

Разработка и обоснование параметров емкостного датчика высева семян пропашных культур

Анатолий Иванович Завражнов¹,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН;

Яков Петрович Лобачевский²,
доктор технических наук, член-корр. РАН;
Никита Юрьевич Пустоваров³,
аспирант, e-mail: nikita.pustovarov@mail.ru

¹Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

³Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация

Реферат. Для создания универсальной системы контроля высева семян различных культур необходимы унифицированные датчики. *(Цель исследования)* Разработать датчик высева емкостного типа, теоретически обосновав его конструктивные параметры и место установки датчика на сеялке. *(Материалы и методы)*. Провели теоретические расчеты траекторий полета семян для механического и пневматического высевочных аппаратов с помощью программных комплексов Mathcad и Microsoft Excel при скорости вращения диска высевочного аппарата 11,5; 17,5 и 26,0 оборотов в минуту. Выполнили расчет электрических параметров разрабатываемого датчика высева. Изучили траектории с помощью высокоскоростной съемки высева на экспериментальной установке с последующей обработкой полученных видеоматериалов. Разработали программное обеспечение для лабораторных исследований оптимального угла установки датчика, чтобы минимизировать время пролета семян через чувствительную зону датчика, и как следствие – повысить разрешающую способность датчика. Изучили несколько вариантов установки датчика под различными углами в диапазоне от 0 до 67,5 градуса, с шагом 22,5 градуса. *(Результаты и обсуждение)* Получили геометрические и электрические параметры разрабатываемого датчика высева. Определили оптимальное место и положение установки датчика. *(Выводы)* Выявили, что длина чувствительной зоны датчика составит не менее 55 миллиметров. В ходе лабораторных исследований получили данные, схожие с результатами расчетов. Относительное значение коэффициента сходимости между полученными экспериментально и теоретическими показателями не превышает 0,55 при условии, что данные значения получены на расстоянии, которое меньше радиуса семян. Рассчитали электрические параметры датчика и минимальное расстояние между обкладками датчика, составляющее 20 миллиметров. Установили, что для надежной регистрации отдельных семян высота чувствительной зоны должна быть не менее 5 миллиметров. Создали экспериментальный датчик высева, с помощью которого определили оптимальный угол и место установки датчика. Заключение, что для минимизации времени пролета семян в чувствительной зоне датчика необходимо устанавливать его перпендикулярно траектории полета семян. **Ключевые слова:** посев, высевочный аппарат, частота вращения диска высевочного аппарата, система контроля высева семян, емкостный датчик высева семян.

■ **Для цитирования:** Завражнов А.И., Лобачевский Я.П., Пустоваров Н.Ю. Разработка и обоснование параметров емкостного датчика высева семян пропашных культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №2. С. 4-9. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-2-4-9.

Development and Determination of the Parameters of a Capacitive Seed Sowing Sensor for Row Crops

Anatoliy I. Zavrazhnov¹,
Dr.Sc.(Eng.), Professor, Academician of the Russian
Academy of Sciences, e-mail: aiz@mgau.ru;

Yakov P. Lobachevskiy²,
Dr.Sc.(Eng.), Corresponding Member of the Russian
Academy of Sciences, Chief Researcher;
Nikita Yu. Pustovarov³,
postgraduate student, e-mail: nikita.pustovarov@mail.ru

¹Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

³All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Oil Products in Agriculture, Tambov, Russian Federation

