



Влияние диаметра присасывающих отверстий аппарата точного высева на характеристики подачи семян кукурузы и подсолнечника

А. Ю. Несмиян , К. П. Дубина, А. П. Жигайлова

*Азово-Черноморский инженерный институт Донского ГАУ
(г. Зерноград, Российская Федерация)*

 nesmiyan.andrei@yandex.ru

Аннотация

Введение. Исследование рабочих процессов пропашных сеялок, их совершенствование, повышение производительности и качества работы являются актуальными агроинженерными задачами.

Цель статьи. Формирование предложений по оптимизации конструкции вакуумных аппаратов пропашных сеялок на основе анализа закономерностей процесса дозирования семян подсолнечника и кукурузы присасывающими отверстиями их высевающих дисков.

Материалы и методы. Характеристики работы вакуумного высевающего аппарата зависят от диаметра присасывающих отверстий и величины разрежения в вакуумной камере. Гипотетически можно предположить, что при постоянном расчетном значении силы присасывания можно подобрать такое их соотношение, при котором количество пропусков и групповых подач семян не будет превышать допуски агротребований. Проверка этого предположения проводилась экспериментально в лабораторных условиях.

Результаты исследования. Найдены полиномы, с высокой точностью описывающие зависимость вероятности образования групповых подач семян подсолнечника и кукурузы от диаметра присасывающих отверстий.

Обсуждение и заключение. Частота групповых подач семян менее 0,05 будет обеспечиваться при диаметре присасывающих отверстий около 0,8 мм для подсолнечника и около 1,9 мм для кукурузы. При этом значения разрежений в вакуумной камере должны будут составлять 31–56 кПа, что превосходит возможности пневмосистем существующих пропашных сеялок. Соответственно, модернизация высевающих аппаратов вакуумных пропашных сеялок за счет уменьшения диаметра присасывающих отверстий должна сопровождаться дополнительными усовершенствованиями, направленными на повышение их захватывающей способности.

Ключевые слова: пропашные культуры, вакуумный высевающий аппарат, диаметр присасывающих отверстий, групповые подачи семян, разрежение, сбрасыватель лишних семян

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.




Для цитирования: Несмиян А. Ю., Дубина К. П., Жигайлова А. П. Влияние диаметра присасывающих отверстий аппарата точного высева на характеристики подачи семян кукурузы и подсолнечника // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 21–36. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.021-036>

Original article

Influence of Suction Hole Diameter of Precision Seed Machine on the Characteristics of Feeding Corn and Sunflower Seeds

A. Yu. Nesmiyan , K. P. Dubina, A. P. Zhigailova

Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (Zernograd, Russian Federation)

 nesmiyan.andrei@yandex.ru

Abstract

Introduction. The study of working processes of row crop seeders, their improvement, increase in productivity and (or) quality of work are topical agroengineering tasks.

Aim of the Article. The article deals with developing proposals to optimize the design of vacuum mechanisms for row crop seeders based on the analysis of the laws of the process of dosing sunflower and corn seeds by suction holes of the seed discs.

Materials and Methods. The operation characteristics of the vacuum seeding mechanism depend on the diameter of the suction holes and the rarefaction in the vacuum chamber. Hypothetically, it can be assumed that with a constant calculated value of the suction force, it is possible to choose a ratio of these characteristics in which the number of skips and group feeding of seeds will not exceed the tolerance of agro-requirements. Verification of this assumption was carried out experimentally in laboratory conditions.

Results. There were found polynomials describing with a fair degree of accuracy the dependence of formation of group feedings of sunflower and corn seeds on the diameter of suction holes.

Discussion and Conclusion. The frequency of group feeding of the seeds less than 0.05% will be achieved with suction hole diameters of about 0.8 mm for sunflower and about 1.9 mm for corn. In this case, the values of rarefaction in the vacuum chamber must be 31–56 kPa that exceeds the capabilities of the pneumatic systems of existing row seeders. Accordingly, the modernization of the seeding mechanisms of vacuum row seeders by reducing the diameter of the suction holes should be accompanied by additional improvements aimed at increasing their gripping ability.

Keywords: row crops, vacuum seeding mechanism, diameter of suction holes, group feeding of seeds, rarefaction, ejector of extra seeds

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

Funding: The study was financially supported by the Foundation for the Promotion of Innovation.

For citation: Nesmiyan A.Yu., Dubina K.P., Zhigailova A.P. Influence of Suction Hole Diameter of Precision Seed Machine on the Characteristics of Feeding Corn and Sunflower Seeds. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):21–36. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.021-036>

Введение

Важной составляющей производимой сельскохозяйственной продукции как в стране, так и во всем мире являются пропашные культуры, к которым относят подсолнечник, бахчевые, кукурузу, сахарную свеклу и др.¹. Благодаря высокому уровню рентабельности и новым направлениям реализации объемы производства возрастают² [1; 2]. Например, с начала XXI века площади, занятые сахарной свеклой и подсолнечником в РФ, выросли приблизительно в полтора раза, а кукурузой на зерно – больше чем в 3 раза. Посевные площади основных пропашных культур на данном этапе возросли практически на 2,4 млн га. На их долю в общей структуре российских посевных площадей, с учетом варьирования по годам, приходится 21–25 %, из которых около 40 % заняты подсолнечником и около 20 % кукурузой. В отдельных случаях их популярность среди сельхозпроизводителей настолько велика, что уровень производства (например, подсолнечника) сдерживали законодательно³.

Пропашные культуры отличаются высокой требовательностью к условиям возделывания, в том числе и по агроклиматическим условиям [3]. В связи

с потребностью в высоком уровне инсоляции пропашные культуры неравномерно распределены по сельскохозяйственным зонам РФ. Можно отметить шесть регионов страны (Ростовская область, Краснодарский край, Воронежская область, Оренбургская область, Волгоградская область и Ставропольский край), в которых сосредоточено почти 50 % посевов подсолнечника и почти 60 % посевов кукурузы на зерно⁴. Для большинства из этих регионов характерны засушливые условия, которые накладывают специфические ограничения на показатели реализации большинства технологических операций, в том числе и на такую базовую операцию, как посев.

