




Экспериментальные исследования высевающего аппарата зерновой сеялки СУБМ-3,6

В. Ф. Купряшкин , **Н. И. Наумкин**, **А. С. Уланов**,
А. В. Безруков, **А. Д. Комолов**, **Ю. А. Антипов**

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
(г. Саранск, Российская Федерация)*

 kupwf@mail.ru

Аннотация

Введение. Формирование условий для развития научно-технической деятельности и получения результатов, необходимых для создания технологий, продукции, товаров и оказания услуг, обеспечивающих независимость и конкурентоспособность отечественного агропромышленного комплекса, – одна из главных задач обеспечения продовольственной безопасности страны. Наиболее важным и сложным для выполнения сельскохозяйственных операций является посев, осуществляемый посевными агрегатами и машинами, оснащенными высевающими аппаратами, подразделяющимися на механические, пневматические и пневмомеханические.

Цель статьи. Разработка экспериментального стенда и методики проведения экспериментальных исследований высевающего аппарата зерновой сеялки для построения математических моделей его производительности при высеве различных сельскохозяйственных культур: пшеницы, ржи, ячменя, овса, проса, вики.

Материалы и методы. Механический высевающий аппарат катушечного типа используется на одном из самых популярных и повсеместно применимых посевных агрегатах – универсальной блочно-модульной сеялке СУБМ-3,6. Он позволяет обеспечить равномерность норм высева и точную глубину заделки семян. Данные показатели являются основными при оценке качества работы посевных агрегатов. Рассмотрение конструктивных особенностей вышеуказанной сеялки – важный этап при оценке ее производительности.

Результаты исследования. Одной из главных характеристик работы высевающих аппаратов является их производительность. Приведены исследования, направленные на построение математической модели зависимости производительности зернового высевающего аппарата от частоты вращения приводного вала рабочих органов (катушек) n_k (мин⁻¹) и длины вылета катушек l_k (мм). Для этого, в соответствии с современными методами планирования эксперимента, были разработаны экспериментальный стенд и методика проведения экспериментальных исследований производительности высевающего аппарата.

Обсуждение и заключение. Полученные в результате экспериментальных исследований аналитические зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки позволяют наиболее эффективно использовать работу высевающих зерновых катушечных аппаратов, что в свою очередь окажет влияние на выбор оптимальных режимов функционирования сеялки СУБМ-3,6.





Ключевые слова: посев, зерновые культуры, сеялка, катушечный высевашный аппарат, катушка, частота вращения, производительность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Экспериментальные исследования высевашного аппарата зерновой сеялки СУБМ-3,6 / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 321–338. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.321-338>

Original article

Experimental Studies of the Seed-Sowing Device for the Grain Seeder SUBM-3.6

V. F. Kupryashkin , N. I. Naumkin, A. S. Ulanov,
A. V. Bezrukov, A. D. Komolov, Yu. A. Antipov
National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)
 kupwff@mail.ru

Abstract

Introduction. Laying the groundwork for developing scientific and engineering efforts and for obtaining the results necessary to create technologies, products, goods and services that provide the independence and competitiveness of the domestic agro-industrial complex is one of the main tasks for ensuring the food security of Russia. One of the most important and difficult agricultural operations is sowing carried out by seeders equipped with mechanical, pneumatic or pneumatic-mechanical seed-sowing devices.

Aim of the Article. The purpose of the research is to develop an experimental stand and a methodology for conducting experimental studies of the seed-sowing device for a grain seeder to build mathematical models of its performance when sowing various agricultural crops: wheat, rye, barley, oats, millet, vetch.

Materials and Methods. The mechanical roller feed unit is used on one of the most popular and applicable seeder, namely the universal block-modular seeder SUBM-3.6. It allows ensuring the uniformity of the seeding rate and the exact depth of seed embedding. These indicators are the main ones in assessing the performance of seeders. Considering the design features of the above-mentioned seeder is an important step in assessing its productivity.

Results. One of the main characteristics of the seeders is their productivity. In the article, there are presented the studies aimed at constructing a mathematical model of the dependence of the seeders productivity on the rotational speed of the drive shaft of the working bodies (rollers) ν (min^{-1}) and the operating length of the rollers l_c (mm). For this purpose, an experimental stand and methodology for conducting experimental studies of the productivity of the seeders were developed in accordance with modern methods of experiment planning.

Discussion and Conclusion. The analytical dependences of the seeding rate on the rotation frequency and the roller operating length obtained as a result of experimental studies will allow the most efficient use of roller feed units that in turn will influence the choice of optimal operating modes of the seeder SUBM-3.6.

Keywords: sowing, grain crops, seeder, roller feed unit, roller, rotation speed, productivity

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Ulanov A.S., Bezrukov A.V., Komolov A.D., Antipov Yu.A. Experimental Studies of the Seed-Sowing Device for the Grain Seeder SUBM-3.6. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):321–338. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.321-338>

Введение

Утвержденная правительством РФ федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы направлена на решение важных задач в рамках обеспечения стабильного роста производства сельхозпродукции. Одной из таких задач является формирование условий для развития научной, научно-технической деятельности и получения результатов, необходимых для создания технологий, продукции, товаров и оказания услуг, обеспечивающих независимость и конкурентоспособность отечественного агропромышленного комплекса [1]. В частности, в области производства зерновых и зернобобовых культур в России требуется совершенствование технологий и разработок научно-обоснованных способов их выращивания, обеспечивающих получение стабильно высоких урожаев [2–4].

Посев – наиболее сложная и значимая сельскохозяйственная операция. Для получения высокой урожайности выращиваемых культур, их полноценного роста и развития необходимым условием выступает получение каждым растением нужного количества питательных веществ, тепла, света¹, а также определенной площади питания, которая зависит от заданной нормы высева [5–7], т. е. высева строго определенного количества семян на единицу поля.

В связи с этим проведение экспериментальных исследований зерновой сеялки СУБМ-3,6, а в частности одного из главных его элементов – высевающего аппарата, является актуальной задачей и представляет значительный интерес.

Это обеспечивается за счет применения различных высевающих систем посевных машин и высевающих аппаратов, которые по принципу работы подразделяют на три основных типа: механические, пневматические и пневмомеханические [8; 9].

Обзор литературы

Механические высевающие аппараты получили наибольшее применение в таких посевных агрегатах, как СОН-4,2, СУБМ-3,6, СЗУ-6, СЗТ-3,6, семейства СЗ (АО «Белинсксельмаш», Россия)², Amazone (Германия)³, John Deere (США)⁴, Lemken (Германия)⁵, Берегиня (ООО «Усть-Лабинский машиностроительный завод», Россия)⁶, посевных комплексах AGRATOR M (ПК «Агро-мастер», Россия) и др. [10].