Abstract. The development of a universal control system requires designing unified seed sowing sensors that allow controlling the sowing of seeds of different crops. (*Research purpose*) To provide theoretical grounds for the determination of parameters and installation location of a capacitive seeding sensor. (*Materials and methods*) In the course of the study, the authors have made theoretical calculations of the seed travel trajectories in mechanical and pneumatic sowing machines using the Mathcad and Microsoft Excel software systems, at various sowing machine frequencies: 11.5; 17.5 and 26.0 revolutions per minute as well as the calculation of the electrical parameters of the designed seeding sensor. Laboratory studies of the trajectory have been performed at the same rotational speeds of the sowing unit disc using high-speed seeding surveys on an experimental installation with subsequent processing of the obtained video materials. The optimum installation angle of the sensor has been experimentally studied from 0 to 67.5 degrees with a pace of 22.5 degrees to minimize the travel time of seeds through the sensitive area of the sensor, and as a result, to increase the sensor resolution using the developed software. (*Results and discussion*) Geometric and electrical parameters of the designed sowing sensor have been obtained, and its optimum location has been determined. (*Conclusions*) In the course of laboratory studies, data similar to the calculation results have been obtained; the relative value of the convergence coefficient between experimentally obtained and theoretical indicators does not exceed 0.55, provided these values are obtained at a distance less than the radius of seeds. The authors have experimentally determined the minimum distance between the sensor plates, which amounts to 20 millimetre, and calculated the electrical parameters of the sensor. They have also stated that the height of the sensitive zone should be at least 5 millimeters for reliable metering of individual seeds under these conditions. The obtained data allowed designing an experimental seeding sensor to determine the optimum angle and the sensor installation site. It has been concluded, that in order to minimize the travel time of seeds in the sensitive area of the sensor, the latter should be installed perpendicularly to the flight trajectory of the seeds.

Keywords: sowing, sowing machine, rotational speed of the disc sowing unit, control system of seeding, capacitive seed sowing sensor.

■ For citation: Zavrazhnov A.I., Lobachevskiy Ya.P., Pustovarov N.Yu. Razrabotka i obosnovanie parametrov emkostnogo datchika vyseva semyan propashnykh kul'tur [Development and determination of the parameters of a capacitive seed sowing sensor for row crops]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 4-9. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-4-9 ((In Russian).

Посев – одна из важнейших агротехнических операций, от которой напрямую зависит урожайность сельскохозяйственных культур. Потери при посеве обусловлены прекращением высева, отклонениями от нормы и равномерности высева, а также от средней глубины заделки семян.

Сплошные посевы характеризуются отсутствием высева одним или несколькими высевающими аппаратами или всей сеялкой во время движения посевного агрегата, которые обнаруживаются только после появления всходов [1-3]. Возможно их устранение пересевом, который требует дополнительных затрат труда и средств, но при этом растения отстают в развитии и снижается урожайность. Сплошные посевы возникают при механических поломках, неправильной регулировке, отсутствии вакуума, отсутствии или сведообразовании семян в бункере, наличии посторонних предметов в массе семян, забивании сошника почвой и составляют примерно 1,5-4,5% площади засеянного поля [4].

Контроль процесса посева с помощью специальной системы, устанавливаемой на пропашных сеялках, позволит снизить потери урожая благодаря оперативному реагированию механизатора на воз-

никающие технологические и технические отказы и своевременному их устранению [5-6]. В ходе анализа систем контроля высева семян и их составных частей, в том числе датчиков высева, было принято решение о проектировании датчиков высева емкостного типа, которые имеют высокие разрешающую способность, чувствительность, работоспособность в условиях сильной запыленности, надежны и доступны по стоимости [7-10].

Цель исследования – разработать датчик высева емкостного типа, теоретически обосновав его конструктивные параметры и место установки на сеялке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. При проведении расчетов траектории пролета семян использованы параметры пневматического и механического высевающего аппарата с диском. Радиус диска с учетом трапецеидального паза равен 102 мм для механического высевающего аппарата и 84 мм – для пневматического. Скорость вращения диска высевающего аппарата составляла 11,5; 17,5 и 26,0 об/мин.

Теоретический расчет траектории полета на примере семян сои без учета сопротивления воздуха проводили по формуле:

$$\begin{cases} x = V_{0x} \cdot t \\ y = -\frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases},$$

где V_{0x} – начальная скорость семени, м/с;

t – время, с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Для более точного определения траектории полета семян необходимо учитывать влияние силы сопротивления воздуха, поэтому система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} x = V_{0x} \cdot t - \frac{a_x \cdot t^2}{2} \\ y = \frac{a_y \cdot t^2}{2} - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases}, \quad (2)$$

где a_x и a_y – ускорения по соответствующим осям, м/с².

