

Научная статья

УДК 631.331.1+629.735:630.651.72

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-2-124-138

DEM-моделирование центробежной системы высева семян древесных пород с беспилотного летательного аппарата

М.Н. Лысыч[✉], канд. техн. наук; ResearcherID: [N-3089-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>

Л.Д. Бухтояров, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAO-5129-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>

М.А. Гнусов, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAT-9060-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Е.В. Мартыновский, инж.; ResearcherID: [OHV-1617-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0434-575X>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; miklynea@yandex.ru[✉], vglta-mlx@yandex.ru, ko407@yandex.ru, proffootballjack@gmail.com

Поступила в редакцию 31.10.25 / Одобрена после рецензирования 22.12.25 / Принята к печати 23.12.25

Аннотация. Аэросев лесов с использованием беспилотных летательных аппаратов – это эффективный, быстрый и недорогой метод лесовосстановления, особенно актуальный в условиях современных экологических вызовов. Однако отечественные высевающие аппараты, адаптированные для аэросева лесных семян с применением беспилотных летательных аппаратов, на сегодняшний день отсутствуют. Цель данного исследования заключается в разработке высевающего аппарата разбросного типа для беспилотных летательных аппаратов. Проведен анализ систем дозирования и распределения семян и методов имитационного моделирования для высевающих аппаратов, устанавливаемых на беспилотные летательные аппараты. С помощью системы автоматизированного проектирования создана 3-мерная твердотельная модель высевающего аппарата и определены его геометрические и массовые параметры. Имитационное моделирование рабочих процессов высевающего аппарата осуществлялось с применением метода дискретных элементов (DEM). Было исследовано влияние различных режимов работы высевающего аппарата на производительность механизма дозирования, требуемое полетное время для расхода полезной нагрузки, ширину засеваемой полосы, число семян на 1 м² и площадь посадки за 1 миссию. На основе выполненных имитационных исследований создан опытный образец высевающего аппарата и испытательный стенд для проведения экспериментов по аэросеву. В ходе полевых экспериментов была измерена ширина засеваемой полосы и число семян, высеваемое на 1 м² при различных режимах работы высевающего аппарата. Полученные данные подтвердили адекватность разработанной имитационной модели и возможность ее применения для проектирования и исследования широкого спектра лесных и сельскохозяйственных высевающих аппаратов, а также разбрасывателей гранулированных веществ.

Ключевые слова: высевающий аппарат, аэросев, БПЛА, беспилотный летательный аппарат, имитационное моделирование, САПР

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Для цитирования: Лысыч М.Н., Бухтояров Л.Д., Гнусов М.А., Мартыновский Е.В. DEM-моделирование центробежной системы высева семян древесных пород с беспилотного летательного аппарата // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 2. С. 124–138. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-2-124-138>

Original article

DEM-Modeling of a Centrifugal Sowing System for Wood Species Seeds from an Unmanned Aerial Vehicle

Mikhail N. Lysych[✉], *Candidate of Engineering*; ResearcherID: [N-3089-2016](https://orcid.org/0000-0002-3764-3873),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>

Leonid D. Bukhtoyarov, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*;

ResearcherID: [AAO-5129-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-0821), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>

Maksim A. Gнусов, *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.*;

ResearcherID: [AAT-9060-2020](https://orcid.org/0000-0003-1653-4595), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Evgenii V. Martynovsky, *Engineer*; ResearcherID: [OHV-1617-2025](https://orcid.org/0009-0000-0434-575X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0434-575X>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394036; miklynea@yandex.ru[✉], vglta-mlx@yandex.ru, ko407@yandex.ru, profotballjack@gmail.com

Received on October 31, 2025 / Approved after reviewing on December 22, 2025 / Accepted on December 23, 2025

Abstract. Reforestation in remote, rugged, and hard-to-reach terrains remains a significant challenge for modern forestry, necessitating the transition to automated and efficient technological solutions. This study focuses on the development and numerical investigation of a centrifugal seed broadcasting system integrated with an unmanned aerial vehicle for precision aerial seeding. The research was conducted using the Discrete Element Method implemented in the Altair EDEM software environment. The simulation model incorporates the precise physical and mechanical properties of forest tree seeds, such as density, coefficients of friction, and restitution, as well as the intricate design features of the centrifugal device. A key aspect of the study involved modeling the interaction between the seeds and the distributing disk while considering the aerodynamic influence of the unmanned aerial vehicle propulsion system on the resulting seed trajectories. Through a comprehensive series of numerical experiments, the study analyzed the influence of various operational parameters – specifically the rotational speed of the distributing disk and the angular configuration of the blades – on the uniformity of seed distribution. The research determined the rational design and operational settings that minimize the coefficient of variation in the spreading pattern. It was established that the propulsion system’s downwash significantly affects the distribution width, requiring precise synchronization between flight altitude and disk rotation. The findings provide a robust theoretical and practical framework for optimizing aerial sowing equipment, thereby enhancing the efficiency and reliability of forest restoration technologies in challenging environments.

Keywords: seeding device, aerial sowing, unmanned aerial vehicle, simulation modeling, computer-aided design, CAD

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant No. 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

For citation: Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Gnusov M.A., Martynovsky E.V. DEM-Modeling of a Centrifugal Sowing System for Wood Species Seeds from an Unmanned Aerial Vehicle. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 2, pp. 124–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-2-124-138>

Введение

В последнее время все больше ученых и практиков обращают внимание на методы восстановления лесных массивов с использованием аэросева. Этот всплеск интереса вызван ускоряющимся темпом обезлесения, серьезными климатическими изменениями и стремительным развитием технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Аэросев – экологичная альтернатива традиционным методам. Он минимизирует потребность в энергоемких операциях, выполняемых тракторной техникой. Поэтому везде, где позволяют почвенно-климатические условия и состояние напочвенного покрова, аэросев будет эффективным решением, особенно на труднопроходимых, опасных и удаленных территориях [8, 13, 15, 17].