Рассмотрим конструкции механических высевающих аппаратов, применяемых в посевных агрегатах отечественного и зарубежного производства. Также обратим внимание на ряд других конструкторских изысканий, решающих поставленные задачи по равномерности посева сельскохозяйственных культур в соответствии с агротехническими требованиями.

¹ Овчинников В. А. Повышение эффективности машин для посева мелкосеменных культур : монография ; науч. ред. д-р. техн. наук М. Н. Чаткин. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. 104 с.

² Сеялки механические зерновые [Электронный ресурс]. URL: <https://bsm.sura.ru/catalog/sejalka> (дата обращения: 10.01.2023).

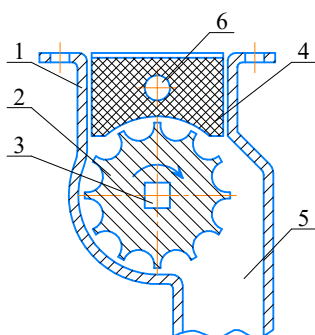
³ Механические сеялки Amazone [Электронный ресурс]. URL: <https://amazone.ru/ru-ru/продукция-и-цифровые-решения/сельскохозяйственная-техника/посевная-техника/механические-сеялки> (дата обращения: 10.01.2023).

⁴ Зерновые механические и пневматические сеялки John Deere [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deere.ua/ru/зерновые-механические-и-пневматические-сеялки> (дата обращения: 10.01.2023).

⁵ Механические сеялки Saphir [Электронный ресурс]. URL: <https://lemken.com/ru-ru/innovacionnye-mashiny/posev/drel-posevnaja/mekhanicheskie-sejalki> (дата обращения: 10.01.2023).

⁶ Механические посевные комплексы AGRATOR M [Электронный ресурс]. URL: <https://pk-agromaster.ru/projects-archive/механические-посевные-комплексы-agrator-m> (дата обращения: 10.01.2023).

Учеными Нижегородского НИИСХ [11] была разработана конструкция катушечного высевача (рис. 1), достоинством которой считается облегчение установки сеялки на заданную норму высева семян и повышение равномерности распределения семян в рядке.



Р и с. 1. Катушечный высевачный аппарат:
1 – корпус; 2 – желобчатая катушка;
3 – приводной вал; 4 – пластмассовая заслонка;
5 – семенной канал и семянаправитель;
6 – валик

F i g. 1. Roller feed unit:
1 – housing; 2 – grooved roller; 3 – drive shaft;
4 – plastic flap; 5 – seed channel and seed guide;
6 – spindle

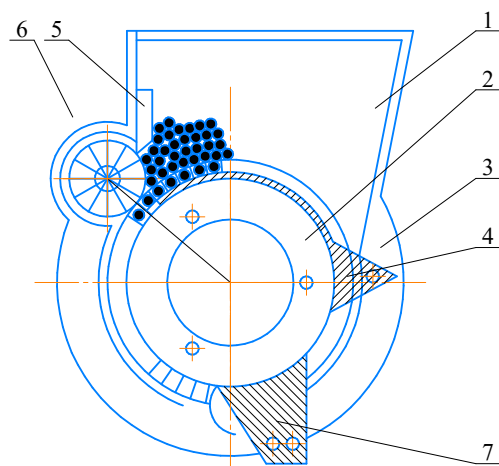
Принцип работы высевача следующий: при движении сеялки катушка высевача, вращаясь, захватывает семена, попавшие в семенной канал, и верхним высевом выбрасывает их в семянаправитель и далее в семяпровод, прикрепленный к корпусу высевача. Регулирование нормы высева производится при помощи заслонки путем перемещения ее валиком и изменением частоты вращения приводного вала.

Механический высевач, разработанный учеными Курской ГСХА имени И. И. Иванова (рис. 2), состоит из корпуса 3 и расположенных в нем бункера для семян 1, вертикального высевача диска 2, ролика-отражателя 6, ограничителя семян 5, регулятора

глубины ячейки высевача диска 4, пружинного выталкивателя 7 [12].

Семенной материал поступает в бункер и равномерно распределяется в ячейках диска 2. Семена с чуть большими габаритами роликом-отражателем 6 погружаются в ячейку, изгибая подпружиненную часть регулятора. В результате глубина ячейки увеличивается, а семя поступает в высевное окно, где выбрасывается пружинным выталкивателем.

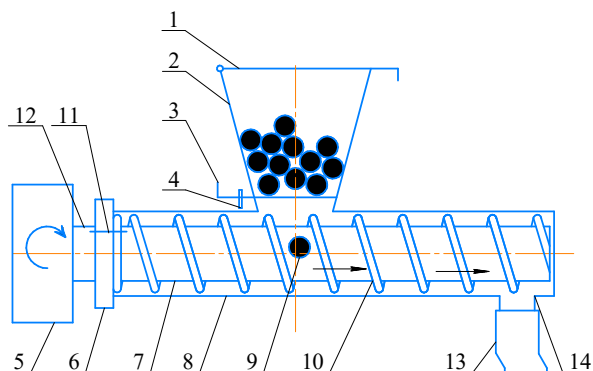
Преимуществом данной конструкции является снижение ускорения полета семени, что повышает качество посева семян. Недостаток проявляется в виде микротравмирования в момент схода семени с пружины происходит его.



Р и с. 2. Механический высевачный аппарат
F i g. 2. Mechanical seed-sowing device

Для осуществления точного высева семян зерновых культур в стенах Ульяновской ГСХА спроектирован спирально-винтовой высевач (рис. 3) [13].

Использование спирально-винтового рабочего органа позволяет добиться равномерного распределения семенного материала между витками спирали в высеваче с последующим равномерным высевом их в почву [14].



Р и с. 3. Спирально-винтовой высевальный аппарат: 1 – крышка; 2 – загрузочный бункер; 3 – дозатор; 4 – фиксатор; 5 – приводное устройство; 6 – диск; 7 – внутренняя трубка; 8 – корпус; 9 – семенной материал; 10 – рабочий орган; 11 – болтовое соединение; 12 – вал; 13 – гибкая трубка; 14 – выходное окно

F i g. 3. Spiral-screw seed-sowing device: 1 – lid; 2 – loading hopper; 3 – dispenser; 4 – retainer; 5 – drive device; 6 – disc; 7 – inner tube; 8 – case; 9 – seed material; 10 – working body; 11 – bolted connection; 12 – shaft; 13 – flexible tube; 14 – exit window

Однако при функционировании такого высевального аппарата происходит притормаживание рабочего органа и, как следствие, защемление семян между внутренней поверхностью корпуса, рабочим органом и внутренней трубкой. Это приводит к травмированию семенного материала. Кроме того, конструкция аппарата мало пригодна для точного посева семян с заданным шагом и доставки их в почву.