Силу сопротивления воздуха определим по формуле:

$$F_{\text{сопр}} = C_x \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_{\text{мид}}, \quad (3)$$

где $C_x = 0,4$ – коэффициент лобового сопротивления (для семян шарообразной формы),

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

V – скорость полета семени, м/с;

$S_{\text{мид}}$ – площадь поперечного сечения семени, м².

После преобразования система уравнений (2) с учетом выражения (3) принимает вид:

$$\begin{cases} x = V_{0x} \cdot t - \frac{C_x \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot t^2}{4 \cdot m} \\ y = \frac{C_x \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot t^2}{4 \cdot m} - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

где V_x и V_y – скорости движения семян по соответствующим осям, м/с;

m – масса семени, кг.

Выражая начальную скорость семени через частоту оборотов диска высевашего аппарата, получим:

$$\begin{cases} t = -\frac{\sqrt{m^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot r^2 \cdot \pi^2}{900} - C_x \cdot m \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot x - m \cdot \frac{\omega \cdot r \cdot \pi}{15}}}{4 \cdot m} \\ y = \frac{C_x \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot t^2}{4 \cdot m} - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases}, \quad (5)$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

r – радиус диска высевашего аппарата, м.

В окончательном виде уравнение теоретической траектории полета семени может быть представлено следующим образом:

$$y = \frac{\left(\sqrt{m^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot r^2 \cdot \pi^2}{900} - C_x \cdot m \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot x - m \cdot \frac{\omega \cdot r \cdot \pi}{15}} \right)^2}{128 \cdot m^3} \cdot (C_x \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} - 4 \cdot m \cdot g) \quad (6)$$

В ходе лабораторных исследований траектории полета семян применяли специальную установку, разработанную в лаборатории «Использование МТА» ФГБНУ ВНИИТиН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В результате численного эксперимента с использованием выражения (6) получены теоретические траектории полета семян сои в зависимости от частоты вращения диска механического и пневматического высевашего аппарата (рис. 1).

При проведении экспериментов траекторию полета семян, выпавших из ячеек экспериментальных

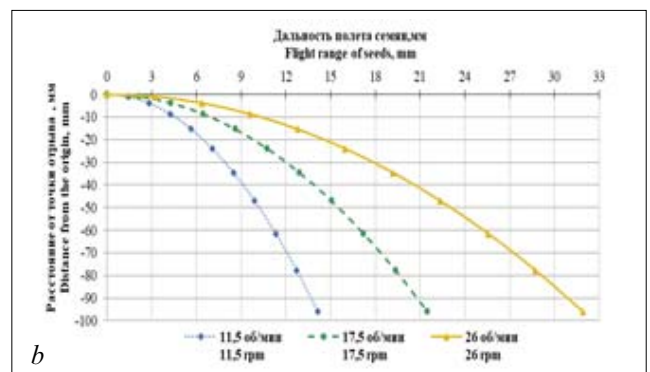
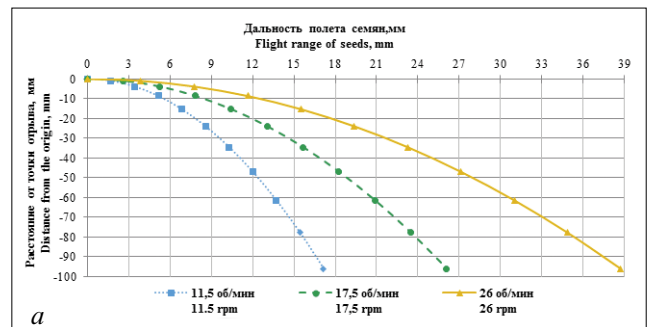


Рис. 1. Теоретические траектории полета семян сои в зависимости от частоты вращения диска:

a – механического высевашего аппарата;

b – пневматического высевашего аппарата

Fig. 1. The trajectory of seeds depending on the air resistance

a – for a mechanical sowing unit

b – for a pneumatic sowing unit

дисков, в зависимости от частоты их вращения изучали на установке с использованием высокоскоростной видеосъемки на камеру GoPro HERO4.