Согласно лесоводческим рекомендациям, в России аэросев может применяться на участках, пострадавших от пожаров, с супесчаными и хорошо дренированными суглинистыми почвами, где огонь полностью уничтожил лесную подстилку. Также он подходит для транспортно-удаленных лесных участков и склонов, куда затруднен доступ тракторной техники (приказ Минприроды РФ от 04.12.2020 № 1014).

БПЛА открывают новые возможности для применения аэросева. Эта технология отличается высокой производительностью при относительно низких затратах труда и материалов [2, 3, 15], однако требует разработки специализированных высевальных аппаратов, адаптированных для использования с БПЛА и имеющих минимальную массу.

Целью данного исследования является разработка конструкции высевального аппарата разбросного типа для БПЛА и изучение его рабочих режимов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является высевальный аппарат разбросного типа для аэросева лесных семян, агрегируемый с БПЛА.

Высевальные аппараты, как правило, состоят из 2 основных систем – дозирования и распределения семян. Системы распределения семян включают устройства, которые перемещают семена от дозатора к поверхности земли.

Разрабатываемая конструкция оснащена дозирующим механизмом катушечного типа, широко применяющимся в сельском и лесном хозяйстве из-за простоты и высокой надежности. Он используется в машинах для внесения удобрений и сеялках и может иметь различные по форме катушки [1, 16]. Например, катушечный тип механизма дозирования применен в устанавливаемой на БПЛА системе для разбрасывания гранул JetSeed компании XAG [5].

Центробежный разбрасыватель гранул UGS-2G компании CFR-Innovations предназначен для использования с БПЛА. Его общий вес составляет 1148 г при вместимости 8 л. Регулируемая ширина разброса составляет от 2 до 23 м, скорость расхода – от 1 до 12 л/мин [7].

Система центробежного разброса T Series Spreading System 2.0 разработана компанией DJI и совместима с беспилотными платформами DJI Agras T16 или T20 [6]. Размер высеваемых материалов составляет от 0,5 до 5,0 мм, вместимость резервуара – 20 л. Диапазон разброса – от 5 до 7 м.

При моделировании рабочих процессов центробежных высевочных аппаратов и разбрасывателей удобрений широко используется DEM-метод для моделирования работы как систем дозирования [10, 14], так и центробежного распределения [9, 11, 12, 18–21].

Рассмотрим более подробно специализированный центробежный разбрасыватель семян риса для БПЛА как наиболее конструктивно и функционально близкий к предложенному нами [20] (рис. 1).

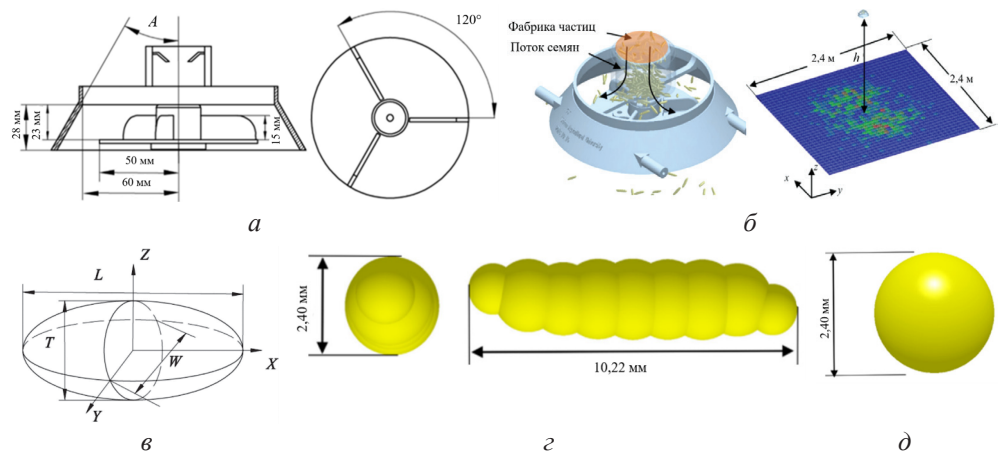


Рис. 1. Центробежный разбрасыватель семян риса для БПЛА [20]:

a – геометрические параметры механизма; *б* – виртуальный стенд;

в – геометрическая модель семени риса; *г* – сферическая дискретная модель семени;

д – мультисферическая дискретная модель семени

Fig. 1. Centrifugal rice seed spreader for UAVs [20]:

a – geometric parameters of the mechanism; *b* – virtual stand; *в* – geometric model of a rice

seed; *г* – spherical discrete model; *д* – multispherical discrete model

Центробежный высевочный аппарат для риса состоит из семенного ящика, устройства подачи семян и центробежного дискового разбрасывателя, имеющего 3 лопасти и отражающее кольцо (рис. 1, *a*). При моделировании используется симметричная геометрическая модель семени риса (рис. 1, *в*), которая для DEM-моделирования замещается мультисферической дискретной моделью из 9 сфер (рис. 1, *г*). Для исследования процессов отскока от отражающего кольца дискретная модель семени упрощена до сферы (рис. 1, *д*). В виртуальном эксперименте применяется квадратный участок размером 2,4 м с разбиением на отдельные секции 80×80 мм. Источник частиц, генерирующий дискретные семена располагался по центру дискового разбрасывателя.

Л. Yang [20] установлено, что на равномерность распределения семян влияют 3 основных фактора, это скорость вращения высевочного диска, высота полета БПЛА, угол установки отражательного кольца *A*. Наибольшее воздействие оказывает высота полета БПЛА, затем скорость вращения диска и угол отражательного кольца. Оптимальные параметры для максимально равномерного распределения по результатам моделирования: вращение диска –

600 об./мин; высота полета – 2,1 м; угол отражательного кольца – 26°. Коэффициент вариации составил 21,39 %. Полевые испытания дали коэффициент вариации 22,21...32,90 %, что, скорее всего, связано с влиянием воздушных потоков от пропеллеров БПЛА.