Помимо вышеуказанных высевальных аппаратов существует множество других технических решений, позволяющих выполнять посев семян зерновых культур, имеющих свои преимущества и недостатки [15–17]. Анализируя все многообразие конструкций, а также практические наблюдения, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным и широкоприменимым является механический высевальный аппарат катушечного типа.

Материалы и методы

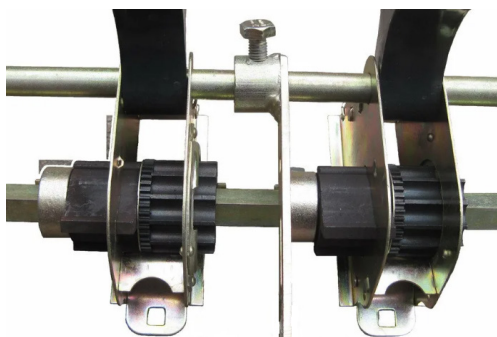
Выполненный выше анализ технических решений показывает, что устройства для посева зерновых культур оснащены

разнообразными высевальными аппаратами, отличающимися по конструктивному исполнению каждого, возникает необходимость определения параметров, характеризующих их работу, а именно производительности при посеве различных сельскохозяйственных культур [18].

Равномерность нормы посева и точная глубина заделки семян – главные показатели качества работы посевных агрегатов. Указанные достоинства обеспечиваются за счет применения в их конструкциях механического высевального аппарата катушечного типа (рис. 4). Он состоит из двух частей, каждая из которых представляет собой зубчатую поверхность. Поверхность с мелким зубом предназначена для посева мелкозерновых культур, поверхность с крупным зубом – для посева зерновых и зернобобовых культур.

Наиболее популярным и повсеместно применимым посевным агрегатом с данным типом высевального аппарата является универсальная блочно-модульная сеялка СУБМ-3,6⁷.

⁷ Сеялка зерновая СУБМ-3,6 (СУБМ-3,6 с туком) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oaomam.ru/catalog/item30.html> (дата обращения: 10.01.2023).



Р и с. 4. Высевающий аппарат сеялки СУБМ-3,6
F i g. 4. Seed-sowing device of the seeder
SUBM-3.6

Конструкция сеялки в общем виде (рис. 5) представляет собой гидравлическую систему 1, раму со сницей 2, на которой смонтирован пружинно-гидравлический механизм сошниковой группы 6, маркеры с гидравлическим приводом 3, зерновой и туковой высевающие аппараты с бункерами 4, механизм привода зернового и тукового высевающих аппаратов 5, рама 7 с опорными колесами 8, приводное колесо 9 с механизмом привода, механизм подъема сошников 10, механизм управления опорными колесами 11, трубопроводы гидравлической системы сеялки 1 и опорная стойка 12 [19]⁸.

Как было отмечено выше, одной из главных характеристик работы высевающих аппаратов – их производительность. В зависимости от нее определяется норма внесения посевного материала и режимы работы аппаратов. Поэтому исследования, направленные на установление регрессионных уравнений, характеризующих

производительность высевающего аппарата в зависимости от кинематических и конструктивных параметров его рабочих элементов, а именно частоты вращения n_k (мин⁻¹) и длины вылета l_k (мм) катушки, являются актуальными.

Результаты исследования

Для решения сформулированной проблемы на основе современных методов планирования эксперимента⁹ были разработаны экспериментальный стенд¹⁰ и методика проведения экспериментальных исследований производительности высевающего аппарата¹¹.

Уравнением регрессии производительности катушки является полином 2-го порядка:

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_1 + B_{12}x_1x_2 + B_{11}x_1^2 + B_{22}x_2^2,$$

где $B_0, B_1, B_2, B_{12}, B_{11}$ и B_{22} – постоянные коэффициенты уравнения регрессии; x_1 и x_2 – варьируемые факторы.

Частоты вращения катушки зернового высевающего аппарата лежит в интервале от 10 до 60 мин⁻¹. Минимальное значение интервала длины вылета катушки – 2 мм, а максимальное – 35 мм. Следовательно, l_k лежит в пределах от 2 до 35 мм.

Координаты центра плана: $n_k = 25$ мин⁻¹ и $l_k = 18,5$ мм.

Выбранные интервалы позволяют определить основные уровни факторов (табл. 1), для чего были использованы стандартные рекомендации $\Delta X_i = 0,3...0,45(X_{\max} - X_{\min})$.

⁸ Повышение эффективности функционирования зерновой сеялки СУБМ-3,6 / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-летию кафедры технической механики конструирования машин. п. Майский, 2018. С. 107–111. EDN: YOIJVL

⁹ Ящерицын П. И., Махаринский Е. И. Планирование эксперимента в машиностроении. Минск : Вышшая Школа, 1985. 286 с.

¹⁰ Экспериментальный стенд и методика проведения исследований работы зернового высевающего аппарата зернотуковой сеялки СУБМ-3,6 / Н. И. Наумкин [и др.] // Сельскохозяйственная наука Республики Мордовия: достижения, направления развития : материалы всерос. науч.-практ. конф. в 2 т. Т. 2. Саранск : Красный Октябрь, 2005. С. 374–381. EDN: IKBTPJ

¹¹ Методика проведения испытаний катушечного высевающего аппарата зерновой сеялки / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Журнал E-SCIO. 2019. № 11. С. 435–441. EDN: OMNYDD



Р и с. 5. Общий вид сеялки СУБМ-3,6
 F i g. 5. General view of the seeder SUBM-3.6

Т а б л и ц а 1
 T a b l e 1

Уровни и интервалы варьирования факторов
Levels and intervals of variation of factors

Факторы / Factors	(ΔX_i)	(α_i)	Уровни факторов / Factor levels				
			0	+1	-1	-1,414	+1,414
$n_k (X_1)$	10,00	15,00	25,00	35,00	15,00	10,00	40,00
$l_k (X_2)$	10,00	16,50	18,50	28,50	8,50	2,00	35,00

Эксперименты реализовались сериями, количество которых с учетом вероятности ошибки $\alpha = 0,05$ и надежности результатов не менее 90 % принималось равным $m = 9$.