Полученные данные обработали с наложением траектории отдельного семени в разные моменты времени (рис. 2).

Работу над видеоматериалами проводили на ЭВМ по специально разработанной методике, в ре-



Рис. 2. Траектория отдельного семени

Fig. 2. Trajectory of a single seed

зультате которой определяли координаты траектории отдельного семени в конкретный момент времени через чувствительные пластины датчика. Фиксацию координат осуществляли на сетке, нанесенной на листе с шагом 3 мм.

За нулевую точку (0; 0) принимали точку начала выпадения семени из ячейки диска или отрыва семени от отверстия на диске после отсечки вакуума при использовании пневматического высевающего аппарата. Данные о координатах траектории семени заносили в программу для статистической обработки полученной информации *Microsoft Excel*. На основе анализа покадровой обработки данных экспериментов получены графики траектории полета семян в зависимости от частоты вращения механического высевающего диска (рис. 3).

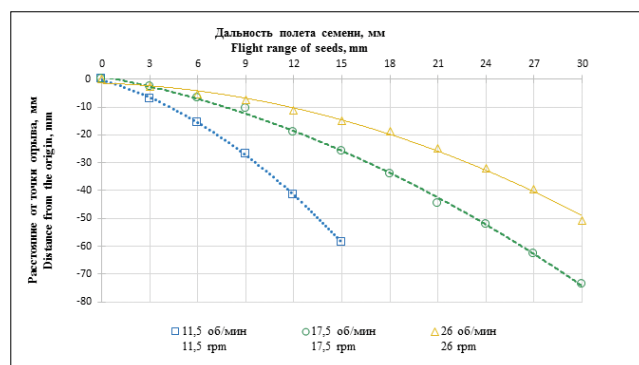


Рис. 3. Траектории полета семян в зависимости от частоты вращения механического высевающего диска (экспериментальные данные)

Fig. 3. Flight path of seeds depending on the frequency of the seed disc rotation

В результате обработки теоретических и экспериментальных данных рассчитаны значения относительной сходимости теоретических и практически полученных значений по каждой точке траектории (табл. 1). Исходя из полученных значений

Таблица 1		Table 1	
Величина относительной сходимости между теоретическими и практическими значениями в каждой точке траектории VALUES OF THE RELATIVE CONVERGENCE			
Дальность полета семян, мм Flight range of seeds, mm	Частота вращения диска высевающего аппарата, об/мин Rotation speed of the seeding disc, rpm		
	11,5	17,5	26
0	0	0	0
3	0,406	0,484	0,550
6	0,173	0,352	0,388
9	0,004	0,186	0,210
12	0,090	0,192	0,115
15	0,184	0,122	0,033
18	-	0,069	0,077
21	-	0,051	0,099
24	-	0,024	0,112
27	-	0,062	0,131
30	-	0,110	0,120

был сделан вывод об адекватности предложенной теоретической модели.

Разрабатываемый датчик высева должен быть универсальным, то есть подходить для определения семян различного размера. Семена люпина обладают самыми большими размерами среди семян пропашных культур, высеваемых в Тамбовской области. Их диаметр в поперечнике может достигать до 15 мм. Соответственно, расстояние между обкладками датчика должно обеспечивать беспрепятственный пролет семян. Поэтому за требуемое минимальное расстояние между обкладками было принято расстояние 20 мм.

Кроме того, при учете минимального расстояния между пластинами датчик должен обеспечивать надежную регистрацию семян самой маленькой фракции.

Емкость конденсатора вычисляют по формуле:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d}, \quad (7)$$

где C – емкость, Ф;

ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м;

ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;

S – площадь конденсатора, м²;

d – расстояние между обкладками конденсатора, мм.