В нашей работе использованы методы параметрического 3D-моделирования, имитационного моделирования и быстрого прототипирования с помощью 3D-печати, которые позволяют в кратчайшие сроки создавать функциональные образцы из инженерных полимерных материалов [4].

Для осуществления аэросева лесных семян сосны и схожих с ними по геометрическим параметрам спроектирована параметрическая 3D-модель высевающего аппарата, который состоит из бункера 1, механизма дозирования 2 и механизма центробежного разброса 3 (рис. 2).

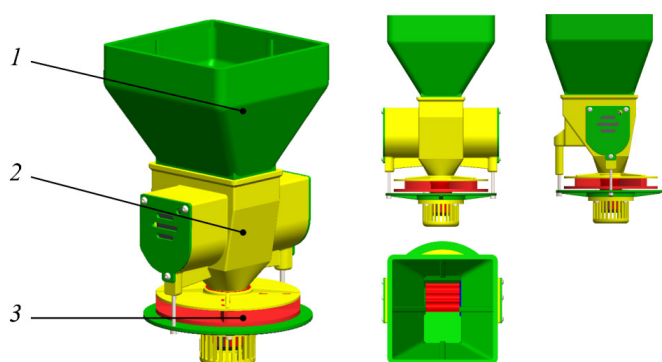


Рис. 2. Общий вид центробежного высевающего аппарата
Fig. 2. General view of the centrifugal sowing unit

Механизм дозирования, в свою очередь, состоит из корпуса 1, быстросъемной дозирующей катушки 2, направляющей 3, закладной оси катушки 4, правой ограничительной стенки катушки 5, двигателя механизма дозирования 6, левой ограничительной стенки катушки 7 с подшипником катушки 8, крышки подшипника 9 и защитных панелей 10.

Механизм центробежного разброса включает в себя разбрасывающий диск с 4 лопатками 11, опорный диск 12, двигатель механизма разброса 13, подшипник опорного диска 14, шпильки опорного диска 15 и защитный корпус 16 (рис. 3).

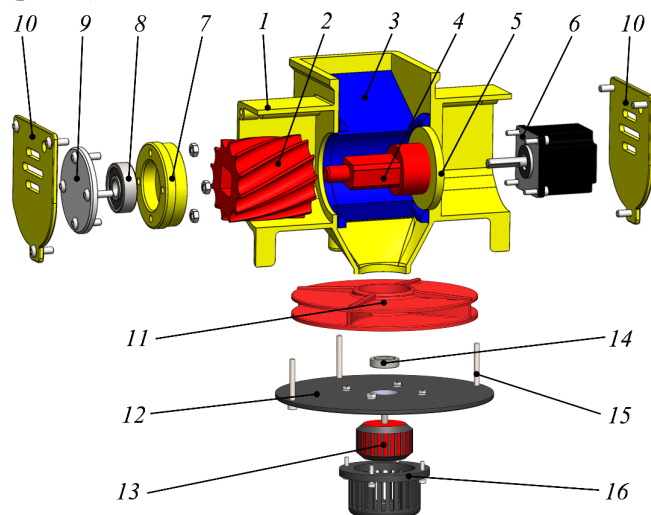


Рис. 3. Устройство высевающего аппарата
Fig. 3. The structure of the sowing unit

Для моделирования семян сосны обыкновенной использовались 2 типа частиц – сферическая и мультисферическая (рис. 4). Сферическая частица позволяет эффективно проводить виртуальный эксперимент с минимальными временными затратами, однако такое упрощение формы является существенным допущением в случае имитации семян сосны. С целью более точного моделирования и возможности оценки погрешности использования сферической формы семян была создана мультисферическая частица, лучше описывающая форму семени сосны. Она состоит из 8 сфер диаметром от 1,1 до 2,2 мм. Объем мультисферической частицы составил 15,45 мм³, что несущественно меньше, чем для базовой 3D-модели семени объемом 16,03 мм³.

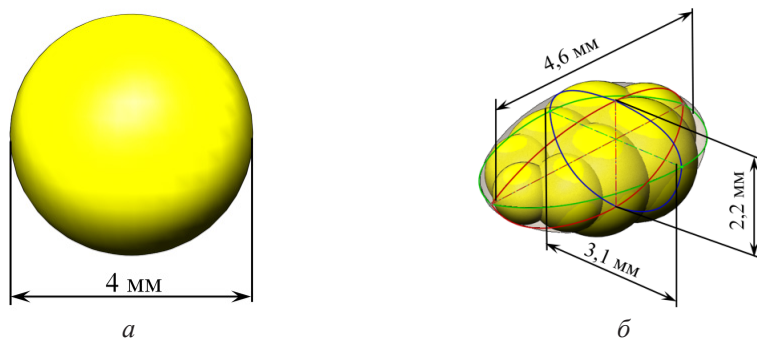


Рис. 4. Дискретные частицы имитирующие семена сосны:
а – сферическая частица; б – мультисферическая частица

Fig. 4. Discrete particles imitating pine seeds:
а – spherical particle; б – multispherical particle

Для имитационного моделирования будем считать, что семена состоят из шарообразных элементов с диаметром d_j . При контакте элементов друг с другом возникают упругие силы и силы вязкого трения (рис. 5, а). Под действием сил в модели рассчитывается движение элементов по законам классической динамики.

