06.08.2007 – Мн. : Бел. научн. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК, 2007. – 40 с.
3. Бахмутов, В. А. Влияние равномерности размещения растений по площади на урожайность / В. А. Бахмутов, В. А. Любич // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М., 1981. – № 5. – С. 9–11.
4. Кузнецов, М. К. Неравномерность высева семян зерновыми сеялками / М. К. Кузнецов [и др.] ; под общ. ред. М. К. Кузнецова // Тракторы и сельхозмашины. – М., 1980. – № 7. – С. 17–18.
5. Полезная модель ВУ 13634. Сеялка механическая широкозахватная универсальная: № 02040165 : заявлено 18.07.2024 : опубл. 20.01.2025 / Лепешкин Н. Д., Мижурин В. В., Микульский В. В. ; заявитель РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – 7 с.
6. Крючин, Н. П. Обоснование ресурсосберегающих технологий рядового посева и совершенствование высевающих систем посевных машин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Крючин Николай Павлович. – Самара, 2006. – 445 л.
7. Шулаков, П. А. Обоснование конструктивно-технической схемы, основных параметров комбинированного дернинного агрегата и его туковывсевающего устройства : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Шулаков Павел Александрович. – Киров, 2004. – 197 л.
8. Преображенский, П. А. Спирально-винтовые транспортеры (гибкие шнеки) и смесители : сб. науч. ст. / под общ. ред. П. А. Преображенского, А. А. Труфанова. – Казань, 1970. – 176 с.

9. Шуков, А. В. Повышение качества посева семян зерновой сеялкой с разработкой высевального аппарата : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Шуков Александр Васильевич ; Пенз. гос. с.-х. акад. – Пенза, 2009. – 19 с.
10. Иншиязов, Б. А. Обоснование параметров и режимов работы катушечного высевального аппарата для зоны хлопководства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Иншиязов Баходир Азадович. – Янгйюль, 1993. – 16 с.
11. Ларюшин, Н. П. Результаты лабораторных исследований высевального аппарата / Н. П. Ларюшин [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 140–144.
12. Фатеев, М. Н. Основы планирования эксперимента в сельскохозяйственных машинах: руководящий технический материал / М. Н. Фатеев, М. М. Фирсов. – М. : ВИСХОМ, 1974. – 116 с.
13. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Мн. : БГУ, 1982. – 302 с.
14. 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.
15. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения чистоты и отхода семян : ГОСТ 12037-81. – Введ. 01.07.1982. – М. : Стандартиформ, 1982. – 39 с.