Посев пропашных культур, особенно в засушливых условиях, должен проводиться в сжатые сроки, соответствующие оптимальному состоянию почвы по влажности и температуре на глубине заделки семян [4–7]. Так, в советские годы нормативная загрузка пропашной (кукурузной) сеялки составляла около 60 ч, что для восьмизрядковой сеялки соответствовало примерно 200 га посевов⁵. В настоящее время в условиях определенной недостаточности технического оснащения части аграрных предприятий годовая нагрузка на сельскохозяйственные машины

¹ РОССТАТ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/bgd/free> (дата обращения: 28.06.2022) ; Несмиян А. Ю. Совершенствование технологического процесса высева семян тыквы аппаратом пневматической сеялки : дис. ... канд. техн. наук. Зерноград : Донской государственный аграрный университет, 2003. 139 с. ; QDAF, Varieties and Planting of Maize [Электронный ресурс] // Department of Agriculture, Fisheries and Forestry Queensland, 2016. URL: <https://www.daf.qld.gov.au/business-priorities/agriculture/plants/crops-pastures/broadacre-field-crops/varieties-planting-maize> (дата обращения: 17.09.2022) ; World of Corn. U.S Production Per State from USDA Data [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldofcorn.com/#us-corn-production-by-state> (дата обращения: 17.09.2022).

² Maize Production Technologies in India [Электронный ресурс] / С. М. Parihar [et al.] // DMR Technical Bulletin. Directorate of Maize Research. 2011. URL: <https://iimr.icar.gov.in/wp-content/uploads/2020/03/Maize-production-technologies-03012017.pdf> (дата обращения: 17.09.2022).

³ Постановление администрации Ростовской области от 16 апреля 2009 года N 182 «Об утверждении Правил рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в Ростовской области» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/816100094#8MQN79> (дата обращения: 17.09.2022).

⁴ РОССТАТ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/bgd/free> (дата обращения: 28.06.2022).

⁵ Нормативная годовая загрузка тракторов и сельскохозяйственных машин (справочное) [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/2905742/page:58> (дата обращения: 05.07.2022).

существенно возросла. Как показывает практика, в отдельных хозяйствах годовая загрузка пропашных сеялок доходит до 500 га и более. Решая проблему затягивания сроков посева, производители пытаются реализовывать эту операцию на повышенных рабочих скоростях агрегатов, что на классических сеялках приводит к снижению качества посева как по показателю распределения семян по площади поверхности поля, так и по глубине заделки⁶ [8; 9]. Таким образом, исследование рабочих процессов элементов пропашных сеялок, оптимизация их конструкции, повышение производительности и (или) качества реализации процессов является актуальной задачей, решение которой будет иметь значение для растениеводческой отрасли сельскохозяйственного производства [10–13].

Цель статьи – формирование предложений по оптимизации конструкции вакуумных аппаратов пропашных сеялок на основе анализа закономерностей процесса дозирования семян подсолнечника и кукурузы присасывающими отверстиями их высевальных дисков.

Обзор литературы

Одним из важнейших узлов пропашных сеялок является высевальной аппарат⁷ [14–16], обеспечивающий поштучное дозирование семян и примерно равномерную подачу их в борозду, подготовленную сошником. По типу высевальных аппаратов сеялки делятся на механические [17] и пневматические (вакуумные и избыточного давления)⁸ [18–20]. Аппараты избыточного давления наибольшее распространение получили на американском континенте,

хотя в настоящее время и в нашей стране ведутся работы по их массовому внедрению в практику на предприятиях отечественного сельхозмашиностроения [21–24]. В европейских и азиатских странах, в том числе и в Российской Федерации, производители отдают предпочтение вакуумным машинам, к которым относятся почти 80 % марок используемых в России пропашных сеялок⁹.

Основным рабочим элементом вакуумных аппаратов является высевальной диск с выполненными в нем присасывающими отверстиями (в подавляющем большинстве случаев круглой формы), диаметр которых на 30–50 % меньше усредненного приведенного значения диаметра высеваемых семян¹⁰ [25–27]. С одной стороны диска расположен слой посевного материала, с другой создается разрежение, обуславливающее возникновение силы присасывания $P_{пр}$ (рис. 1), которая формирует условно полезную силу трения $P_{трд}$ диска о семя, компенсирующую условно вредную равнодействующую R сил сопротивления, противодействующих выносу семени, и позволяющую удержать его у присасывающего отверстия при вращении высевальной диска [26; 27].

С целью оптимизации соотношения этих сил как отечественными, так и зарубежными исследователями были предложены различные варианты модификации или модернизации высевальных аппаратов: использование выступов или ниппелей, нанесение напылений на высевальной диск, применение дополнительных активаторов семян [28]; применение дозирующих элементов

⁶ Чернышов А. В., Солдатов Ю. И. Экспериментальное исследование качества посева сои высевальной секцией сеялки ТСМ-4150 // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования: материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (на иностранных языках). Воронеж, 2022. С. 78–82.

⁷ Несмиян А. Ю. Совершенствование технологического процесса посева...

⁸ Оптимизация вакуумных высевальных аппаратов пропашных сеялок / А. Ю. Несмиян [и др.].
Зерноград, 2013. 176 с.

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

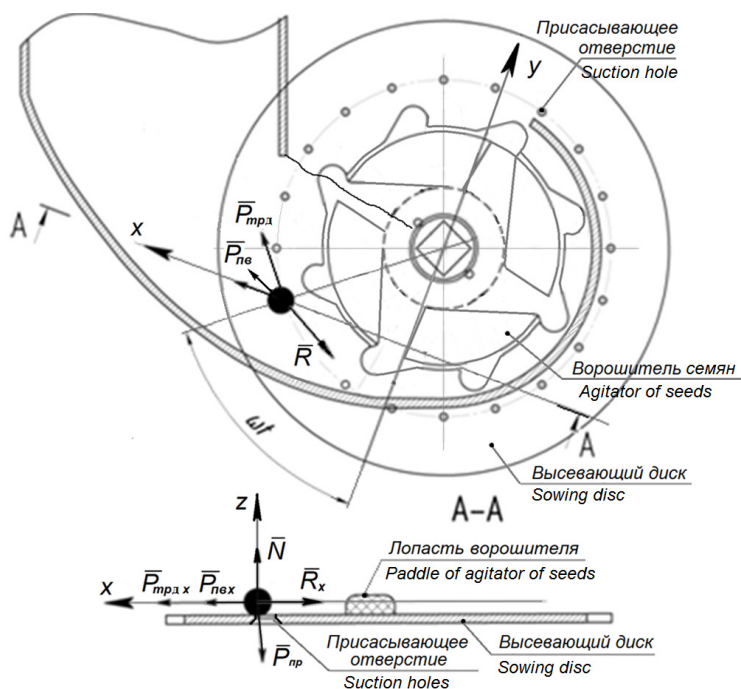
некруглой формы или переменной во времени площади [14; 16]; снижение потерь вакуума просасыванием за счет применения «закрытых» (барабанных) вакуумных камер; расположение дозирующих элементов на подвижных «язычках», позволяющих менять их радиальное расположение при захвате и при сбросе семян в борозду и др. [28].