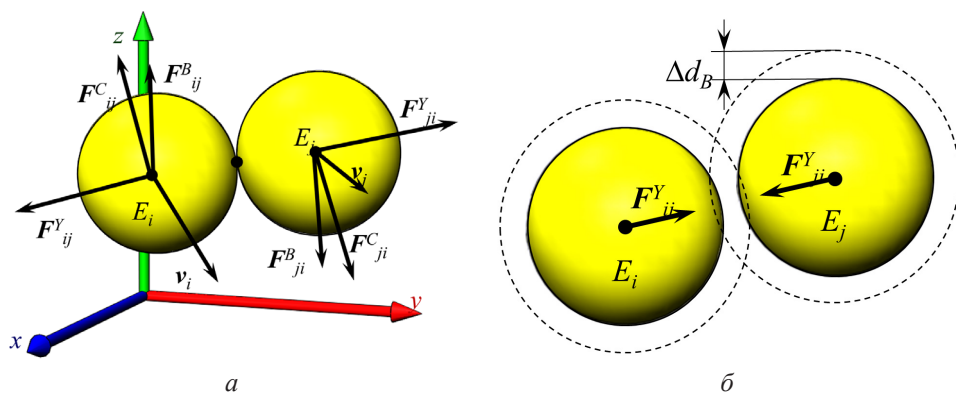


Рис. 5. Схемы силового контакта дискретных элементов: а – силы, возникающие при контакте 2 дискретных элементов; б – силы притяжения при удалении элементов друг от друга до определенного расстояния. F^Y – упругие силы; F^C и F^B – силы сухого и вязкого трения

Fig. 5. Diagrams of force contact between discrete elements: а – forces arising during contact between 2 discrete elements; б – attractive forces when the elements are separated by a certain distance. F^Y – elastic forces; F^C and F^B – dry and viscous friction forces

Моделирование производится в 3-мерном пространстве XYZ . Состояние каждого элемента-шара E_i задается 6 переменными: декартовыми координатами его центра (x_i, y_i, z_i) и составляющими скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) . Механическое взаимодействие элементов между собой принято упруго-вязким, что позволяет заложить в модель основные механические свойства сред: модуль упругости, коэффициент внутреннего трения, предельную деформацию при испытании на разрыв. В модели учитывается, что между соседними элементами могут возникать силы отталкивания в случае внедрения элементов друг в друга (рис. 5, а) или притяжения, если сцепленные элементы удаляются друг от друга (рис. 5, б).

Упругая составляющая взаимодействия между элементами обеспечивает как отталкивание (расстояние между r_{ij} центрами i -го и j -го элементов менее диаметра элемента d_3), так и притяжение элементов в узком диапазоне расстояний ($d_3 > r_{ij} > r_k$), где $r_k = \alpha d_3$ – критическое расстояние, до которого элементы взаимодействуют друг с другом; α – коэффициент выражения критического расстояния через диаметр элемента (в большинстве случаев принят равным 1,1). При расчете силы \vec{F}_{ij} , действующей со стороны элемента i на элемент j , считается, в соответствии с 3-м законом Ньютона, что сила, исходящая от элемента j на элемент i , является такой же по модулю, как и сила от элемента i , и противоположной ей по направлению, т. е. $\vec{F}_{ij} = -\vec{F}_{ji}$.

Уравнения движения элементов составляются на основе 2-го закона Ньютона:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left(\left(c_{ij}(d_3 - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_{ij}(r_{ij} - d_3)(v_{xi} - v_{xj}), r_{ij} < \alpha_{ij} d_3; \right. \right. \\ \left. \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_{ij} d_3 \right) \right); \\ m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left(\left(c_{ij}(d_3 - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + k_{ij}(r_{ij} - d_3)(v_{yi} - v_{yj}), r_{ij} < \alpha_{ij} d_3; \right. \right. \\ \left. \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_{ij} d_3 \right) \right); \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = -m_i g + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left(\left(c_{ij}(d_3 - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_{ij}(r_{ij} - d_3)(v_{zi} - v_{zj}), r_{ij} < \alpha_{ij} d_3; \right. \right. \\ \left. \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_{ij} d_3 \right) \right); \end{array} \right.$$

где m – масса элемента; i – номер элемента; x_i, y_i, z_i – декартовы координаты элемента; t – время; N_3 – количество элементов; j – номер элемента, возможно, контактирующего с i -м элементом; c_{ij} и k_{ij} – коэффициенты жесткости взаимодействия и вязкого трения друг о друга элементов i и j ; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j ; v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} – декартовы составляющие скорости i -го элемента; g – ускорение свободного падения.

Расстояние r_{ij} между центрами элементов $E_i(x_i, y_i, z_i)$ и $E_j(x_j, y_j, z_j)$ рассчитывается по теореме Пифагора:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

Решением системы дифференциальных уравнений 2-го порядка являются функции $x_i(t), y_i(t), z_i(t)$, определяющие траектории движения элементов.

Расчет по приведенным формулам включает в себя 3 цикла, вложенных один в другой: по номеру компьютерного эксперимента, по номеру временного шага и по номеру элемента.

Для исследования процесса аэросева был создан виртуальный испытательный стенд (рис. 6). Он имеет длину 10 м и ширину 5 м. Поверхность разбита на квадратные секции размером $0,1 \times 0,1$ м для фиксации места падения частиц. Посадочный аппарат и основание стенда создавались в среде 3D-CAD и экспортировались в формат STL, представляющий поверхности объекта в виде множества треугольников. При помощи виртуальных двигателей задавались режимы движения механизма дозирования, распределения и скорость полета.

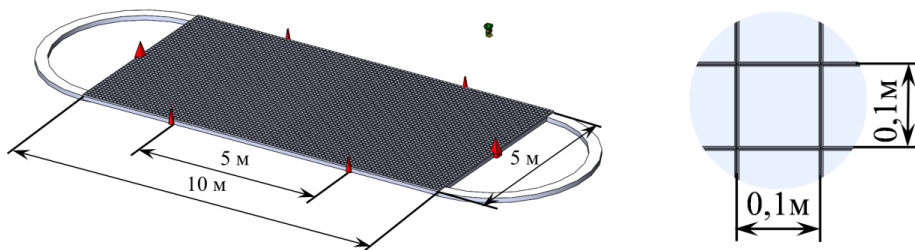


Рис. 6. Виртуальный испытательный стенд

Fig. 6. Virtual test bench

В качестве тестового показателя равномерности распределения семян был принят коэффициент вариации.

На рис. 7 показаны стадии моделирования аэросева.