Для получения математической модели зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки

Agricultural engineering

получены опытные данные, которые были подвергнуты проверке воспроизводимости эксперимента, значимости коэффициентов регрессии и адекватности уравнений регрессии, а также вычислению оценок коэффициентов регрессии.

Проверка гипотезы об однородности выборочных дисперсией S_j^2 :

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \left(y_{jk} - \bar{y}_j \right)^2,$$

где m – объем выборки; k – число точек плана; y_{jk} – результаты наблюдений; \bar{y}_j – среднее арифметическое значение случайной величины.

Для проверки гипотезы об однородности оценок S_j^2 дисперсий применяется критерий Кохрена:

$$G_{ЭМ} = \frac{\max \{ S_j^2 \}}{\sum_{i=1}^N S_i^2 \{ y_i \}},$$

где $\max \{ S_i^2 \}$ – максимальное значение дисперсии; $\sum_{i=1}^N S_i^2 \{ y_i \}$ – сумма дисперсий.

Расчетные значения критерия Кохрена представлены в таблице 2.

Критическое значение $G_{кр}$ для числа степеней свободы, равных 8, числа опытов – 9, при уровне значимости 0,05 составляет 0,3522, тогда для всех случаев

$$G_{Эк} < G_{кр}.$$

Всю группу S_i^2 можно считать оценками для одной и той же дисперсии воспроизводимости эксперимента и определить как

$$S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 \{ y_i \}.$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Коэффициенты уравнения регрессии определялись по известным формулам.

$$B_0 = \frac{A}{N} \left[2\lambda^2 (k+2) \sum_{i=1}^N y_i - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N X_{ij}^2 \bar{y}_i \right].$$

$$B_1 = \frac{C}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i} \bar{y}_i;$$

$$B_2 = \frac{C}{N} \sum_{i=1}^N X_{2i} \bar{y}_i.$$

$$B = \frac{A}{N} \left\{ C^2 [(k+2)\lambda - k] \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i + C(1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_i - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j \right\}.$$

$$B_{12} = \frac{C^2}{N\lambda} \sum_{i=1}^N x_{1i} y_{2i} \bar{y}_i,$$

где $A = \frac{1}{2\lambda [(k+2)\lambda - k]}$; $C = \frac{N}{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2}$;

$$\lambda = \frac{kN}{(k+2)(N-n_0)},$$

N – число опытов; k – количество факторов; n_0 – число опытов в центре плана; \bar{y}_i – значение функции отклика в i -ом опыте; i – номер опыта; j – номер фактора; x_{ij} – элементы соответствующего столбца матрицы планирования (табл. 3).

Проверка значимости коэффициентов заключалась в определении оценки дисперсий по формулам:

$$S^2 \{ B_0 \} = \frac{2A\lambda^2 (k+2)}{Nm} S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \};$$

$$S^2 \{ B_i \} = \frac{C}{Nm} S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \};$$

$$S^2 \{ B_{ij} \} = \frac{C^2}{Nm\lambda} S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \};$$

$$S^2 \{ B_{ii} \} = \frac{AC^2 [(k+1)\lambda - (k-1)]}{Nm} S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \},$$

где m – число параллельных опытов в точках плана.

Для каждого коэффициента подсчитывалось значение критерия $t_i = |B_i| / S^2 \{ B_i \}$, и сравнивалось с критическим $t_{кр}$. Результаты проверки приведены в таблице 3, откуда следует, что все коэффициенты уравнений регрессии значимы, и математические модели имеют вид:

Расчетные значения критерия Кохрена
Calculated values of the Cochren criterion

Параметр / Parameter	Культура / Culture					
	Пшеница / Wheat	Рожь / Rye	Ячмень / Barley	Овес / Oats	Просо / Millet	Вика / Vetch
$\max\{S_i^2\}$	3,20	2,40	2,80	2,65	4,22	4,98
$\sum_{i=1}^N S_i^2\{y_i\}$	10,90	10,60	10,24	15,30	14,30	23,70
$G_{эж}$	0,29	0,23	0,27	0,17	0,29	0,21
$S_{\text{вос}}^2\{y_i\}$	1,21	1,28	1,13	1,70	1,59	2,63

– для пшеницы:

$$Y = 85,42 + 41,08x_1 + 19,33x_2 + 17,88x_1x_2 + 7,72x_1^2 + 5,62x_2^2;$$

– для ржи:

$$Y = 106,22 + 51,77x_1 + 26,95x_2 + 27,7x_1x_2 + 9,53x_1^2 - 4,39x_2^2;$$

– для ячменя:

$$Y = 58,02 + 37,06x_1 + 19,84x_2 + 21,28x_1x_2 + 14,14x_1^2 + 14,21x_2^2;$$

– для овса:

$$Y = 101,82 + 27,39x_1 + 17,07x_2 + 17,88x_1x_2 - 12,92x_1^2 - 17,6x_2^2;$$

– для проса:

$$Y = 63,12 + 31,95x_1 + 21,85x_2 + 19,05x_1x_2 + 3,77x_1^2 - 12,87x_2^2;$$

– для вики:

$$Y = 85,22 + 46,02x_1 + 34,75x_2 + 33,23x_1x_2 + 13,05x_1^2 - 9,6x_2^2.$$

Адекватность проверялась с помощью критерия Фишера (F -критерия):

$$F_p = \frac{S_{\text{Ад}}^2\{y_1\}}{S_{\text{Вос}}^2\{y_i\}},$$

где $\frac{1}{S_{\text{Вос}}^2\{y_i\}}$ – дисперсия воспроизводимости; $\frac{S_{\text{Ад}}^2\{y_1\}}{1}$ – дисперсия адекватности.

Дисперсия $\frac{1}{S_{\text{Вос}}^2\{y_0\}}$ определялась по формуле:

Agricultural engineering

$$S_{\text{Вос}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{ou} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}$$

Дисперсия $S_{\text{Ад}}^2\{y\}$ определялась по формуле:

$$S_{\text{Ад}}^2\{y\} = \frac{S_R - S_E}{f},$$

где $f = N - k' - (n_0 - 1)$; k' – число статистически значимых коэффициентов регрессии.

$$S_R = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{ip} - y_{iэ})^2,$$

где y_{ip} – расчетные значения функции отклика в точках плана; $y_{iэ}$ – экспериментальные значения;

$$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{uo} - \bar{y}_0)^2.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 4, откуда следует, что модели адекватны, так как расчетные значения F_p -критерия меньше табличного F_T .

После перехода от кодированных значений к натуральным значениям факторов математические модели могут быть представлены в следующем виде:

Таблица 3
Table 3

Проверка значимости коэффициентов регрессии зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки
Checking the significance of the regression coefficients of the seeding rate dependence on the rotation speed and the roller operating length

Культура / Culture	Коэффициент / Ratio	Значения / Values		$S^2\{b_{ij}\}$	t_1	$t_{кр}$	Выводы / Conclusions
Пшеница / Wheat	B_0	Оценка коэффициентов регрессии / Estimation of regression coefficients	85,42	Проверка значимости коэффициентов регрессии / Checking the significance of regression coefficients	0,027	520	$t > t_{кр}$
	B_1		41,08		0,017	315	$t > t_{кр}$
	B_2		19,33		0,017	148	$t > t_{кр}$
	B_{12}		17,88		0,034	97	$t > t_{кр}$
	B_{11}		7,72		0,019	53	$t > t_{кр}$
	B_{22}		5,62		0,019	41	$t > t_{кр}$
Рожь / Rye	B_0		106,22		0,028	634	$t > t_{кр}$
	B_1		51,77		0,018	385	$t > t_{кр}$
	B_2		26,95		0,018	200	$t > t_{кр}$
	B_{12}		27,7		0,036	145	$t > t_{кр}$
	B_{11}		9,53		0,020	67	$t > t_{кр}$
	B_{22}		-4,39		0,020	31	$t > t_{кр}$
Ячмень / Barley	B_0		58,02		0,025	366	$t > t_{кр}$
	B_1		37,06		0,016	292	$t > t_{кр}$
	B_2		19,84		0,016	156	$t > t_{кр}$
	B_{12}		21,28		0,032	118	$t > t_{кр}$
	B_{11}		14,14		0,018	105	$t > t_{кр}$
	B_{22}		14,21		0,018	106	$t > t_{кр}$
Овес / Oats	B_0	101,82	0,037	529	$t > t_{кр}$		
	B_1	27,39	0,024	176	$t > t_{кр}$		
	B_2	17,07	0,024	110	$t > t_{кр}$		
	B_{12}	17,88	0,048	81	$t > t_{кр}$		
	B_{11}	-12,92	0,027	78,6	$t > t_{кр}$		
	B_{22}	-17,6	0,027	107,1	$t > t_{кр}$		
Просо / Millet	B_0	63,12	0,035	337	$t > t_{кр}$		
	B_1	31,95	0,022	215,4	$t > t_{кр}$		
	B_2	21,85	0,022	147	$t > t_{кр}$		
	B_{12}	19,05	0,044	90,8	$t > t_{кр}$		
	B_{11}	3,77	0,025	36	$t > t_{кр}$		
	B_{22}	-12,87	0,025	81	$t > t_{кр}$		
Вика / Vetch	B_0	85,22	0,058	353	$t > t_{кр}$		
	B_1	46,02	0,037	75	$t > t_{кр}$		
	B_2	34,75	0,037	180	$t > t_{кр}$		
	B_{12}	33,23	0,074	449	$t > t_{кр}$		
	B_{11}	13,05	0,042	63	$t > t_{кр}$		
	B_{22}	-9,60	0,042	46	$t > t_{кр}$		
	$N = 13$	$k = 2$	$n_0 = 5$	$m = 9$	$A = 0,498$	$C = 1,625$	$\lambda = 0,81$

При $v_{34} = 13 (9 - 1) = 104, t_{кр} = 1,98$

Проверка адекватности математической модели зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки
Verification of the adequacy of the mathematical model of the seeding rate dependence on the rotation speed and the roller operating length

Культура / Culture	Параметры / Parameter						
	$S_{\text{Вос}}^2$	S_R	S_E	f	$S_{\text{Ад}}^2$	F_P	F_T
Пшеница / Wheat	1,94	16,90	15,50		0,47	0,24	
Рожь / Rye	2,20	20,60	17,60		1,00	2,20	
Ячмень / Barley	0,90	8,30	7,20	3	0,37	0,41	6,10
Овес / Oats	2,65	24,10	21,20		0,97	0,37	
Просо / Millet	4,22	37,20	33,70		1,17	2,76	
Вика / Vetch	2,46	21,50	19,70		0,60	0,24	

– для пшеницы:

$$W_{\text{га}} = 97,2 - 3,1n_{\text{к}} - 4,7l_{\text{к}} + 0,18n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,08n_{\text{к}}^2 + 0,06l_{\text{к}}^2;$$

– для ржи:

$$W_{\text{га}} = 100 - 4,75n_{\text{к}} - 5l_{\text{к}} + 0,28n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,1n_{\text{к}}^2 + 0,04l_{\text{к}}^2;$$

– для ячменя:

$$W_{\text{га}} = 69,6 - 7,3n_{\text{к}} - 8,52l_{\text{к}} + 0,2n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,14n_{\text{к}}^2 + 0,14l_{\text{к}}^2;$$

– для овса:

$$W_{\text{га}} = -56,5 + 5,9n_{\text{к}} + 3,74l_{\text{к}} + 0,18n_{\text{к}}l_{\text{к}} - 0,13n_{\text{к}}^2 - 0,17l_{\text{к}}^2;$$

– для проса:

$$W_{\text{га}} = 10,4 - 2,2n_{\text{к}} + 2,19l_{\text{к}} + 0,19n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,04n_{\text{к}}^2 - 0,13l_{\text{к}}^2;$$

– для вики:

$$W_{\text{га}} = 110 - 8n_{\text{к}} + 1,25l_{\text{к}} + 0,33n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,130n_{\text{к}}^2 - 0,1l_{\text{к}}^2.$$

На рисунках 6–11 модели изображены в факторном пространстве с осями координат $W_{\text{га}}$, $n_{\text{к}}$ и $l_{\text{к}}$.

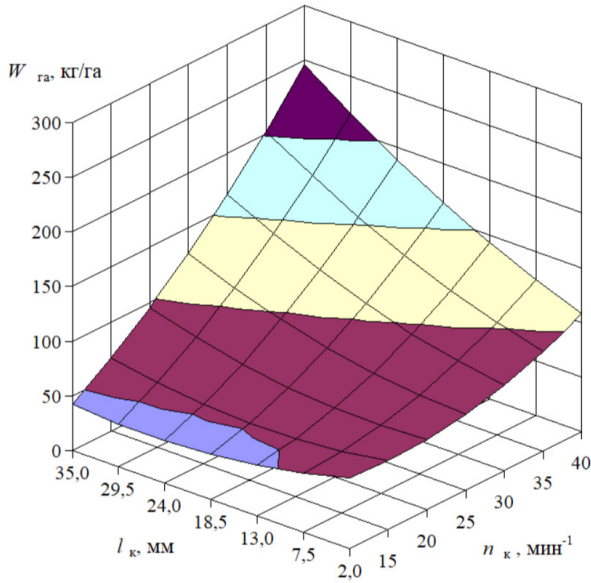
Обсуждение и заключение

Для стабильно высокой урожайности зерновых культур растениям необходимо получить достаточный объем питательных веществ, зависящий от площади питания, которая обусловлена заданной нормой высева, обеспечивающейся высевающим аппаратом.