С учетом ряда допущений условие выноса семени из общего массива в устойчивой теории высевальных аппаратов описывается неравенством (рис. 1)

$$\bar{P}_{\text{трд}} > \bar{R} - \bar{P}_{\text{пв}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{трд}}$ – сила трения высевального диска о семя, N ; R – равнодействующая действующих на семя сил сопротивления, N ; $P_{\text{пв}}$ – сила подпора семени со стороны ворошителя через слой семян, N .

Равнодействующая сил сопротивления R включает силу трения прилегающего слоя семян о выносимое семя, лобовое сопротивление вышележащего слоя семян, центробежную силу, силу тяжести, силу инерции и т. д. [26; 27].



Р и с. 1. Схема сил, действующих на семя при его захвате присасывающими отверстиями: $P_{\text{трд}}$ – сила трения высевального диска о семя, N ; R – равнодействующая сил сопротивления, действующих на семя, N ; $P_{\text{пв}}$ – сила подпора семени через слой семян со стороны ворошителя, N ; $P_{\text{пр}}$ – сила присасывания, N ; N – нормальная реакция, действующая на семя со стороны высевального диска, N ; $P_{\text{трд}_x}$, $P_{\text{пв}_x}$, R_x – проекции соответствующих сил на ось X ; ω – угловая скорость высевального диска, с^{-1}

F i g. 1. Scheme of forces acting on the seed when it is captured by suction holes: $P_{\text{трд}}$ – friction force of the sowing disc on the seed, N ; R – resultant of the resistance forces acting on the seed, N ; $P_{\text{пв}}$ – force of seed support through the layer of seeds from the agitator, N ; $P_{\text{пр}}$ – suction force, N ; N – normal reaction acting on the seed from the sowing disc, N ; $P_{\text{трд}_x}$, $P_{\text{пв}_x}$, R_x – projections of the corresponding forces on the axis X ; ω – sowing disc angular speed, s^{-1}

Сила присасывания $P_{пр}$ складывается из двух составляющих: аэродинамической силы потока воздуха и контактной силы. Однако при ряде упрощений и использовании эмпирических коэффициентов она может рассматриваться только как контактная, ее величина с достаточной точностью определяется из выражения

$$P_{пр} = 0,25k\pi d^2 H, \quad (2)$$

где k – эмпирический коэффициент присасывания воздуха (может варьироваться в достаточно широких пределах – от 0,5 до 1,0), при примерных расчетах примем $k = 0,75$; d – диаметр присасывающего отверстия, м; H – величина разрежения в плоскости рабочей части присасывающего отверстия (условно в вакуумной камере), Па¹¹.

С учетом изложенного условие выноса семени из общего слоя семян может быть представлено в виде

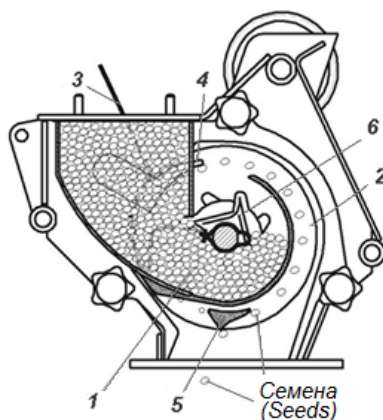
$$d^2 H > \frac{4|\bar{R} - \bar{P}_{пв}|}{fk\pi}, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения семян о поверхность высевающего диска.

Очевидно, что характеристики работы вакуумного высевающего аппарата находятся в зависимости от диаметра присасывающих отверстий (квадратично) и величины разрежения в вакуумной камере. На практике задаются такими значениями этих параметров, чтобы обеспечить гарантированный захват семени присасывающим отверстием. При этом, как правило, удается избежать нулевых подач, однако появляется большое количество групповых подач

(одним присасывающим отверстием захватывается более одного семени), а их присутствие также отрицательно воздействует на требования к дальнейшему росту и развитию растений¹² [26].

Для устранения групповых подач в конструкции вакуумных высевающих аппаратов предусмотрен сбрасыватель «лишних» семян. На подавляющем большинстве современных устройств такого типа установлены плоские, ступенчатые (пилообразные) сбрасыватели (4 на рисунке 2) отдавливающего действия. Под их действием группа семян смещается к оси вращения высевающего диска, и те из них, которые были зафиксированы у присасывающего отверстия наихудшим образом, падают обратно в семенную камеру¹³ [26].



Р и с. 2. Схема вакуумного высевающего аппарата¹⁴: 1 – семенная (заборная) камера; 2 – высевающий диск; 3 – сводоразрушитель; 4 – сбрасыватель «лишних» семян; 5 – сбрасыватель-направитель; 6 – ворошитель семян

Fig. 2. Scheme of a vacuum seeding mechanism: 1 – seeds chamber; 2 – sowing disk; 3 – vault destroyer; 4 – “extra” seed remover; 5 – agitator of seeds; 6 – dropping-guiding device

¹¹ Там же.

¹² Там же.

¹³ Там же.

¹⁴ Millerovoselmash. MS-8 Block-Type Seeder (Basic Model). Operation Manual (for an Operator) [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosagromir.ru/upload/iblock/fb0/MS_8_manual.pdf (дата обращения: 17.09.2022).

Сложность использования сбрасывателей «лишних» семян вытекает из их трудоемкой настройки, которая проводится вручную, и на режимах, не соответствующих реальным режимам работы сеялки. Зачастую на практике она вообще не проводится или проводится формально, что не позволяет реализовать в полной мере функциональный потенциал пропашных сеялок ни по равномерности распределения семян по площади поля, ни по норме высева, ни по производительности.