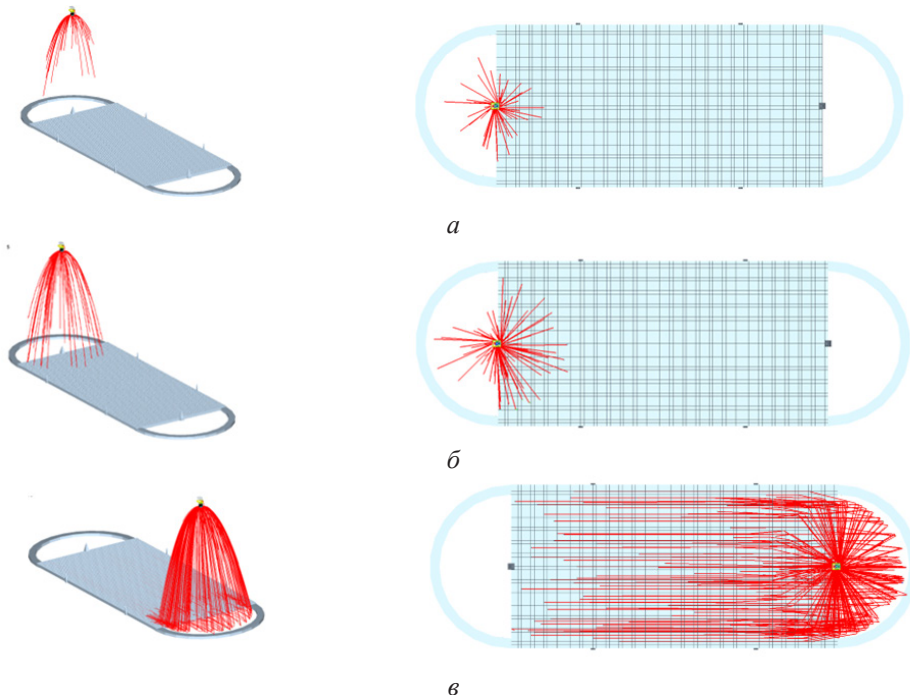


Рис. 7. Моделирование с отслеживанием траекторий:
а – начало разброса; б – начало движения; в – конец движения

Fig. 7. Simulation with trajectory tracking:
а – start of scatter; б – start of movement; в – end of movement

С целью экспериментальной проверки данных, полученных с помощью моделирования, из инженерных пластиков с использованием 3D-печати был изготовлен высевающий аппарат (рис. 8). Это позволило минимизировать массу высевающего аппарата при обеспечении достаточной прочности конструкции.



Рис. 8. Центробежный высевающий аппарат для БПЛА

Fig. 8. Centrifugal sowing unit for UAVs

Для полевых исследований был создан испытательный стенд, включающий подвесной горизонтальный несущий канат 1, закрепленный на опорах 2, механизм подвеса 3, раму БПЛА с высевающим аппаратом 4 и механизм протяжки 5 (рис. 9).

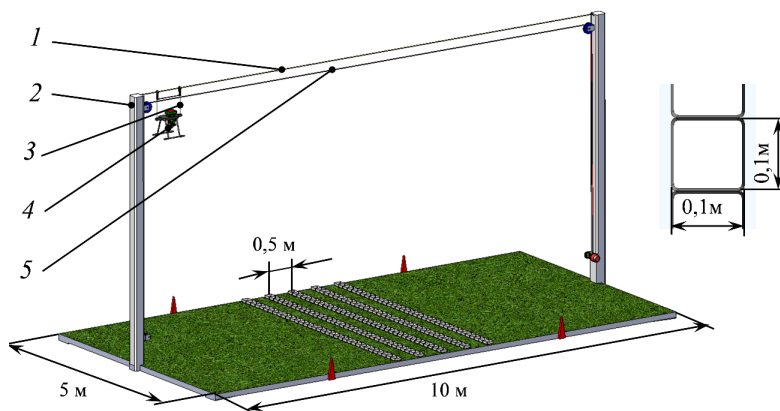


Рис. 9. Испытательный стенд

Fig. 9. Test bench

Использование такой стационарной испытательной установки позволяет точно контролировать режимы движения высевающего аппарата и исключает проблемы, связанные с запретом полетов БПЛА в регионе. Размеры испытательного и виртуального стендов аналогичны. Для анализа равномерности распределения семян применяются лотки квадратной формы размером $0,1 \times 0,1$ м, расположенные 5 поперечными рядами в центральной части стенда с интервалом 0,5 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно разработанной параметрической 3D-модели, масса высевающего аппарата составила 1415 г, при этом масса экспериментального образца равна 1274 г. Снижение массы на 10 % объясняется возможностью облегчения деталей за счет создания внутренних полостей при изготовлении с применением 3D-печати. Центр масс смещен в поперечно-вертикальной плоскости в сторону шагового двигателя привода механизма дозирования (рис. 10, *а*).

Максимальный полезный объем бункера равен 2,04 л, соответственно, при принятой насыпной плотности семян 560 г/л их общая масса равняется 1142 г. Масса экспериментального образца высевающего аппарата при засыпке в него семян сосны обыкновенной составила 1084 г. Центр масс расположен симметрично, что исключает дисбаланс в высевающем агрегате (рис. 10, *б*).