В большинстве случаев в посевных агрегатах, например зерновой сеялки СУБМ-3,6, используются механические высевающие аппараты и в частности механический высевающий аппарат катушечного типа.

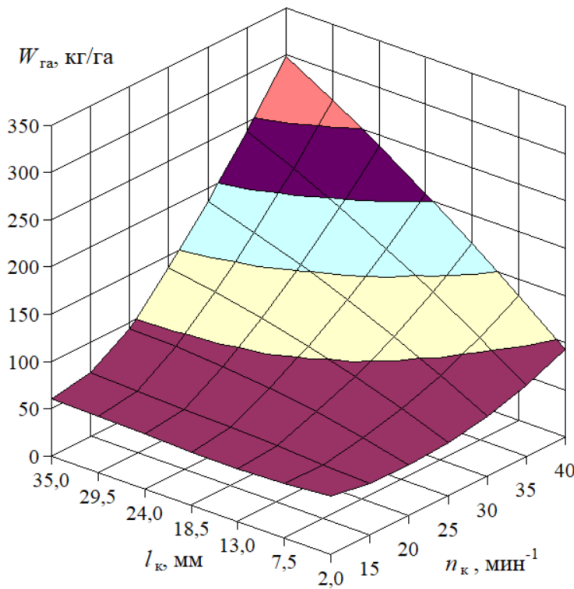
Главной характеристикой работы данного аппарата является производительность. Разработанный экспериментальный стенд и методика проведения экспериментальных исследований позволили построить математические модели зависимости производительности высевающего аппарата от частоты вращения приводного вала рабочих органов (катушек) $n_{\text{к}}$ (мин⁻¹) и длины вылета катушек $l_{\text{к}}$ (мм), в определенных областях действия частоты вращения катушки – от 10 до 60 мин⁻¹ и длины вылета катушки от 2 мм до 35 мм.

Полученные в результате экспериментальных исследований аналитические зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки позволят наиболее эффективно использовать работу высевающих зерновых катушечных аппаратов, что в свою очередь окажет влияние на выбор оптимальных режимов функционирования сеялки СУБМ-3,6.



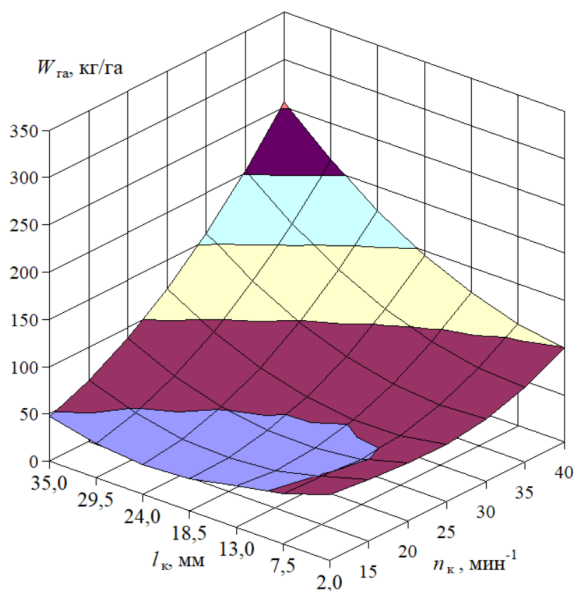
Р и с. 6. Модель зависимости нормы высева пшеницы катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки

F i g. 6. Model of the dependence of the rates of seeding wheat by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length

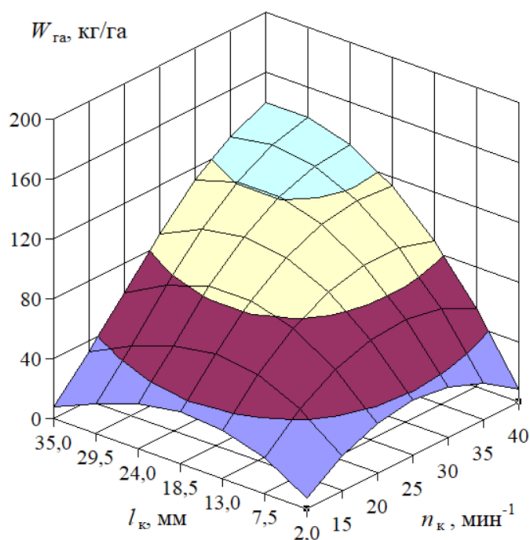


Р и с. 7. Модель зависимости нормы высева ржи катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки

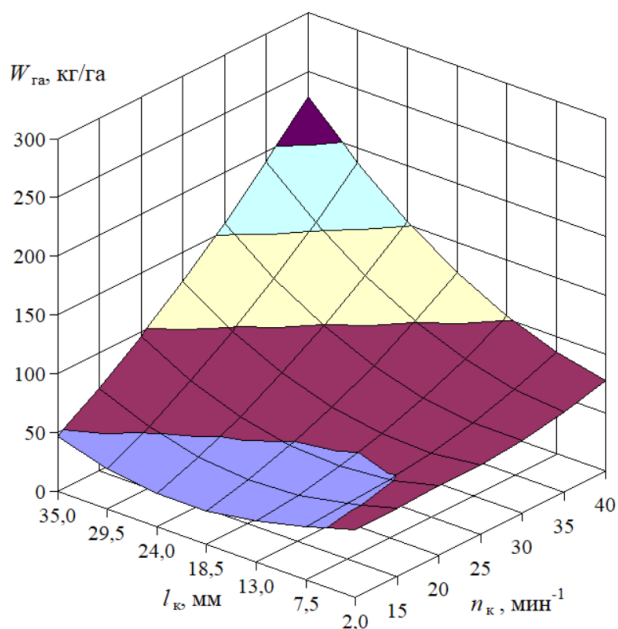
F i g. 7. Model of the dependence of the rates of seeding rye by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length



Р и с. 8. Модель зависимости нормы высева ячменя катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки
 F i g. 8. Model of the dependence of the rates of seeding barley by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length