Материалы и методы

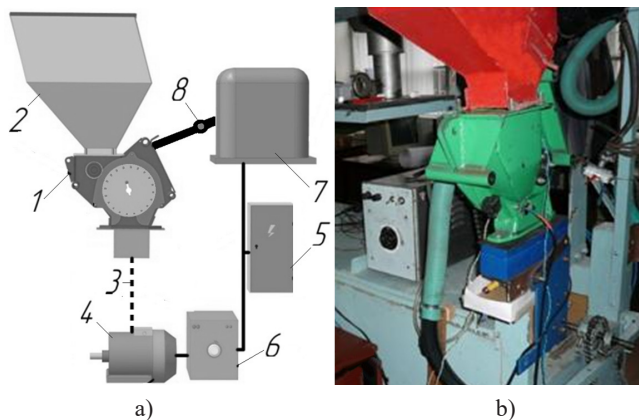
Ранее (3) было установлено, что показатели работы вакуумного высевающего аппарата напрямую зависят от величины произведения d^2H . При этом гипотетически можно предположить, что даже при $d^2H = \text{const}$ параметры средней подачи семян присасывающими отверстиями могут существенно меняться при изменении соотношения значений d и H . Теоретически можно подобрать такое их соотношение, при котором количество пропусков и групповых

подач семян не будет превышать допуск агротребований.

Проверка этого предположения проводилась экспериментальным путем на универсальном стенде в лабораторных условиях при высеве семян двух наиболее популярных пропашных культур: подсолнечника (гибрид Лакомка) и кукурузы (сорт Зерноградский 282 МВ) – с использованием оригинального вакуумного высевающего аппарата сеялки типа МС (ОАО «Миллеровосельмаш», г. Миллерово Ростовской области)¹⁵ [29]. Техническое состояние высевающего аппарата удовлетворительное, срок наработки в лабораторных условиях около 70 ч, в полевых условиях не эксплуатировался.

Экспериментальное исследование было направлено на оценку показателей работы вакуумного высевающего аппарата при постоянном значении силы присасывания, но при разных размерах присасывающих отверстий.

Схема лабораторного стенда для исследования высевающих аппаратов точного высева изображена на рисунке 3.



Р и с. 3. Стенд для исследования высевающего аппарата: а) схема лабораторного стенда; б) внешний вид стенда; 1 – исследуемый высевающий аппарат; 2 – бункер; 3 – цепные передачи; 4 – электродвигатель постоянного тока; 5 – источник питания; 6 – автотрансформатор; 7 – генератор разрежения; 8 – дроссель

F i g. 3. Stand for the study of the seeding mechanism: а) scheme of the laboratory stand; б) appearance of the stand; 1 – the studied seeding mechanism; 2 – bunker; 3 – chain drives; 4 – DC motor; 5 – power supply; 6 – autotransformer; 7 – rarefaction generator; 8 – throttle

¹⁵ Там же.

При проведении экспериментов привод высевяющих аппаратов осуществлялся через набор цепных передач 3 от электродвигателя постоянного тока 4. При этом частота вращения высевяющего диска устанавливалась при помощи автотрансформатора 6 (рис. 3а). Разрежение создавалось стационарным эксгаустером 7, необходимый уровень разрежения в вакуумной камере высевяющего аппарата задавался и поддерживался дроссельной заслонкой 8. Величина разрежения контролировалась вакуумметром непосредственно в зоне вакуумной камеры, что позволяло не учитывать значение возможных потерь разрежения в пневмосистеме.

При высева семян подсолнечника рекомендуется использовать диаметр присасывающих отверстий $3 \cdot 10^{-3}$ м, а при высева кукурузы $5 \cdot 10^{-3}$ м. Соответствующие значения разрежения в вакуумной камере 4 000 и 4 500 Па¹⁶. Таким образом, при $k = 0,75$ значение присасывающей силы при высева подсолнечника $P_{пр.п.} \approx 0,021$ Н, а при высева

кукурузы $P_{пр.к.} \approx 0,066$ Н. Исходя из этого, при проведении экспериментального исследования выбирались следующие значения диаметров присасывающих отверстий и разрежения в вакуумной камере (табл. 1).

Все эксперименты проводились в пятикратных повторностях, в каждом из которых наблюдаемое количество присасывающих отверстий имело значение 300 шт. Частота вращения высевяющего диска 40 об/мин выбиралась, исходя из предполагаемой скорости движения посевного агрегата около 3,2 м/с (около 11,5 км/ч) и норме высева около 4,2 шт./м (при 20 присасывающих отверстиях на диске). Во время реализации опытов сбрасыватель «лишних» семян демонтировался.

Проведение эксперимента при меньших значениях диаметров присасывающих отверстий, а соответственно, и больших значениях разрежения в вакуумной камере не проводились в связи с техническими возможностями используемого лабораторного стенда.

Таблица 1
Table 1

Значения диаметров присасывающих отверстий и разрежения в вакуумной камере при проведении экспериментального исследования
Values of the diameters of the suction holes and the rarefaction in the vacuum chamber during the experimental study

При высева подсолнечника / When seeding sunflower				При высева кукурузы / When seeding corn			
d , мм / d , mm	H , кПа / H , kPa	k	$P_{пр.п.}$ Н / $P_{пр.п.}$ N	d , мм / d , mm	H , кПа / H , kPa	k	$P_{пр.к.}$ Н / $P_{пр.к.}$ N
1,5	16,0			3,0	12,5		
2,0	9,0			3,5	9,2		
2,5	5,8			4,0	7,0		
3,0	4,0	0,75	0,021	4,5	5,5	0,75	0,066
3,5	2,9			5,0	4,5		
4,0	2,3			5,5	3,7		
–	–	–	–	6,0	3,1		

¹⁶ Там же.

Исследование в области больших значений диаметров присасывающих отверстий не проводилось, так как при этом наблюдается западание и заклинивание семян в присасывающих отверстиях.

Основные размерные характеристики используемых в эксперименте семян подсолнечника и кукурузы представлены в таблице 2.

В таблице 2 приняты следующие условные обозначения: M_{\min} – минимальный размер семян, мм; M – средний размер семян, мм; M_{\max} – максимальный размер семян, мм; σ – среднее квадратическое отклонение размеров семян, мм; V – коэффициент вариации распределения размеров семян, %; m – ошибка среднего размера семян, мм; P – показатель точности наблюдений, %.