Опытным путем установили, что достаточным условием для надежного срабатывания датчика является изменение емкости на 5%.

В ходе расчетов получили следующие параметры датчика: длина чувствительной зоны – 55 мм (с учетом удлинения на 55% для обеспечения контроля в случаях несвоевременного выпадения се-

мян из ячеек), расстояние между пластинами – 20 мм, высота чувствительной зоны – 5 мм. При слишком низкой установке датчика в полости сошника есть вероятность механического повреждения и забивания почвой сошника и, соответственно, датчика. Поэтому датчик следует устанавливать не ниже 50 мм от точки отрыва.

Изменение емкости, происходящее при пролете семян моркови (как семян самой маленькой фракции), согласно формуле (7), составляет 0,008 пФ. При приведенных параметрах изменение емкости будет составлять 6,6%, что является достаточным для надежной регистрации пролета семян через датчик.

Для отображения достоверной информации о норме высева необходимо минимизировать время пролета семени через чувствительную зону датчика. Для этого был изготовлен емкостной датчик высева семян (рис. 4) и проведены исследования, позволяющие судить об оптимальном угле установки датчика в сошнике.

Опыты проводили с датчиком высева, закрепленным на штативе, подключенным к персональ-



Рис. 4. Экспериментальный емкостной датчик высева семян
Fig. 4. Experimental capacitive seed sowing sensor

ному компьютеру через LPT-порт с помощью разработанного ПО, обрабатывающего сигнал с дат-

чика высева и позволяющего определить протяженность импульса, возникающего при пролете семени через датчик с точностью до одной миллисекунды. Повторность опыта 300-кратная для каждой культуры и для каждого угла установки датчика. Угол изменяли от 0° до 67,5° с шагом в 22,5° (табл. 2).

Высокое значение коэффициента вариации обусловлено большой разницей формы, размеров и массы среди семян одной культуры.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о соответствии экспериментальных данных теоретическим исследованиям и возможности использования предложенных зависимостей для различных расчетов.

Разработали датчик высева семян емкостного типа, определили его параметры и оптимальное место его установки – полость сошника, поскольку для расчета текущих параметров высева необходимо контролировать процесс высева максимально близко к выходу системы.

В данном случае длина чувствительной зоны, с учетом запаса, например на застревание семени в ячейке высевающего диска, должна составлять 55 мм, расстояние между обкладками датчика – 20 мм, высота чувствительной зоны – 5 мм с учетом электрических параметров датчика, высота установки – не ниже 50 мм от точки отрыва. Для минимизации времени пролета семян через чувствительную зону датчика его следует устанавливать в полости сошника горизонтально.

Таблица 2				Table 2				
ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА СЕМЯН РАЗЛИЧНЫХ КУЛЬТУР ОТ УГЛА УСТАНОВКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЗОНЫ ДАТЧИКА RELATIONSHIP BETWEEN THE AVERAGE TRAVEL TIME OF SEEDS AND THE INSTALLATION ANGLE THE SENSITIVE ZONE OF THE SENSOR								
Культуры Crops	0°		22,5°		45,0°		67,5°	
	Среднее время, мс Average time, ms	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Среднее время, мс Average time, ms	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Среднее время, мс Average time, ms	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Среднее время, мс Average time, ms	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %
Люпин Lupine	14,03	14,23	18,51	6,28	19,92	9,87	22,59	7,53
Кукуруза Corn	12,38	9,18	13,99	5,88	18,53	9,71	20,11	7,03
Свекла Beetroot	8,95	9,47	11,03	7,44	12,11	11,35	16,04	8,94
Соя Soybean	11,98	6,97	13,04	6,23	14,53	7,41	17,02	4,93
Подсолнечник Sunflower	12,38	13,32	15,69	10,92	17,85	11,17	20,91	7,14
Горох Peas	14,93	17,66	16,62	13,48	18,07	13,86	19,93	14,08
Морковь Carrot	8,04	10,14	8,96	9,51	9,46	11,40	10,50	10,61