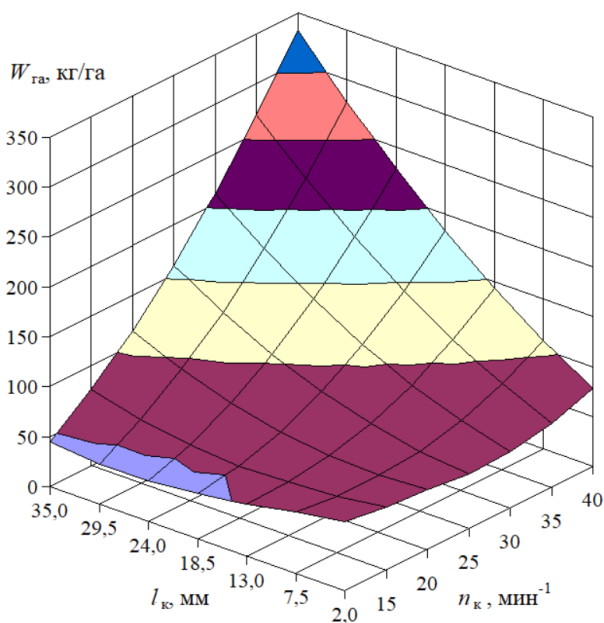


Р и с. 9. Модель зависимости нормы высева овса катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки
 F i g. 9. Model of the dependence of the rates of seeding oat by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length



Р и с. 10. Модель зависимости нормы высева проса катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки

Fig. 10. Model of the dependence of the rates of seeding millet by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length



Р и с. 11. Модель зависимости нормы высева вики катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки

Fig. 11. Model of the dependence of the rates of seeding vetch by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопьев М. Г. Продовольственная безопасность: анализ проекта доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации (часть II) // Региональные проблемы преобразования экономики. 2018. № 10. С. 7–12. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2018-10-7-12>
2. Гатаулина Е. А. Оценка структурных изменений в посевах зерновых и зернобобовых культур по материалам Всероссийской сельскохозяйственной переписи // Московский экономический журнал. 2017. № 4. С. 71. EDN: ZWIMRF
3. Solodun V. I., Amakova T. V. Efficiency of Direct Sowing Technology for Grain Crops Depending on the Predecessors and Backgrounds of the Main Tillage // Journal of Bio-Sciences. 2020. Vol. 101. P. 76–81. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2020-101-76-81>
4. Методические подходы к прогнозированию научно-технологического развития отрасли растениеводства / Е. В. Рудой [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31, № 10. С. 8–17. EDN: YMENBW
5. Джабаров Т. Д. Особенности роста и развития зерновых колосовых культур в зависимости от способов посева // Кишоварз. 2018. № 4. С. 11–13. EDN: XRBFI
6. A Solid Fertilizer and Seed Application Rate Measuring System for a Seed-fertilizer Drill Machine / Yu. Hongfeng [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 162. P. 836–844. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.007>
7. Delayed Sowing Increases Grain Number by Enhancing Spike Competition Capacity for Assimilates in Winter Wheat / Z. Yuangang [et al.] // European Journal of Agronomy. 2019. Vol. 104. P. 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.006>
8. Раднаев Д. Н., Зимина О. Г. Обоснование рациональных параметров сошника для посева зерновых культур с внесением удобрений ниже уровня семян // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 3 (59). С. 106–115. <https://doi.org/10.24412/1999-6837-2021-3-106-115>
9. Design of Automatic Seed Sowing Machine for Agriculture Sector / K. Ratnesh [et al.] // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 63. P. 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.188>
10. Припоров Е. В., Припоров И. В. Анализ зерновых сеялок для посева по традиционной технологии // Известия Оренбургского ГАУ. 2018. № 3 (71). С. 129–131. EDN: XRTRLV
11. Катущечный высевающий аппарат : патент 178778 Российская Федерация / Саков А. П. [и др.]. № 2017102130 ; заявл. 23.01.2017 ; опубл. 19.04.2018. Бюл. № 11. 5 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU178778U1_20180419.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
12. Механический высевающий аппарат : патент 162198 Российская Федерация / Шварц А. А., Овчаров А. А., Шварц С. А. № 2015155789/13 ; заявл. 24.12.2015 ; опубл. 27.05.2015. Бюл. № 15. 8 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2474103C1_20130210.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
13. Высевающий аппарат : патент 2502252 Российская Федерация / Исаев Ю. М., Семашкин Н. М., Назарова Н. Н. № 2012121862/13 ; заявл. 25.05.2012 ; опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36. 5 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2502252C1_20131227.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
14. Исаев Ю. М., Семашкин Н. М., Злобин В. А. Высев семян спирально-винтовым аппаратом // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 8–3. С. 75–76. URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=5944> (дата обращения: 21.12.2022).
15. Высевающий аппарат : патент 2556722 Российская Федерация / Балашов А. В., Белогорский В. П., Зайнушев Ж. Ж. № 2014121410/13 ; заявл. 27.05.2014 ; опубл. 20.07.2015. Бюл. № 20. 8 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37434565_66560037.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
16. Высевающий аппарат сеялки : патент 88245 Российская Федерация / Мамедов Ф. А., Денисов В. Н., Курилин С. П. № 2008111102/22 ; заявл. 25.03.2008 ; опубл. 10.11.2009. 15 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38452825_95455453.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
17. Макаренко А. Н., Мачкарин А. В., Рыжков А. В. Оптимизация высевающего аппарата для прямого посева // Сельский механизатор. 2014. № 12. С. 8–9. URL: <http://selmech.msk.ru/1214.html> (дата обращения: 21.12.2022).

18. Булавинцев Р. А. Анализ конструкций высевающих аппаратов для высева зерновых культур // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 2 (19). С. 74–84. EDN: XSJSOL

19. Результаты экспериментальных исследований работы туковысевающего аппарата и их практическое использование в работе сеялки СУБМ-3,6 / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Техника и оборудование для села. 2020. № 12 (282). С. 20–24. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-12-20-24>

Поступила 06.03.2023; одобрена после рецензирования 27.04.2023; принята к публикации 15.05.2023.

Об авторах:

Купряшкин Владимир Федорович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, kupwf@mail.ru

Наумкин Николай Иванович, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, ResearcherID: L-4643-2018, naumn@yandex.ru

Уланов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, Researcher ID: L-4662-2018, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Безруков Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8511-2743>, Researcher ID: N-5459-2016, bezrukow157@yandex.ru

Комолов Артем Денисович, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0290-1553>, Researcher ID: IAQ-9674-2023, komoartyom@yandex.ru

Антипов Юрий Анатольевич, магистрант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9147-7691>, antipovya@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В. Ф. Купряшкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, формирование выводов, доработка текста.