Поисковые эксперименты показали, что при заданных силах присасывания высевающий аппарат обеспечивает подачу семян практически без пропусков. Таким образом, качество его работы можно было оценивать только по одному критерию. Исходя из содержания гипотезы исследования, в качестве параметра оптимизации принималось количество групповых подач.

При проведении эксперимента движущиеся присасывающие отверстия фиксировались на видеокамеру, после

чего количество групповых подач семян подсолнечника и кукурузы подсчитывалось визуально при замедленном воспроизведении записи.

Результаты исследования

По результатам экспериментального исследования и показателям их статистической оценки сформирована таблица 3, в которой приняты следующие обозначения: $n_{\text{гср}}$ – среднее по повторам количество групповых подач семян присасывающими отверстиями, шт.; $\sigma_{\text{гг}}$ – среднее квадратическое отклонение количества групповых подач семян присасывающими отверстиями; $m_{\text{гг}}$ (шт.) и $m_{\text{огг}}$ (%) – соответственно абсолютная и относительная ошибки опыта.

Из данных таблицы 2 видно, что экспериментальное исследование было проведено с достаточно высокой точностью – практически на всех этапах относительная ошибка опыта не превысила 5 %. При этом для анализа наибольший интерес представляет показатель частоты групповых подач p_r , который определяется как отношения количества наблюдаемых в опыте групповых подач к общему количеству подач. В графическом виде зависимости частоты групповых подач семян подсолнечника и кукурузы от диаметра присасывающих отверстий представлены на рисунке 4.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Основные размерные характеристики семян, используемых в эксперименте

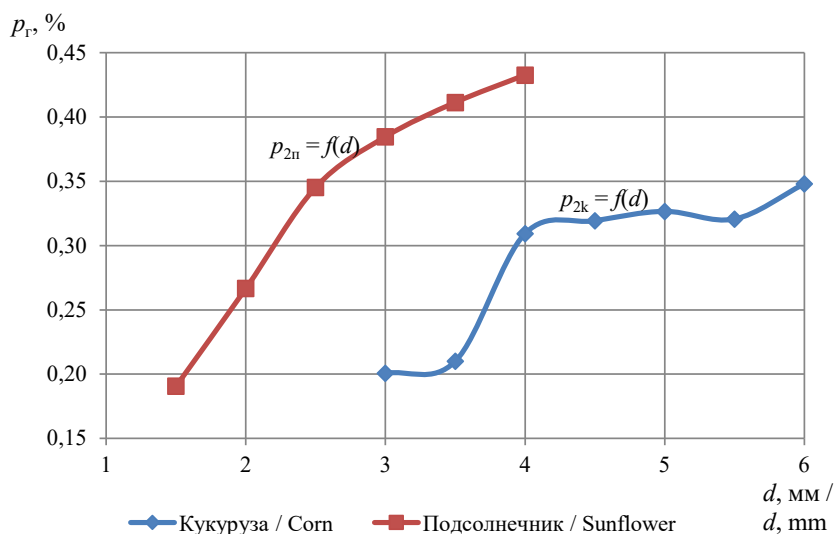
Main dimensional characteristics of the seeds used in the experiment

Гибрид / Сорт / Hybrid / Variety	Пионер (Подсолнечник) / Pioneer (Sunflower)			Зерноградский 282 МВ (Кукуруза) / Zernogradskiy 282 MV (Corn)		
	Длина / Length	Ширина / Width	Толщина / Thickness	Длина / Length	Ширина / Width	Толщина / Thickness
M_{\min} , мм / M_{\min} , mm	6,90	3,70	2,00	9,10	6,81	3,50
M , мм / M , mm	10,00	5,60	3,30	11,62	8,82	5,56
M_{\max} , мм / M_{\max} , mm	11,70	7,00	5,10	14,13	11,06	7,54
σ , мм / σ , mm	0,73	0,54	0,50	0,73	0,76	0,67
V , %	7,30	9,60	15,20	6,28	8,62	12,04
m , мм / m , mm	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
P , %	0,46	0,61	0,94	0,28	0,38	0,54

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Показатели подачи семян присасывающими отверстиями вакуумного высевающего аппарата
Indicators of seed feeding by suction holes of a vacuum seeding mechanism

Культура / Culture	d , мм / d , mm	H , кПа / H , kPa	$n_{ггп}$, шт. / $n_{ггп}$, pcs	$\sigma_{ггп}$, шт. / $\sigma_{ггп}$, pcs	$m_{ггп}$, шт. / $m_{ггп}$, pcs	$m_{огп}$, % / $m_{огп}$, %
Подсолнечник / Sunflower	1,5	16,0	57,2	5,3	2,4	4,2
	2,0	9,0	80,0	3,4	1,5	1,9
	2,5	5,8	103,6	9,6	4,3	4,2
	3,0	4,0	115,4	9,3	4,2	3,7
	3,5	2,9	123,4	17,0	7,7	6,2
	4,0	2,3	129,8	7,3	3,3	2,6
	3,5	9,2	63,0	2,1	1,0	1,5
Кукуруза / Corn	4,0	7,0	92,8	9,7	4,4	4,8
	4,5	5,5	95,8	7,1	3,2	3,4
	5,0	4,5	98,0	4,4	2,0	2,0
	5,5	3,7	96,2	5,8	2,6	2,7
	6,0	3,1	104,4	10,1	4,6	4,4



Р и с. 4. Зависимости частот групповых подач семян подсолнечника и кукурузы от диаметра присасывающих отверстий

F i g. 4. Dependences of the frequencies of group feeding of sunflower and corn seeds on the diameter of the suction holes

В работе были предприняты попытки аппроксимации полученных зависимостей с использованием линейного,

логарифмического, полиномиальных (второй и третьей степени) и степенного законов, результаты представлены в таблице 4.