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gebbers R., Adamchuk V. Precision Agriculture and Food Security. *Science*. 2010. 327(5967). 828-831.
2. Руденко В.П. Полтавская технология посева. Полтава: Копи-Центр. 2013. 54 с.
3. Bauckhage C., Kersting K. Data Mining and Pattern Recognition in Agriculture. *Künstliche Intelligenz*. 2013. N27(4). 313-324.
4. Балашов А.В., Стрыгин С.П., Синельников А.А., Пустоваров Н.Ю., Хайруллина С.Г. Исследование контролируемого гнездового посева семян сои // *Наука в центральной России*. 2017. №6. С. 6-17.
5. Завражных А.И., Балашов А.В., Стрыгин С.П., Крищенко А.В., Пустоваров Н.Ю. Система контроля высева семян // *Сельский механизатор*. 2017. №12. С. 18-21.
6. Колчина Л.М. Автоматические системы технологического контроля посевной техники // *Техника и оборудо-*

7. Бочагин А.И. Регистрация посевного материала в семяпроводе пьезорезонансным датчиком высева // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2012. Т. 7. N2(24). С. 49-52.
8. Зазуля А.Н., Балашов А.В., Белогорский В.П. Энергосберегающая технология возделывания сахарной свеклы // *Наука в центральной России*. 2015. N3(15). С. 117-126.
9. Несмиян А.Ю., Ценч Ю.С. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 45-52.
10. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовойтов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 150-156.

REFERENCES

1. Gebbers R., Adamchuk V. Precision Agriculture and Food Security. *Science*. 2010. 327(5967). 828-831 (In English).
2. Rudenko V.P. Poltavskaya tekhnologiya poseva [Poltava seeding technology]. Poltava: Izd-vo OOO "Kopi-Tsentr". 2013. 54 (In Russian).
3. Bauckhage C., Kersting K. Data Mining and Pattern Recognition in Agriculture. *Künstliche Intelligenz*. 2013. N27(4). 313-324 (In English).
4. Balashov A.V., Strygin S.P., Sinel'nikov A.A., Pustovarov A.Yu., Khayrullina S.G. Issledovaniye kontroliruemogo gnezdovogo poseva semyan soi [Study of a controlled cluster sowing of soybean seeds]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2017. №6. 6-17 (In Russian).
5. Zavrzhnyov A.I., Balashov A.V., Strygin S.P., Krishchenko A.V., Pustovarov N.Yu. Sistema kontrolya vyseva semyan [Control system of seeding]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2017. №12. 18-21 (In Russian).
6. Kolchina L.M. Avtomaticheskiye sistemy tekhnologicheskogo kontrolya posevnoy tekhniki [Automatic systems of the technological control of sowing equipment]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2014. N3. 6-9 (In Russian).

7. Bochagin A.I. Registratsiya posevnogo materiala v seymaprovede p'yezorezonansnym datchikom vyseva [Seed metering in a seed drill tube with a piezo-resonance seeding sensor]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. Vol. 7. N2(24). 49-52 (In Russian).
8. Zazulya A.N., Balashov A.V., Belogorskiy V.P. Energo-sberegayushchaya tekhnologiya vozdeleyvaniya sakharnoy svekly [Energy saving technology of sugar beet cultivation]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2015. N3 (15). 117-126 (In Russian).
9. Nesmiyan A.Yu., Tsench Yu.S. Tendentsii i perspektivy razvitiya otechestvennoy tekhniki dlya poseva zernovykh kul'tur [Trends and prospects of development of domestic equipment for sowing grain crops]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. T. 12. N3. 45-52 (In Russian).
10. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Starovoytov S.I., Kynev N.G. Tendentsii razvitiya progressivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhniki v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 11.02.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 11.02.2019

Статья принята к публикации 10.04.2019
The paper was accepted
for publication on 10.04.2019