Н. И. Наумкин – формулирование основной концепции исследования, формирование выводов.

А. С. Уланов – проведение лабораторных исследований, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста, визуализация и редактирование.

А. В. Безруков – проведение лабораторных исследований, визуализация текста, обработка результатов теоретических исследований.

А. Д. Комолов – литературный и патентный анализ.

Ю. А. Антипов – анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Prokopiev M.G. Food Security: Analysis of a Draft of the Doctrine of Food Security of the Russian Federation (Part II). *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki*. 2018;(10):7–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2018-10-7-12>
2. Gataulina E.A. Evaluation of Structural Changes in Sown Areas under Cereals on Materials of All-Russian Agricultural Censuses. *Moscow Economic Journal*. 2017;(4):102. Available at: <https://qje.su/wp-content/uploads/2022/04/Nomer-4-2017.pdf> (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
3. Solodun V.I., Amakova T.V. [Efficiency of Direct Sowing Technology for Grain Crops Depending on the Precursors and Backgrounds of the Main Tillage]. *Journal of Bio-Sciences*. 2020;101:76–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2020-101-76-81>
4. Rudoy E.V., Ryumkin S.V., Petukhova M.S., Andronov A.Yu., Bykova S.L., Potseluev O.M., et al. Methodological Approaches to Forecasting Scientific and Technological Development of the Crop Industry. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex*. 2017;31(10):8–17. (In Russ.)
5. Jaborov T.D. Increase a Have Grand and Underground Biomass of Gracing Crops in Relation of Use of Organic and Mineral Fertilizers. *Kishovarz*. 2018;(4):11–13. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Hongfeng Yu., Yongqian D., Xiuqing F., Haitao L., Minfeng J., Chuanlei Y., et al. A Solid Fertilizer and Seed Application Rate Measuring System for a Seed-fertilizer Drill Machine. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;162:836–844. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.007>
7. Yuangang Z. Jinpeng C., Xinqlong D., Mingrong H. Delayed Sowing Increases Grain Number by Enhancing Spike Competition Capacity for Assimilates in Winter Wheat. *European Journal of Agronomy*. 2019;104:49–62. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.006>
8. Radnaev D.N., Zimina O.G. [Substantiation of Rational Parameters of a Coulter for Sowing Grain Crops with Fertilization Below the Seed Level]. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2021;(3):106–115. (In Russ.)
9. Ratnesh K., Aadhar G., Parth D., Shubh G., Saurabh D. Design of Automatic Seed Sowing Machine for Agriculture Sector. *Materials Today: Proceedings*. 2022;63:341–346. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.188>
10. Priporov E.V., Priporov I.V. [Analysis of Grain Seeders for Sowing by Traditional Technology]. *Izvestiya Orenburg GAU*. 2018;(3):129–131. (In Russ.)
11. Sakov A.P., Korchenkina N.A., Bogomolova Yu.A., Kistanov E.I., Oshurkov M.V. [Coil Seeding Machine]. Patent 178,778 Russian Federation. 2018 April 19. 5 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU178778U1_20180419.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
12. Schwartz A.A., Ovcharov A.A., Schwartz S.A. [Mechanical Seeding Apparatus]. Patent 162,198 Russian Federation. 2015 May 27. 8 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2474103C1_20130210.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
13. Isaev Yu.M., Semashkin N.M., Nazarova N.N. [Seeding Apparatus]. Patent 2,502,252 Russian Federation. 2013 December 27. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2502252C1_20131227.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
14. Isaev Yu.M., Semashkin N.M., Zlobin V.A. [Sowing Seeds with a Spiral-Screw Apparatus]. *International Journal of Experimental Education*. 2014;(8–3):75–76. Available at: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=5944> (In Russ.)
15. Balashov A.V., Belogorsky V.P., Zainushev Zh.Zh. [Seeding Apparatus]. Patent 2,556,722 Russian Federation. 2015 July 20. 8 p. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37434565_66560037.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
16. Mammadov F.A., Denisov V.N., Kurilin S.P. [Seeding Seeder Apparatus]. Patent 88,245 Russian Federation. 2009 November 10. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38452825_95455453.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
17. Makarenko A.N., Machkarin A.V., Ryzhkov A.V. Optimization of the Seeding Apparatus for Direct Sowing [Vibrating Seeding Apparatus for Sowing Winter Wheat Seeds]. *Rural Mechanizer*. 2014;(12):8–9. Available at: <http://selmech.msk.ru/1214.html> (accessed 21.12.2022). (In Russ.)

18. Bulavintsev R.A. Analysis of the Designs of Sowing Machines for Sowing Grain Crops. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2018;(2):74–84. (In Russ., abstract in Eng.)
19. Kupryashkin V.F. Glotov S.V., Ulanov A.S. Shlyapnikov M.G., Gusev A.Yu. The Results of Experimental Studies of the Operation of the Fertilizer Apparatus and their Practical Use in the Work of the Seeder SUBM-3,6. *Machinery and Equipment for the Village*. 2020;(12):20–24. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-12-20-24>

Submitted 06.03.2023; revised 27.04.2023; accepted 15.05.2023.

About the authors:

Vladimir F. Kupryashkin, Cand.Sci. (Engr.), Head of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, kupwf@mail.ru

Nikolay I. Naumkin, Dr.Sci. (Ped.), Cand.Sci. (Engr.), Professor of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, Researcher ID: L-4643-2018, naumn@yandex.ru

Aleksandr S. Ulanov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, Researcher ID: L-4662-2018, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Anatoliy V. Bezrukov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8511-2743>, Researcher ID: N-5459-2016, bezrukow157@yandex.ru

Artem D. Komolov, Postgraduate Student of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0290-1553>, Researcher ID: IAQ-9674-2023, komoartyom@yandex.ru

Yuriy A. Antipov, Master's Student of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9147-7691>, antipovya@yandex.ru

Authors contribution:

V. F. Kupryashkin – scientific guidance, formulation of the main concept of the study, formation of conclusions, revision of the text.

N. I. Naumkin – formulation of the research basic concept, formulation of conclusions.

A. S. Ulanov – laboratory research, processing experimental results, preparing the initial version of the text, visualization and editing.

A. V. Bezrukov – laboratory research, text visualization, processing the theoretical research results.

A. D. Komolov – literary and patent analysis.

Yu. A. Antipov – analyzing the literature.

All authors have read and approved the final manuscript.