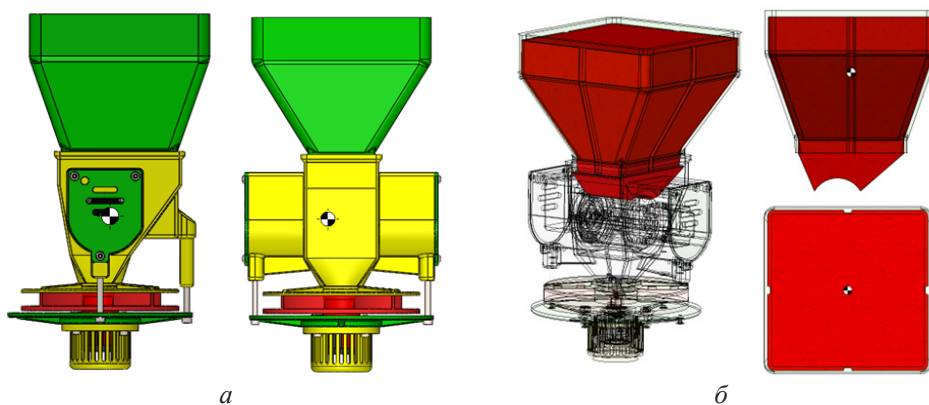


Рис. 10. Исследование массовых характеристик:
а – высевающего аппарата; *б* – семенного бункера

Fig. 10. Study of mass characteristics: *a* – sowing unit; *b* – seed hopper

С использованием DEM-моделирования была исследована производительность механизма дозирования при разных скоростях вращения дозирующей катушки. Также получено рабочее полетное время, требуемое для высева 1 кг семян без учета разворотов БПЛА (рис. 11).

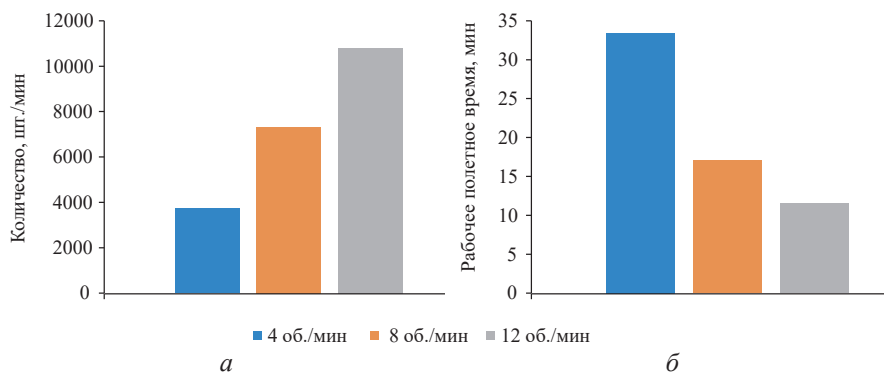


Рис. 11. Исследование рабочих режимов механизма дозирования:
а – производительность механизма дозирования; *б* – требуемое полетное время

Fig. 11. Study of the operating modes of the dosing mechanism:
a – dosing mechanism performance; *b* – required flight time

Полученные данные показывают, что для большинства современных БПЛА с продолжительностью полета 30–40 мин наиболее приемлемыми будут скорости вращения механизма дозирования 8...12 об./мин, позволяющие высевать 1 кг семян за 12...17 мин. Это обеспечивает запас времени на взлет, развороты и посадку. Также остается возможность снижения скорости полета при неблагоприятных условиях.

Далее было выполнено моделирование ширины засеваемой полосы при разных скоростях работы механизма распределения (рис. 12). В экспериментах не было выявлено устойчивой зависимости между режимами работы механизма дозирования и шириной засеваемой полосы.

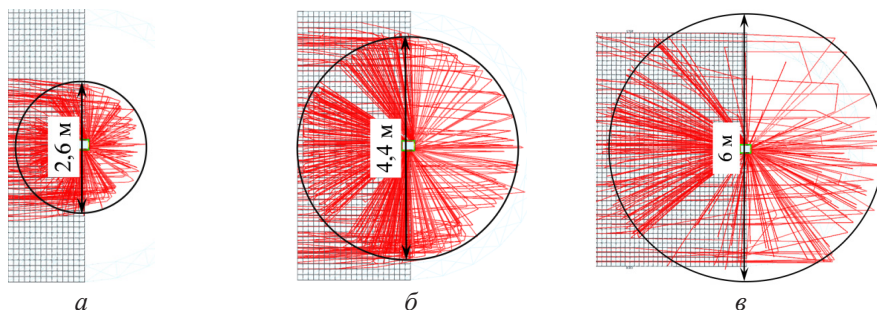


Рис. 12. Моделирование ширины засеваемой полосы с частотами вращения механизма распределения: *a* – 100 об./мин; *б* – 200 об./мин; *в* – 300 об./мин

Fig. 12. Simulation of the width of the seeded strip with the rotation speeds of the distribution mechanism: *a* – 100 rpm; *б* – 200 rpm; *в* – 300 rpm

Проанализированы количество семян, высеваемых на 1 м² при различных режимах работы механизмов дозирования и распределения, и площадь, засеваемая за 1 миссию с загрузкой бункера 1 кг семян (рис. 13). Число семян на 1 м² в зависимости от скоростей вращения механизмов дозирования и распределения составило от 2 до 14 шт. Площадь, засеваемая за 1 миссию, варьируется от 0,9 до 6,0 га. Коэффициент вариации равномерности распределения семян при моделировании составил 18,8 %. Результаты показывают, что разработанный высевательный аппарат и агрегат могут применяться для реализации нормы высева от 1 до 1,5 кг/га в соответствии с правилами лесовосстановления. При всех скоростях вращения механизмов дозирования и распределения наблюдался стабильный высеv семян.

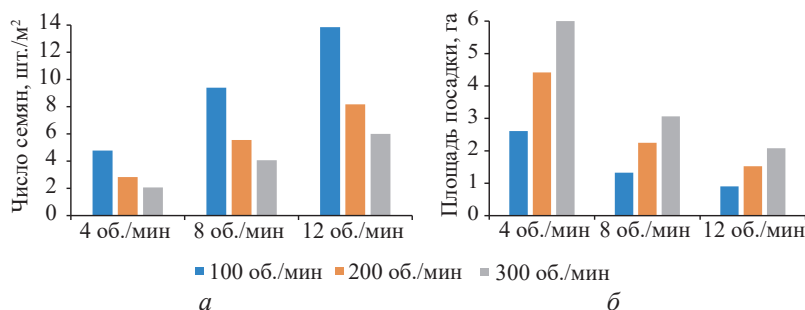


Рис. 13. Основные параметры рабочего процесса высевательного агрегата: *a* – число семян, высеваемых на 1 м²; *б* – площадь посадки за 1 миссию

Fig. 13. Key parameters of the sowing unit's operating process: *a* – number of seeds sown per m²; *б* – planting area per mission

Для проверки адекватности данных моделирования было выполнено их сравнение с экспериментальными данными по 2 параметрам – ширине засеваемой полосы и числу высеваемых семян на 1 м² (рис. 14).