Результаты аппроксимации зависимостей частот групповых подач семян подсолнечника и кукурузы от диаметра присасывающих отверстий**Results of approximation of the dependences of the frequencies of group feeding of sunflower and corn seeds on the diameter of the suction holes**

Культура / Culture	Закон аппроксимации / Law of Approximation	Уравнение аппроксимации / Approximation Equation	Достоверность аппроксимации / Approximation Confidence
Подсолнечник / Sunflower	Линейный / Linear	$p_{гн} = 0,096d + 0,074$	0,93
	Логарифмический / Logarithmic	$p_{гн} = 0,253\ln(d) + 0,096$	0,98
	Полиномиальный (2 ст.) / Polynomial (2 degree)	$p_{гн} = -0,034d^2 + 0,285d - 0,161$	1,00
	Полиномиальный (3 ст.) / Polynomial (3 degree)	$p_{гн} = 0,003d^3 - 0,059d^2 + 0,349d - 0,212$	1,00
	Степенной / Power	$p_{гн} = 0,1458 d^{0,8396}$	0,95
Кукуруза / Corn	Линейный / Linear	$p_{гк} = 0,049d + 0,072$	0,78
	Логарифмический / Logarithmic	$p_{гк} = 0,218 \ln(d) - 0,032$	0,83
	Полиномиальный (2 ст.) / Polynomial (2 degree)	$p_{гк} = -0,021d^2 + 0,238d - 0,333$	0,89
	Полиномиальный (3 ст.) / Polynomial (3 degree)	$p_{гк} = 0,004d^3 - 0,079d^2 + 0,492d - 0,691$	0,89
	Степенной / Power	$p_{гк} = 0,0845d^{0,822}$	0,81

Обсуждение и заключение

Из данных, указанных в таблице 4, можно увидеть, что наибольшая фактичность описания зависимостей была как для подсолнечника, так и для кукурузы получена при применении полиномиальных законов. Причем в обоих случаях применение квадратного полинома обеспечивает практически такую же достоверность, как и кубического, поэтому логично использовать полиномы меньшей степени. Решение соответствующих уравнений позволяет предположить, что частота групповых подач семян менее 5 % может быть обеспечена при диаметре присасывающих отверстий около 0,8 мм при высевах семян подсолнечника и около 1,9 мм при высевах кукурузы. При этом значения разрежений в вакуумной

камере должны составлять 31–56 кПа, что практически на порядок превосходит традиционные показатели работы пневмосистем вакуумных пропашных сеялок. Из чего можно заключить, что при совершенствовании конструкции высевальных аппаратов вакуумных пропашных сеялок, за счет уменьшения диаметра присасывающих отверстий, необходимо параллельно внедрять модернизации, направленные на повышение их захватывающей способности.

В целом исследование, проведенное с использованием вакуумного высевального аппарата сеялки МС-8, позволяет заключить, что при заданных параметрах и режимах работы высевального аппарата зависимость образования групповых подач семян подсолнечника от диаметра

присасывающих отверстий (при расчетном значении силы присасывания около 0,021 Н) может быть с достаточно высокой точностью описана полиномом второй степени $p_{\text{тп}} = -0,034d^2 + 0,285d - 0,161$, а при высеве кукурузы – полиномом $p_{\text{тк}} = -0,021d^2 + 0,238d - 0,333$ (при расчетном значении силы присасывания около 0,066 Н). Решение полученных уравнений позволяет предположить, что частота групповых подач семян менее 5 % будет обеспечиваться при диаметре присасывающих отверстий до 0,8 мм для подсолнечника и до 1,9 мм для кукурузы.

Но нужно учитывать, что для достижения рациональных величин силы присасывания значения разрежений в вакуумной камере должны будут составлять 31–56 кПа, что существенно превосходит предельные показатели работы пневмосистем существующих вакуумных сеялок. Таким образом, модернизация высевающих аппаратов вакуумных пропашных сеялок, ориентированная на уменьшение диаметров присасывающих отверстий, должна одновременно быть направлена на повышение их захватывающей способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orjuela S., Pabon J., Fonseca M. Experimental Assessment of Emissions in Low Displacement Diesel Engines Operating with Biodiesel Blends of Palm and Sunflower Oil // *International Journal on Engineering Applications*. 2021. Vol. 9, Issue 3. P. 128–136. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19810>
2. Mathematical Modeling of Anaerobic Digestion of Maize Waste: a Case Study / M. A. Bellahkim [et al.] // *International Journal on Engineering Applications*. 2021. Vol. 9, Issue 3. P. 173–179. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19167>
3. Sunflower Crop and Climate Change: Vulnerability, Adaptation, and Mitigation Potential from Case-Studies in Europe / P. Debaeke [et al.] // *OCL Oilseeds Fats Crops Lipids*. 2017. Vol. 24, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
4. Potential of Corn Silage Production in Different Sowing Times in the Paraná Midwest Region / M. Neumann [et al.] // *Applied Research & Agrotechnology*. 2016. Vol. 9, Issue 1. P. 37–44. doi: <https://doi.org/10.5935/PAET.V9.N1.04>
5. Markova N. V. Influence of Sowing Terms and Technological Features of Cultivation on the Formation of Yield and Seed Quality of Hybrids of Sunflower // *Herald of Agrarian Science of Black Sea Region*. 2010. Issue 2. P. 212–218.
6. Optimization of Sowing Time for Grain Sorghum and Millet / A. V. Baranovsky [et al.] // *Bioscience Research*. 2020. Vol. 17, Issue 2. P. 1121–1128.
7. Effects of Cropping Architect and Sowing Date on Forage Quantity and Quality of Corn (*Zea Maize L.*) as a Second Crop in Western Iran / A. Shirkhani [et al.] // *Annals of Biological Research*. 2012. Vol. 3, Issue 9. P. 4307–4312. URL: <https://clck.ru/33T3wm> (дата обращения: 17.09.2022).
8. Corn (*Zea mais L.*) Sowing Quality in the Province of Corrientes, Argentina / O. R. Pozzolo [et al.] // *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. 2020. Vol. 52, Issue 2. P. 111–123. URL: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/RFCFA/article/view/4042> (дата обращения: 17.09.2022).
9. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Распределение семян подсолнечника в рядок в зависимости от скоростных режимов работы пневматического высевающего аппарата // *Техника и оборудование для села*. 2021. № 8. С. 14–17. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-8-14-17>
10. Операция посева – ключевой элемент создания технологий растениеводства шестого технологического уклада / П. В. Лаврухин // *Вестник аграрной науки Дона*. 2021. № 4 (56). С. 24–32. URL: <https://clck.ru/33T49W> (дата обращения: 17.09.2022).
11. Геометрия посева пропашных культур / А. А. Завражнов [и др.] // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 1. С. 59–66. doi: <https://doi.org/10.31857/S2500262722010100>

12. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Обеспечение режимов работы высевашего аппарата специализированным оборудованием // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 6–12. doi: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-6-12>
13. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Новые метод и средство контроля качества работы пневматических высеваших аппаратов точного высева семян // Техника и оборудование для села. 2020. № 1. С. 24–27. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-1-24-27>
14. Должикова Н. Н., Должиков В. В. Качественный посев семян подсолнечника // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 2. С. 86–88. doi: <https://doi.org/10.18411/lj-07-2020-42>
15. Модернизация системы контроля высева семян на пропашных сеялках / А. И. Завражнов [и др.] // Сельский механизатор. 2021. № 7. С. 8–9.
16. Дубина К. П. Оптимизация подачи семян кукурузы дозирующими элементами переменного сечения // Аграрный научный журнал. 2019. № 2. С. 86–91. doi: <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i2pp86-91>
17. Крючин Н. П., Котов Д. Н., Артамонова О. А. Теоретическое исследование процесса перемещения замоченных семян рабочими органами торсионно-штифтового высевашего аппарата // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 2. С. 148–152.
18. Kryuchin N. P., Gorbachev A. P. Improvement of the Technological Process of Sowing Sunflower Seeds with a Pneumatic Seed Planter // IOP Conference Series. 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012136>
19. Основные направления совершенствования сеялок точного высева пропашных культур / А. А. Завражнов [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2022. № 1. С. 7–21. doi: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-1-7-21>
20. Анализ конструкций пропашных сеялок / В. И. Хижняк [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2020. № 4. С. 42–52. URL: <http://vd.achgaa.ru/archive.html>
21. Evaluation of the Efficiency of Row-Crop Seeders using Vacuum and Extrabaric Seed Metering Methods / V. I. Khizhnyak [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 659. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012045>
22. Разработка дозирующего модуля сеялки пунктирного высева СПВ-870 / В. И. Хижняк [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2020. № 2. С. 27–33. URL: http://xn--80aaak3h.xn--p1ai/files/vestnikVD2_2020_50.pdf (дата обращения: 17.09.2022).
23. Markvo I., Zubrilina E., Novikov V. Precise Seeding Planter Concept with Air Pumped Seed-tube // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 126. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600054>
24. Теоретическое исследование процесса дозирования семян с использованием нагнетающего воздушного потока / Хижняк В. И. [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 4. С. 46–54. URL: <http://vd.achgaa.ru/archive.html> (дата обращения: 17.09.2022).
25. Substantiation of Seed Disc Construction for Sowing Seeds / I. N. Krasnov [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. Vol. 9, Issue 3. P. 985–996. URL: <http://ачии.рф/files/707f4495-1936-4748-b87d-2d7eafb2b794.pdf> (дата обращения: 17.09.2022).
26. Vacuum Planter's Seed Supply Quality as Affected by the Diameter of Suction Holes / A. Nesmiyan [et al.] // International Review of Automatic Control. 2022. Vol. 15, Issue 2. P. 52–57. doi: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21493>
27. Probabilistic Modeling for Dynamic Processes / A. Nesmiyan // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505019>
28. Пневматический высеваший аппарат : патент 207950 Российская Федерация / Завражнов А. А. [и др.]. № 2021124211 ; заявл. 16.08.2021 ; опубл. 25.11.2021. 4 с.
29. Стенд для испытания высеваших аппаратов сеялок точного высева : патент 2356210 Российская Федерация / Лобачевский П. Я. [и др.]. № 2007143012/12 ; заявл. 20.11.2007 ; опубл. 27.05.2009. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2356210C1_20090527 (дата обращения: 17.09.2022).

Поступила 04.10.2022; одобрена после рецензирования 20.11.2022; принята к публикации 17.01.2023

Об авторах:

Несмиян Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологий и средств механизации агропромышленного комплекса Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>, Researcher ID: N-6221-2018, nesmiyan.andrei@yandex.ru

Дубина Константин Павлович, кандидат технических наук, ассистент кафедры технической механики и физики Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>, Researcher ID: GSD-2794-2022, longonor@yandex.ru

Жигайлова Анастасия Павловна, аспирант Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0904-0933>, Researcher ID: GWQ-5701-2022, nastena30.1997@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. Ю. Несмиян – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка задачи исследования, подготовка первоначального варианта текста, формирование частных и общих выводов.

К. П. Дубина – анализ литературных источников, проведение экспериментальных исследований, критический анализ полученных результатов, формирование частных и общих выводов.

А. П. Жигайлова – литературный и патентный анализ данных, проведение экспериментальных исследований, доработка текста, формирование частных и общих выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Orjuela S., Pabon J., Fonseca M. Experimental Assessment of Emissions in Low Displacement Diesel Engines Operating with Biodiesel Blends of Palm and Sunflower Oil. *International Journal on Engineering Applications*. 2021;9(3):128–136. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19810>
2. Bellahkim M.A., Gueraoui K., Mzard A., et al. Mathematical Modeling of Anaerobic Digestion of Maize Waste: a Case Study. *International Journal on Engineering Applications*. 2021;9(3):173–179. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19167>
3. Debaeke P., Casadebaig P., Flenet F., Langlade N. Sunflower Crop and Climate Change: Vulnerability, Adaptation, and Mitigation Potential from Case-Studies in Europe. *OCL Oilseeds Fats Crops Lipids*. 2017;24(1). doi: <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
4. Neumann M., Horts E.H., Figueira D.N., et al. Potential of Corn Silage Production in Different Sowing Times in the Paraná Midwest Region. *Applied Research & Agrotechnology*. 2016;9(1):37–44. doi: <https://doi.org/10.5935/PAET.V9.N1.04>
5. Markova N.V. Influence of Sowing Terms and Technological Features of Cultivation on the Formation of Yield and Seed Quality of Hybrids of Sunflower. *Herald of Agrarian Science of Black Sea Region*. 2010;(2):212–218.
6. Baranovsky A.V., Sadovoy A.S., Kapustin S.I., Kapustin A.S. Optimization of Sowing Time for Grain Sorghum and Millet. *Bioscience Research*. 2020;17(2):1121–1128.
7. Shirkhani A., Ahmadi G.H., Mohammadi G., Ghitouli M. Effects of Cropping Architect and Sowing Date on Forage Quantity and Quality of Corn (*Zea Maize L.*) as a Second Crop in Western Iran. *Annals of Biological Research*. 2012;3(9):4307–4312. Available at: <https://clck.ru/33T3wm> (accessed 17.09.2022).
8. Pozzolo O.R., Hidalgo R.J., Domínguez J.F., Giménez L. Corn (*Zea mais L.*) Sowing Quality in the Province of Corrientes, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*. 2020;52(2):111–123. Available at: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/RFCA/article/view/4042> (accessed 17.09.2022).

9. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. Distribution of Sunflower Seeds in a Row Depending on the Speed Modes of Operation of the Pneumatic Dropping Device. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;(8):14–17. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-8-14-17>
10. Lavruhin P.V., Kazakova A.S., Medvedko S.N., Ivanov P.A. Seeding Operation – A Key Element of Creation of Crop Technologies of the Sixth Technological Paradigm. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2021;(4):24–32. Available at: <https://clck.ru/33T49W> (accessed 17.09.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Zemlyanov A.A. Geometry of Sowing around Crops. *Rossiiskaia Selskokhoziaistvennaia Nauka*. 2022;(1):59–66. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S2500262722010100>
12. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. Ensuring the Operating Modes of the Seeding Apparatus Specialized Equipment. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2021;(4):6–12. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-6-12>
13. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. New Method and Means of Monitoring the Quality of Pneumatic Drilling Mechanism for Precision Seed Sowing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(1):24–27. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-1-24-27>
14. Dolzhikova N.N., Dolzhikov V.V. [Quality Sowing of Sunflower Seeds]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020;(2):86–88. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.18411/lj-07-2020-42>
15. Zavrazhnov A., Balashov A., Strygin S., et al. [Modernization of the Seeding Control System on Row Crop Seeders]. *Selskii Mehanizator*. 2021;(7):8–9. (In Russ.)
16. Dubina K.P. Optimization of Supply of Corn Seeds by Accurate Accelerating Variable Section. *Agrarian Scientific Journal*. 2019;(2):86–91. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.28983/asj.2019i2pp86-91>
17. Kryuchin N.P., Kotov D.N., Artamonova O.A. [Theoretical Study of the Movement of Soaked Seeds by the Working Bodies of the Torsion-Pin Sowing Machine]. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(2):148–152. (In Russ.)
18. Kryuchin N.P., Gorbachev A.P. Improvement of the Technological Process of Sowing Sunflower Seeds with a Pneumatic Seed Planter. *IOP Conference Series*. 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012136>
19. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Shepelev V.Yu., Yakushev A.V. The Main Directions of Improvement of Precision Seeders of Row Crops. *Bulletin NGIEI*. 2022;(1): 7–21. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-1-7-21>
20. Khizhnyak V.I., Maltsev P.S., Taranov V.A., et al. Analysis of the Construction of Massed Seed Drills. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*. 2020;(4):42–52. Available at: <http://vd.achgaa.ru/archive.html> (accessed 17.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Khizhnyak V.I., Shchirov V.V., Nesmiyan A.Yu., et al. Evaluation of the Efficiency of Row-Crop Seeders using Vacuum and Extrabaric Seed Metering Methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;659. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012045>
22. Khizhnyak V.I., Kochergin A.S., Taranov V.A., Onishchenko E.A. Development of Dosing Module of Space Seeding Machine SSM-870. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*. 2020;(2):27–33. Available at: http://xn--80aaak3h.xn--p1ai/files/vestnik/VD2_2020_50.pdf (accessed 17.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Markvo I., Zubrilina E., Novikov V. Precise Seeding Planter Concept with Air Pumped Seedtube. *E3S Web of Conferences*. 2019;126. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600054>
24. Khizhnyak V.I., Maltsev P.S., Nesmiyan A.Yu., et al. Theoretical Research of the Process of Dosing Seeds Using an Injection Air Flow. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*. 2021;(4):46–54. Available at: <http://vd.achgaa.ru/archive.html> (accessed 17.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Kapov S.N., et al. Substantiation of Seed Disc Construction for Sowing Seeds. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018;9(3):985–996. Available at: <http://ачии.рф/files/707f4495-1936-4748-b87d-2d7eafb2b794.pdf> (accessed 17.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

26. Nesmiyan A., Khasanov E., Dubina K., Iakupov A. Vacuum Planter's Seed Supply Quality as Affected by the Diameter of Suction Holes. *International Review of Automatic Control*. 2022;15(2):52–57. doi: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21493>
27. Nesmiyan A. Probabilistic Modeling for Dynamic Processes. *E3S Web of Conferences*. 2020;175. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505019>
28. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Brosalin V.G., et al. [Pneumatic Sowing Machine]. Patent 207,950 Russian Federation. 2021 November 25. 4 p. (In Russ.)
29. Lobachevskii P.Ya., Hizhnyak V.I., Nesmiyan A.Yu., Avramenko F.V. [Test Stand For Sowing Units of Precision Air Seeders]. Patent 2,356,210 Russian Federation. 2009 May 27. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2356210C1_20090527 (accessed 17.09.2021). (In Russ.)

Submitted 04.10.2022; revised 20.11.2022; accepted 17.01.2023

About the authors:

Andrey Yu. Nesmiyan, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technology and Means of Mechanization of Agroindustrial Complex, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., 347740 Zernograd, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>, Researcher ID: N-6221-2018, nesmiyan.andrei@yandex.ru

Konstantin P. Dubina, Cand.Sci. (Engr.), Assistant of the Chair of Technical Mechanics and Physics, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., 347740 Zernograd, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>, Researcher ID: GSD-2794-2022, longonor@yandex.ru

Anastasiya P. Zhigailova, Postgraduate Student, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., 347740 Zernograd, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0904-0933>, Researcher ID: GWQ-5701-2022, nastena30.1997@mail.ru

Authors contribution:

A. Yu. Nesmiyan – scientific guidance, formulation of the basic concept of research, setting the research objectives, preparation of the initial version of the text, the formation of private and general conclusions.

K. P. Dubina – analysis of literary sources, conducting experimental research, critical analysis of the results, the formation of private and general conclusions.

A. P. Zhigailova – literary and patent data analysis, conducting experimental research, finalizing the text, forming private and general conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.