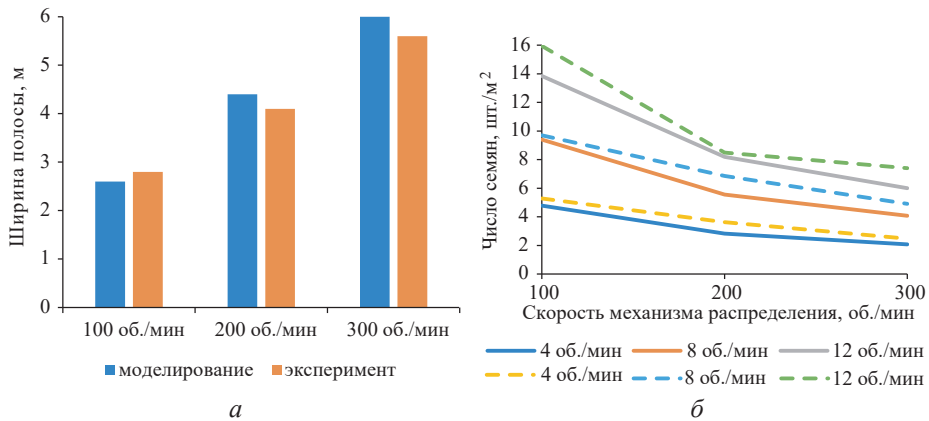


Рис. 14. Сравнение экспериментальных данных и данных моделирования: *a* – ширина засеваемой полосы; *б* – число семян на 1 м² (прямые линии – модель; пунктирные – эксперимент)

Fig. 14. Comparison of experimental and modeling data: *a* – width of the sown strip; *б* – number of seeds per 1 m² (solid lines – model; dashed lines – experiment)

Анализ результатов показал, что полученные экспериментальные значения хорошо согласуются с данными моделирования. Так, наибольшее расхождение экспериментальных данных и данных моделирования по ширине засеваемой полосы составило 14 % при скорости вращения высевающей катушки 8 об./мин и скорости механизма распределения 200 об./мин. Число семян, высеваемых на 1 м², в эксперименте также было больше – в среднем по опытам на 12,7 %.

Коэффициент вариации равномерности распределения семян во всех опытах был в диапазоне 23,3...28,6 %, что, вероятно, связано с влиянием воздушных потоков от пропеллеров БПЛА и скоростью ветра.

Установлено, что все экспериментальные данные превышают значения, полученные в процессе моделирования, что объясняется принятым допущением о сферической форме семени, позволившем значительно сократить время симуляции.

Выводы

1. Масса высевающего аппарата, полученная по данным 3D-модели, составила 1415 г, а установленная взвешиванием экспериментального образца – только 1274 гр. Снижение массы на 10 % объясняется возможностью облегчения деталей за счет создания внутренних полостей при изготовлении с применением 3D-печати.

2. Средняя ширина засеваемой полосы при скорости вращения центростремительного механизма распределения 100 об./мин составила 2,6 м, при 200 об./мин возросла до 4,4 м, а при 300 об./мин достигла 6 м. При скорости вращения механизма дозирования в пределах 8...12 об./мин обеспечивается высева 1 кг семян за 12...17 мин без учета времени на взлет, развороты и посадку высевающего

агрегата. Это позволяет применять большинство современных беспилотных летательных аппаратов с полетным временем 30...40 мин.

3. Число семян, высеваемое на 1 м² в зависимости от режимов работы высевающего аппарата, при моделировании составило от 2 до 14 шт. при скорости движения сеялки 5 м/с. Площадь, засеваемая за 1 миссию, – от 0,9 до 6,0 га. При рекомендованных нормах высева в 1...1,5 кг/га подходящим режимом при высоте полета 5 м является 12 об./мин для механизма дозирования и 100 об./мин для механизма распределения. При неблагоприятных условиях возможно снижение скорости полета, что требует пропорционального уменьшения скорости вращения механизма дозирования.

4. По результатам экспериментальной проверки расхождение экспериментальных данных и данных моделирования по ширине засеваемой полосы составило 14 % при скорости вращения высевающей катушки 8 об./мин и скорости механизма распределения 200 об./мин. Число семян, высеваемых на 1 м², в эксперименте также было больше – средняя разница по опытам составила 12,7 %. Это объясняется принятым допущением о сферической форме семени, позволившем значительно сократить время симуляции.

5. Коэффициент вариации равномерности распределения семян при моделировании составил 18,8 %. Полевые испытания показали коэффициент вариации 23,3...28,6 %, что, вероятно, связано с влиянием воздушных потоков от пропеллеров беспилотного летательного аппарата и скоростью ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

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

Bulavintsev R.A. The Construction Analysis of the Seeding Units for Sowing of Grain Crops. *Agrotehnika i energoobespechenie* = Agrotechnics and Energy Supply, 2018, no. 19(2), pp. 74–84. (In Russ.).

2. Каляшов В.А., До Т.А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // Resources and Technology. 2022. № 2(19). С. 1–47.

Kalyashov V.A., Do T.A., Khitrov E.G., Grigorieva O.I., Guryev A.Yu., Novgorodov D.V. Modern Systems of Machinery and Technologies for Timber Harvesting and Reforestation in Mountain Forests. *Resources and Technology*, 2022, no. 2(19), pp. 1–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6163>

3. Лысыч М.Н., Бухтояров Л.Д., Чернышов В.В., Нагайцев В.М. Обзор современных технологий аэросева лесных культур с применением беспилотных летательных аппаратов // Успехи соврем. естествознания. 2021. № 10. С. 37–42.

Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Chernyshov V.V., Nagaitsev V.M. Overview of Modern Technologies of Aeroseding Forests Using Unmanned Aerial Vehicles. *Uspekhi sovremennoyo yestestvoznaniya* = Advances in Modern Natural Sciences, 2021, no. 10, pp. 37–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37696>

4. Лысыч М.Н., Малюков С.В., Шавков М.В., Гнусов М.А. Исследование полуавтоматического посадочного механизма для сеянцев с закрытой корневой системой в среде САПР с полноразмерным макетированием средствами 3d-печати // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2025. № 1(29). С. 144–161.

Lysych M.N., Malyukov S.V., Shavkov M.V., Gnusov M.A. Study of Semi-Automatic Planting Mechanism for Seedlings with Root-Balled Tree System in CAD with Full-Size 3D-Printing Tools. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2025, no. 1(29), pp. 144–161. (In Russ.).

5. Система разбрасывания гранул XAG JetSeed. Режим доступа: <https://www.xa.com/en/jetseed> (дата обращения: 23.07.25).

XAG Granule Spreading System – JetSeed. XAG Official Site. Available at: <https://www.xa.com/en/jetseed> (accessed 23.07.25).

6. Система распыления T Series Spreading System 2.0. Режим доступа: <https://4vision.ru/products/sistema-raspyleniya-mg-series-spreading-system-20> (дата обращения: 23.07.25).

T Series Spreading System 2.0. Available at: <https://4vision.ru/products/sistema-raspyleniya-mg-series-spreading-system-20> (accessed 23.07.25).

7. Система UGS-2G. Режим доступа: <https://www.cfr-innovations.com/product-page/ugs-2g> (дата обращения: 23.07.25).

UGS-2G System. Available at: <https://www.cfr-innovations.com/product-page/ugs-2g> (accessed 23.07.25).

8. Соколов С.В., Новиков А.И. Тенденции развития операционной технологии аэросева беспилотными летательными аппаратами в лесовосстановительном производстве // Лесотехн. журн. 2017. № 4(7). С. 190–205.

Sokolov S.V., Novikov A.I. Trends of Development of Aerial Seeding Operational Technology with Unmanned Vehicles in Reforestation Production, *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2017, no. 4(7), pp. 190–205. (In Russ.).

https://doi.org/10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194

9. Coetzee C.J., Lombard S.G. Discrete Element Method Modelling of a Centrifugal Fertiliser Spreader. *Biosystems Engineering*, 2011, vol. 109, pp. 308–325.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.04.011>

10. Huang Y.X., Wang B.T., Yao Y.X., Ding S.P., Zhang J.C., Zhu R.X. Parameter Optimization of Fluted-Roller Meter Using Discrete Element Method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, vol. 6(11), pp. 65–72.

<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181106.3573>

11. Hwang S.J., Nam J.S. DEM Simulation Model to Optimise Shutter Hole Position of a Centrifugal Fertiliser Distributor for Precise Application. *Biosystems Engineering*, 2021, vol. 204, pp. 326–345. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.02.004>

12. Liedekerke P.V., Tijksens E., Dintwa E., Rioual F., Vangeyte J., Ramon H. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. *Powder Technology*, 2009, vol. 190, pp. 348–360. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.018>

13. Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs. *Inventions*, 2021, vol. 6, no. 4, art. 83, pp. 1–26. <https://doi.org/10.3390/inventions6040083>

14. Marcinkiewicz J., Selech J., Staszak Z., Gierz L., Ulbrich D., Romek D. DEM Simulation Research of Selected Sowing Unit Elements Used in a Mechanical Seeding Drill. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 254, p. 02021.

<https://doi.org/10.1051/matecconf/201925402021>

15. Mohan M., Richardson G., Gopan G., Aghai M.M., Bajaj S., Galgamuwa G.A., Vastaranta M., Arachchige P., Amoros L., Corte A., De miguel S., Leite R.V., Kganyago M., Broadbent E.N., Doaemo W., Shorab M., Cardil A. UAV Supported Forest Regeneration: Current trends, Challenges and Implications. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(13), pp. 1–31. <https://doi.org/10.3390/rs13132596>

16. Murray J.R., Tullberg J.N., Basnet B.B. *Planters and Their Components. Types, Attributes, Functional Requirements, Classification and Description.* Australian Centre for International Agricultural Research, 2006, C. ACIAR Monograph, vol. 121. 178 p.

17. National Research Council. *Sowing Forests From the Air.* Washington, DC, National Research Council, 1981. 75 p. <https://doi.org/10.17226/19670>

18. Nukeshev S., Sugirbay A., Dulatbay Y., Tanbaev K., Yeskhozhin K., Chen J., Nazarbayev Y., Sugirbaeva Z. Offset Straight-Tooth Roller Development Using the Discrete

Element Method for Applying Granular Mineral Fertilizer. *International Journal of Technology*, 2024, vol. 15, no. 6, pp. 2060–2073. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v15i6.7311>

19. Song C., Zhou Z., Luo X., Lan Y., He X., Ming R., Li K., Hassan S.G. Design and Test of Centrifugal Disc Type Sowing Device for Unmanned Helicopter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, vol. 2(11), pp. 55–61. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3757>

20. Wu Z., Li M., Lei X., Wu Z., Jiang C., Zhou L., Ma R., Chen Y. Simulation and Parameter Optimization of a Centrifugal Rice Seeding Spreader for a UAV. *Biosystems Engineering*, 2020, vol. 192, pp. 275–293. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.004>

21. Yang L., Chen L., Zhang J., Liu H., Sun Z., Sun H., Zheng L. Fertilizer Sowing Simulation of a Variable-Rate Fertilizer Applicator Based on EDEM. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 17(51), pp. 418–423. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.185>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest