



Проектирование и испытание аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА

Михаил Н. Лысыч¹✉, miklynea@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Леонид Д. Бухтояров¹, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Максим А. Гнусов¹, mgnusov@ya.ru,  0000-0003-1653-4595

Денис Ю. Дручинин¹, druchinin.denis@rambler.ru,  0000-0003-2128-2687

Евгений В. Мартыновский¹, profootballjack@gmail.com,  0009-0000-0434-575X

Лариса В. Брындина¹, bryndinv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>

¹*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

Аэросев лесных семян с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляет собой эффективный метод быстрого и недорогого лесовосстановления, что особенно актуально в условиях современных экологических вызовов. Обзор исследований и технической оснащенности в этой области показал, что сейчас отсутствуют отечественные высевающие аппараты для БПЛА способные осуществлять точный посев дражированных лесных семян с их внедрением в поверхностный слой почвы. Цель данного исследования заключается в разработке и испытании высевающего аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА, а также изучение его рабочих режимов для определения параметров эффективного заглубления семян. Материалы и методы исследования включают 3D-моделирование геометрии высевающего аппарата с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Моделирование выполняется с использованием метода дискретных элементов (DEM), представляющего почву в виде сферических частиц разной степени связности, а индентор в виде твердой сферы с заданными физическими свойствами (масса, положение, скорость, сила). Взаимодействие частиц описывается моделью контакта с пружиной и демпфером. Ударное взаимодействие осуществляется при скоростях индентора 25, 50 и 75 м/с с несвязной, среднесвязной и связной почвами. Лабораторный эксперимент проводится на несвязных почвах при скорости движения индентора 75 м/с. Результаты показали, что, согласно 3D-модели, масса высевающего аппарата составила 1140 г, а масса изготовленного экспериментального образца 1074 г. По результатам DEM-моделирования установлено, что проникновение индентора наблюдается только на несвязных почвах при скоростях 75 м/с, однако для исключения выброса индентора из образовавшейся воронки достаточно скорости 25 м/с. В случае среднесвязных и связных почв наблюдается только незначительный боковой охват индентора почвенными частицами или нахождение на поверхности в пределах образованного углубления. Экспериментальная проверка выявила ряд расхождений с данными моделирования, так глубина проникновения при моделировании составила 17,5 мм, а в лабораторном эксперименте 24,6 мм. При этом средний диаметр образуемых воронок в верхней части напротив был больше для данных моделирования и составил 53,5 мм, а для экспериментальных данных 19,3 мм. Для уменьшения расхождений в дальнейшем необходимо модифицировать модель с учетом влияния влажности, гранулометрического состава и объемной плотности естественных почв.

Ключевые слова: *высевающий аппарат, аэросев, БПЛА, имитационное моделирование, системы автоматизированного проектирования (САПР), испытания, метод дискретных элементов (DEM)*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Благодарности: Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Проектирование и испытание аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА / М.Н. Лысыч, Л.Д. Бухтояров, М.А. Гнусов, Д.Ю. Дручинин, Е.В. Мартыновский, Л.В. Брындина // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 387-404. – Библиогр.: с. 401-403 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/23>.

Поступила 01.06. 2025. *Пересмотрена* 12.11.2025. *Принята* 30.11.2025. *Опубликована онлайн* 26.12.2024.

Article

Design and testing of a precision seeding device for aerial sowing of pelleted forest seeds from a UAV

Mikhail N. Lysych¹✉, miklynea@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Leonid D. Bukhtoyarov¹, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Maxim A. Gnusov¹, mgnusov@ya.ru,  0000-0003-1653-4595

Denis Y. Druchinin¹, druchinin.denis@rambler.ru,  0000-0003-2128-2687

Evgeny V. Martynovsky¹, profotballjack@gmail.com,  0009-0000-0434-575X

Larisa V. Bryndina¹, bryndinv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>

¹ FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva street, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

Aerial sowing of forest seeds using unmanned aerial vehicles (UAVs) is an effective method for rapid and inexpensive reforestation, which is particularly relevant in the face of modern environmental challenges. A review of research and technical equipment in this field revealed that domestically produced sowing device for UAVs capable of precisely sowing pelleted forest seeds and incorporating them into the surface soil layer are currently lacking. The objective of this study is to develop and test a precision sowing device for aerial sowing of pelleted forest seeds from a UAV, as well as to study its operating modes to determine the parameters for effective seed placement. The research materials and methods include 3D modeling of the sowing device geometry using computer-aided design (CAD) systems. The modeling is performed using the discrete element method (DEM), representing the soil as spherical particles of varying degrees of cohesion and the indenter as a solid sphere with specified physical properties (mass, position, velocity, force). Particle interaction is described by a contact model with a spring and damper. Impact interaction occurs at indenter velocities of 25, 50, and 75 m/s with cohesionless, moderately cohesive, and cohesive soils. A laboratory experiment is conducted on cohesionless soils at an indenter speed of 75 m/s. The results showed that, according to the 3D model, the mass of the sowing device was 1140 g, while the mass of the manufactured experimental sample was 1074 g. DEM modeling revealed that indenter penetration was observed only in cohesionless soils at speeds of 75 m/s. However, a speed of 25 m/s was sufficient to prevent the indenter from being ejected from the resulting crater. In the case of moderately cohesive and cohesive soils, only minor lateral coverage of the indenter by soil particles or its presence on the surface within the formed depression was observed. Experimental verification revealed several discrepancies with the modeling data: the penetration depth in the modeling was 17.5 mm, while in the laboratory experiment it was 24.6 mm. Moreover, the average diameter of the formed craters in the upper part was, conversely, larger for the modeling data and

amounted to 53.5 mm, while for the experimental data it was 19.3 mm. To reduce discrepancies in the future, it is necessary to modify the model taking into account the influence of moisture, particle size distribution and bulk density of natural soils.

Keywords: *seeding device, aerial sowing, UAV, simulation modeling, computer-aided design (CAD), testing, discrete element method (DEM)*

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation №25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Gnusov M.A., Druchinin D.Yu., Martynovsky E.V., Bryndina L.V. (2025). Design and testing of a precision seeding device for aerial sowing of pelleted forest seeds from a UAV. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 387-404 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/23>.

Received 01.06. 2025. **Revised** 12.11.2025. **Accepted** 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025.

Введение

Введение

Интенсификация процессов глобального обезлесения и климатических изменений актуализирует необходимость разработки высокотехнологичных методов лесовосстановления [1]. Технология аэросева с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляет особый интерес благодаря операциональным преимуществам и экономической эффективности - прямой посев в 10-30 раз дешевле традиционных методов [1]. Однако эффективность технологии ограничена комплексом факторов, снижающих всхожесть семян до уровня менее 10% [1].

Проведенный анализ оборудования ведущих компаний (DroneSeed, AirSeed, Flash Forest, Dronecoria) выявил четыре основных типа высевальных аппаратов. Наибольший потенциал демонстрируют аппараты точного посева с ускорением дражированных семян потоком воздуха, используемые компаниями Dendra Systems, Flash Forest, AirSeed Technologies и Ghaf Tree Project.

Согласно лесоводческим рекомендациям для Российской Федерации, аэросев может применяться на участках, пострадавших от пожаров, с супесчаными и хорошо дренированными суглинистыми почвами, где огонь полностью

уничтожил лесную подстилку [2], а также на транспортно-удаленных лесных участках и склонах, куда затруднен доступ тракторной техники [3].

Для моделирования процессов ударного взаимодействия объектов сферической формы с дискретной средой широко используются экспериментальные и DEM-методы. Фундаментальные основы процессов ударного проникновения в сыпучие гранулированные слои были заложены в работе Ноу М. и др. [6] (рисунок 1а), где методами высокоскоростной съемки детально исследована динамика формирования полости и выброса частиц.

Значительный вклад в понимание влияния механических свойств индентора внесло исследование Ye X. и Van Der Meer D. [7], продемонстрировавшее особенности кратерообразования и поведения при ударе для деформируемых гидрогелевых сфер в зависимости от их модуля Юнга.

Особую актуальность для моделирования реальных почвенных условий представляют работы Zhang X. и коллектива авторов [8-10], в которых последовательно исследуется влияние капиллярных эффектов и всасывания в влажных гранулированных материалах на динамику удара, силу сопротивления и глубину проникновения сферического индентора.

Важным аспектом при моделировании поведения семян в почве является учет вращательного движения. Исследование Carvalho D.D. и др. [11] специально посвящено анализу проникновения вращающейся сферы в гранулированную среду, где установлено существенное влияние вращения на траекторию и характеристики внедрения.

Проведенный анализ современных исследований, выполненных методом дискретных элементов (DEM), демонстрирует широкие возможности данного подхода для изучения динамики ударного взаимодействия в гранулированных средах.

В исследовании Ye X. et al. [12] (рисунок 1б) методом DEM изучен наклонный удар снаряда о гранулированную среду. Авторы установили количественные зависимости глубины проникновения от угла атаки и детально проанализировали динамику процесса.

Работа Shen W. et al. [13] посвящена анализу влияния межчастичного трения и демпфирования на динамику удара сферического снаряда о грунтовое основание. Авторы продемонстрировали, что изменение коэффициента трения между частицами на 30% приводит к значительному изменению глубины проникновения (до 25%).

В исследовании Liang S. et al. [14] подробно изучены механизмы передачи и диссипации энергии при ударе индентора о гранулированный материал. Установлено, что до 60% начальной кинетической энергии рассеивается за счет работы сил трения между частицами.

Значительный интерес представляет работа Zhang X. et al. [15], в которой исследовано влияние формы частиц на динамику ударного взаимодействия. Показано, что использование несферических частиц в моделировании позволяет более точно воспроизводить экспериментальные данные.

Важным направлением развития DEM является применение гибридных методов, что продемонстрировано в работе Lin J. et al. [16]. Авторы использовали CFD-DEM подход для моделирования проникновения снаряда в насыщенные жидкостью гранулированные слои.

Исследование Wada K. et al. [17] демонстрирует возможности DEM для моделирования высокоскоростных ударов (100-900 м/с) и кратерообразования. В работе Ghazi Alshanti W. [18] изучено проникновение вращающегося снаряда в гранулированные системы.

Исследования Sunday C. и соавт. [19, 20] представляют систематический анализ влияния гравитационных условий на процессы ударного взаимодействия в гранулированных средах. В работе [19] проведено сравнительное исследование производительности различных реализаций метода дискретных элементов (DEM) для моделирования ударных процессов в условиях различной гравитации. В исследовании [20] разработана масштабируемая модель столкновений для медленных взаимодействий, учитывающая гравитационные эффекты.

Исследование Ye X. и Zhang C. [21] посвящено анализу влияния геометрии индентора на силовое воздействие и реологические свойства гранулированных сред при ударном взаимодействии. Авторы выявили, что в квазистатическом режиме сила сопротивления не зависит от скорости и может быть описана через расширенную модель локального трения, учитывающую площадь контакта.

Работа Wang F. и соавт. [22] представляет комплексное исследование модели силы сопротивления при вертикальном проникновении в гранулированную среду, основанное на комбинированном использовании DEM-моделирования и экспериментальных данных. Особенностью работы является системный учет таких ключевых параметров, как форма носовой части индентора, скорость воздействия, диаметр частиц гранулированной среды и коэффициент трения между ними. Проведенный анализ выявил, что результаты существующих исследований нельзя использовать напрямую для описания процессов ударного взаимодействия дражированных семян с почвенной средой из-за значительных различий в свойствах сред, инденторов и режимов взаимодействия.

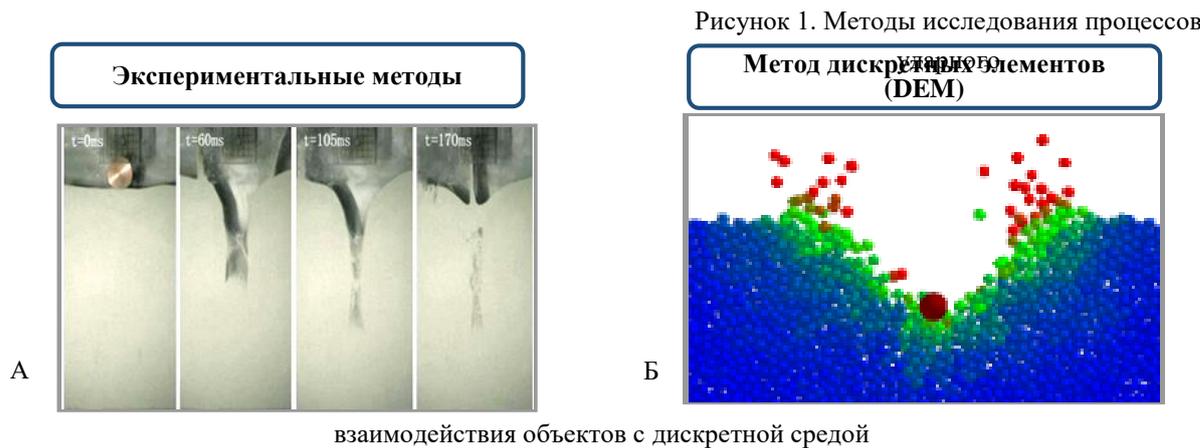


Figure 1. Methods for studying the processes of impact interaction of objects with a discrete medium

Источник: А – Hou M. и др. [6], Б – результаты моделирования авторов

Source: A – Hou M. et al. [6], B – authors' own modeling results

Таким образом, существует потребность в специализированном исследовании ударного взаимодействия дражированных семян с почвенными средами.

Целью данного исследования является разработка и испытание высевающего аппарата точного высева для аэросева дражированных лесных семян с БПЛА, а также изучение его рабочих режимов для определения параметров эффективного заглабления семян.

Материалы и методы

Объектом исследования является пневматический высевающий аппарат точного высева для аэросева лесных семян с БПЛА.

В данной работе спроектирована параметрическая 3D-модель высевающего аппарата точного высева дражированных семян с ускорением потоком воздуха (рисунок 2), который состоит из направляющего канала 1, корпуса 2, крышки корпуса 3, двигателя 4, замкового узла 5, семенного бункера 6, заслонки семенного бункера 7, высевающего барабана 8, подшипника 9, датчика положения 10, воздушного распределителя 11, нагрузочной пружины 12 и контактной колодки 13. 3D-модель создавалась адаптированной для быстрого прототипирования с использованием 3D-

печати, что позволяет в кратчайшие сроки создавать функциональные прототипы из инженерных полимерных материалов с минимальными массовыми характеристиками [5].

Виртуальный стенд, созданный для исследования процессов взаимодействия дражированного семени с почвенной средой, представляет собой фрагмент почвенного пласта размером 100x100x50 мм (рисунок 3). Плотность частиц составляет 2500 кг/м³ что соответствует плотности твердой фазы почвы, масса частицы равна 0,011 г, диаметр 2 мм. Полученный фрагмент почвенного пласта включает 64547 частиц общей массой 0,676 кг с насыпной плотностью 1352 кг/м³ что соответствует плотности лесных почв.

Сферический индентор (далее по тексту дражированное семя) диаметром 6 мм генерируется по центру почвенного пласта на высоте 200 мм от его поверхности. Плотность дражированного семени принята равной 1900 кг/м³ что соответствует усредненной плотности дражировочных смесей, разрабатываемых в данный момент авторами статьи и семян сосны.

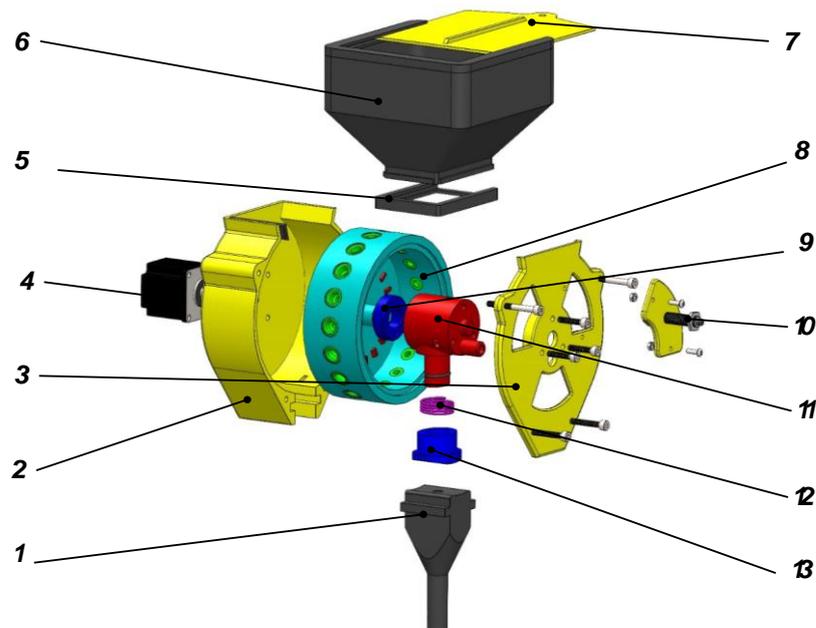


Рисунок 2. Высевающий аппарат точного высева с ускорением дражированных семян потоком воздуха
 Figure 2. Precision seeding device with acceleration of pelleted seeds by an air flow
 Источник: собственная 3D-модель авторов | Source: authors' own 3D model

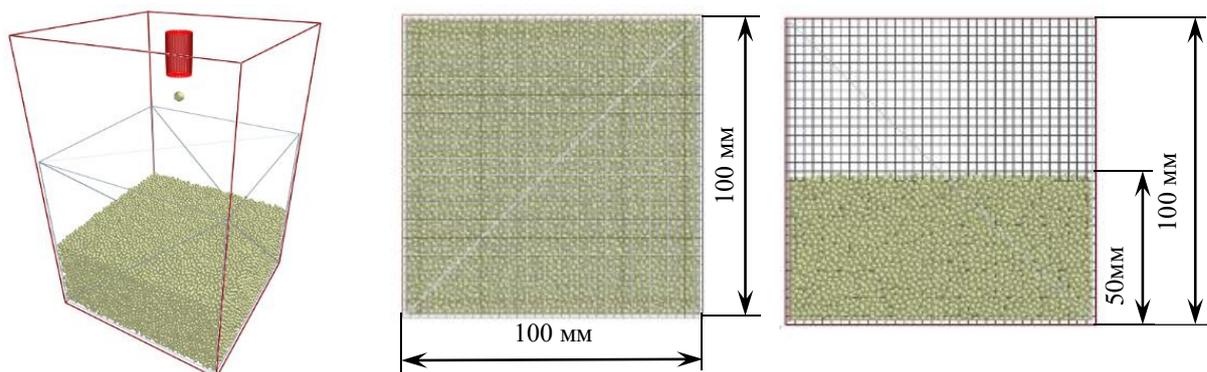


Рисунок 3. Виртуальный стенд для исследования внедрения дражированного семени в почвенный пласт
 Figure 3. Virtual test bench for studying the introduction of pelleted seed into the soil layer
 Источник: собственная композиция авторов | Source: authors' own composition

В таблице 1 представлены основные параметры DEM-модели позволяющие воспроизводить свойства несвязных, среднесвязных и связных почв. Для определения этих параметров были приняты величины удельного сцепления (c_n) свойственные для рассматриваемых типов почв. Далее при постоянном коэффициенте жесткости (k_{zh}) подбирался порог растяжения t_s необходимый для получения заданного удельного сцепления и

коэффициент демпфирования (k_{damp}) для обеспечения стабильности системы.

Движение дискретных элементов под действием упругих сил (F^Y) и сил сухого и вязкого трения (F^C и F^B) рассчитывается по законам классической динамики (рисунок 4). Моделирование производится в трехмерном декартовом пространстве (x, y, z). Состояние каждого элемента E_i задается шестью переменными: координатами его центра (x_i, y_i, z_i) и компонентами скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}). Более подробное описание

математической модели приводится в другой работе авторов [24].

Таблица 1.

Параметры DEM-модели

Тип почвы	Порог растяжения, t_s	Коэффициент демпфирования k_{damp} , Н·с/м	Коэффициент жесткости k_{zh} , Н/м	Получаемое удельное сцепление c_n , кПа
Несвязная	1,05	30	$6,0 \cdot 10^4$	0
Среднесвязная	1,12	40	$6,0 \cdot 10^4$	15000
Связная	1,18	50	$6,0 \cdot 10^4$	30000

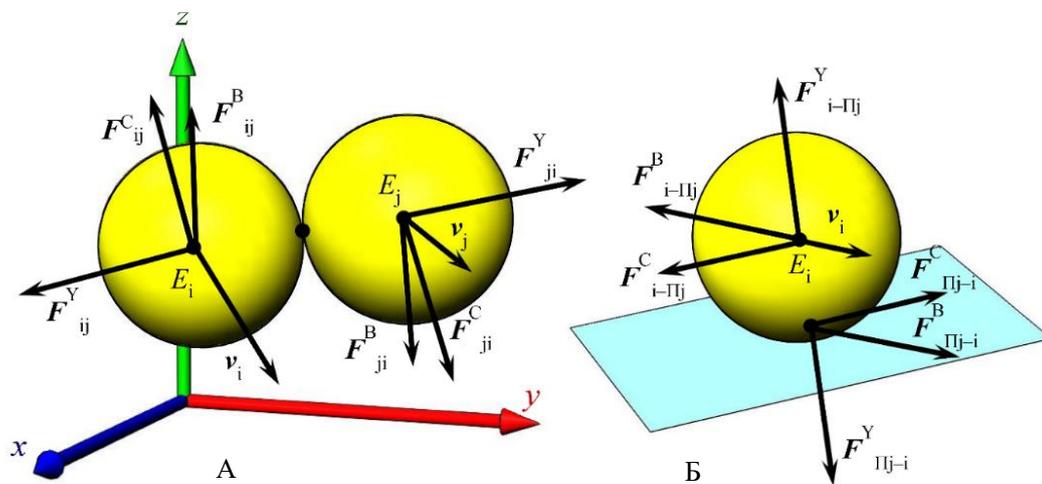


Рисунок 4. Схемы силового контакта дискретных элементов:

А – контакт двух дискретных элементов; Б – контакт дискретного элемента и твердой поверхности

Figure 4. Diagrams of force contact of discrete elements

А – contact of two discrete elements; Б – contact of a discrete element and a solid surface

Источник: собственная композиция авторов | Source: authors' own composition

Мониторинг процесса моделирования производился с использованием цветовых поверхностных эпюр скоростей движения частиц. Синий цвет соответствует нулевой скорости, красный скорости в 1м/с и более, оттенки зеленого – промежуточные значения (рисунок 5, а). Контроль параметров производился в центральном срезе в продольно-вертикальной плоскости, проходящем через ось движения частицы (рисунок 5, б).

В процессе моделирования измерялась глубина проникновения дражированного семени и его смещение в горизонтальной плоскости в случае отскока. При этом глубина проникновения

фиксирувалась по нижней точке семени. Также измеряется наибольшая глубина воронки. Для лабораторных исследований процесса взаимодействия дражированных семян с почвенной средой бы создан испытательный стенд (рисунок 6). Он состоит из основания 1 с кронштейнами крепления камеры и экрана, подвижного кронштейна с механизмом регулировки угла отклонения от вертикали 2, высевающего аппарата 3, крепления для фиксации аппарата 4, хронографа 5, камеры для скоростной съемки 6, емкости для почвы 7.

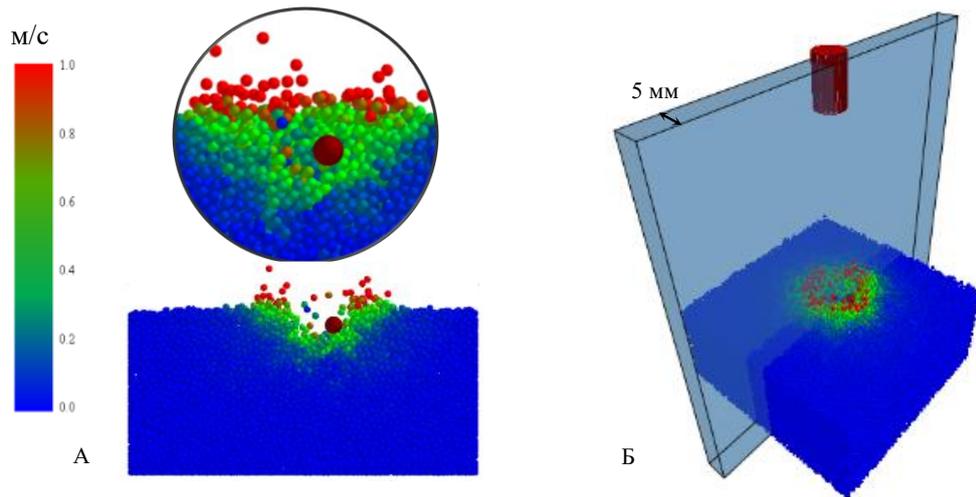


Рисунок 5. Мониторинг процесса моделирования:

А – цветные поверхностные эпюры; Б – центральный срез

Figure 5. Monitoring the modeling process:

A – color surface diagrams; B – central section

Источник: собственная композиция авторов | Source: authors' own composition

Для измерения скорости использовался хронограф WoSporT WST-X01. Он позволяет исследовать объекты диаметром 0,01-20 мм, с частотой до 120 шт/с, диапазон измеряемых скоростей 0-800 м/с при погрешности до 0,3 %. Для съемки процесса применялась USB камера со

скоростью съемки 260 fps. Разгон дражированного семени диаметром 5,95мм и весом 0,22 г осуществлялся страйкбольным воздушным компрессором. Скорость полета регулировалась подбором жесткости пружины компрессора.

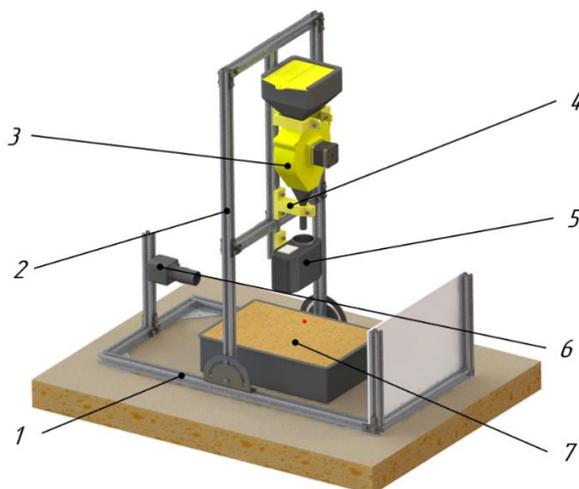


Рисунок 6. Лабораторный стенд

Figure 6. Laboratory stand

Источник: собственная композиция авторов | Source: authors' own composition

Для проведения опыта использовалась несвязная песчаная почва, взятая непосредственно с участка подлежащего лесовосстановлению (рисунок 7). Гранулометрический состав типичный для

песчаных почв сосновых лесов Воронежской области: песок 0,063...2 мм от 70% до 95%; пыль 0,002...0,063 мм от 5 до 25%; глина < 0,002 мм менее 5%. Влажность почвы 10 % по массе.

Поверхность выравнивалась вровень с боковыми стенками короба. В опытах выполнялась серия отстрелов, в которой для исключения взаимного влияния выдерживалось расстояние между соседними воронками и стенками не менее 50 мм.

Для фиксации параметров образованных кратеров и глубин проникновения семени применялся штангенциркуль. Измерение диаметра кратера в верхней части выполнялось с использованием штанги штангенглубиномера ШГ, укладываемой на бортики ящика. Для измерения глубин проникновения дражированного семени применялся глубиномер штангенциркуля ШЦ-1, устанавливаемый опорной поверхностью на штангу штангенглубиномера. Сначала измерялся диаметр



кратера в двух взаимоперпендикулярных направлениях и вычислялось среднее значение, а затем выполнялся частичное раскапывание дражированного семени и контроль глубины проникновения.

Регулировка скорости высева при проверке стабильности работы высевающего аппарата осуществлялась изменением скорости вращения шагового двигателя высевающего барабана.

В качестве показателя однородности данных был принят коэффициент вариации (CV). Число повторов опытов при моделировании и эксперименте определялось пилотной серией экспериментов, проводившейся до достижения CV менее 10%.



Рисунок 7. Исследование проникновения сферического индентора в почву

Figure 7. Study of penetration of a spherical indenter into soil

Источник: собственное фото авторов | Source: authors' own photo

Результаты и их обсуждение

Согласно разработанной параметрической 3D-модели, масса высевающего аппарата составила 1140 г, при этом масса изготовленного экспериментального образца равна 1074 г. Незначительное снижение массы объясняется возможностью облегчения пластиковых деталей за счет создания внутренних полостей при изготовлении с применением 3D-печати. Центр масс незначительно смещен в поперечно-вертикальной плоскости в сторону шагового двигателя высевающего барабана (рисунок 8, а).

Максимальный полезный объем бункера равен 1,92 л, соответственно при принятой насыпной плотности семян в 560 г/л их общая масса равняется 1075 г. Масса полученная при засыпке экспериментального образца высевающего аппарата дражированными семенами сосны обыкновенной составила 1017 г. Центр масс загруженного бункера расположен по центру в горизонтальной плоскости что исключает внесение дисбаланса в высевающий агрегат (рисунок 8, б).

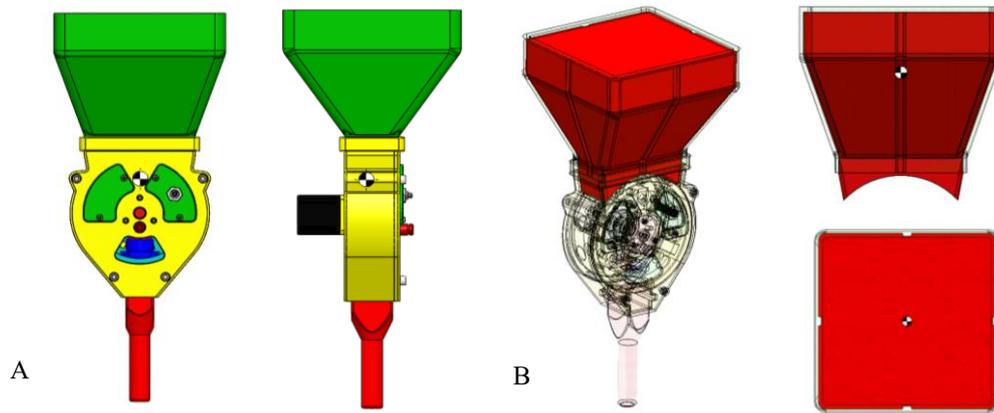


Рисунок 8. Исследование массовых характеристик:

А – высевашего аппарата; Б – семенного бункера

Fig. 8. Study of mass characteristics:

A – sowing unit; B – seed hopper

Источник: собственная 3D-модель авторов | Source: authors' own 3D model

На рисунке 9 приводятся цветные эпюры центрального среза почвы, демонстрирующие процесс внедрения дражированного семени в несвязную почву при скоростях 25, 50 и 75 м/с.

Анализ данных для несвязных почв показывает, что при скоростях 25 и 50 м/с глубина воронки несколько больше, чем глубина

проникновения семени, наблюдается продольное смещение семени вверх по стенке образованной воронки, без его выброса за пределы воронки. При скорости движения в 75 м/с напротив глубина проникновения больше, чем глубина воронки, что обеспечивает полное засыпание семени почвой.

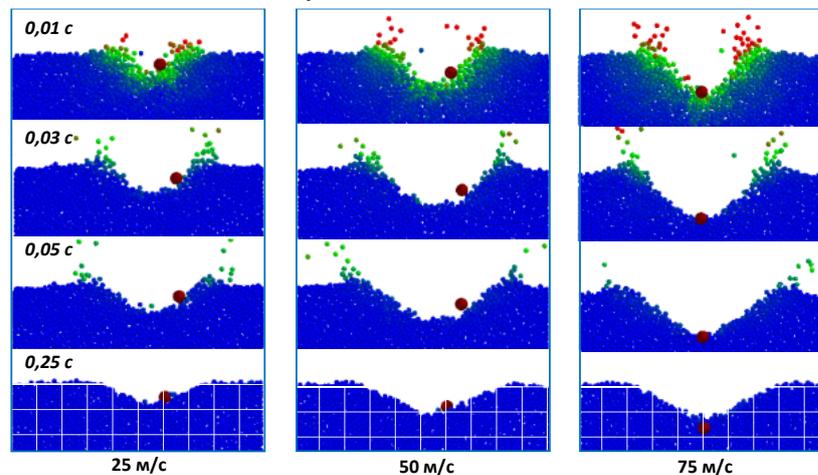


Рисунок 9. Процесс внедрения семени в несвязную почву

Figure 9. The process of introducing a seed into loose soil

Источник: результаты моделирования авторов | Source: authors' own modeling results

На рисунке 10 показаны цветные эпюры, демонстрирующие процесс внедрения дражированного семени в среднесвязную почву.

При скорости 25 м/с происходит выброс семени из воронки за пределы зоны моделирования

во всех экспериментах. При скорости 50 м/с вероятность выброса семени снижается до 10%, при 75 м/с выброс не наблюдается. Глубина воронки при скоростях 50 и 75 м/с несколько больше, чем глубина проникновения семени.

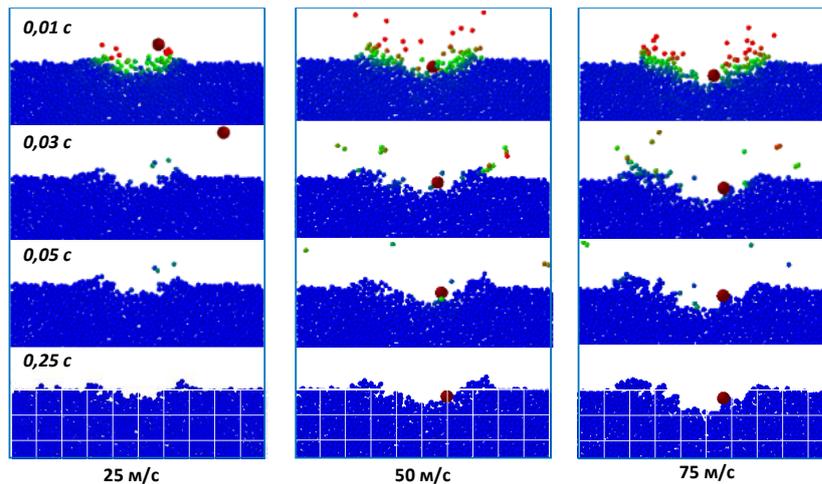


Рисунок 10. Процесс внедрения семени в среднесвязную почву
 Figure 10. The process of introducing a seed into medium-cohesive soil

Источник: результаты моделирования авторов | Source: authors' own modeling results

На рисунке 11 показаны цветные эпюры, демонстрирующие процесс внедрения дражированного семени в связную почву. При скорости 25 м/с происходит выброс семени из воронки за пределы зоны моделирования во всех

экспериментах. При скорости 50 м/с вероятность выброса семени снижается до 30% и при 75 м/с до 10%. Глубина воронки при скоростях 50 и 75 м/с также больше, чем глубина проникновения семени.

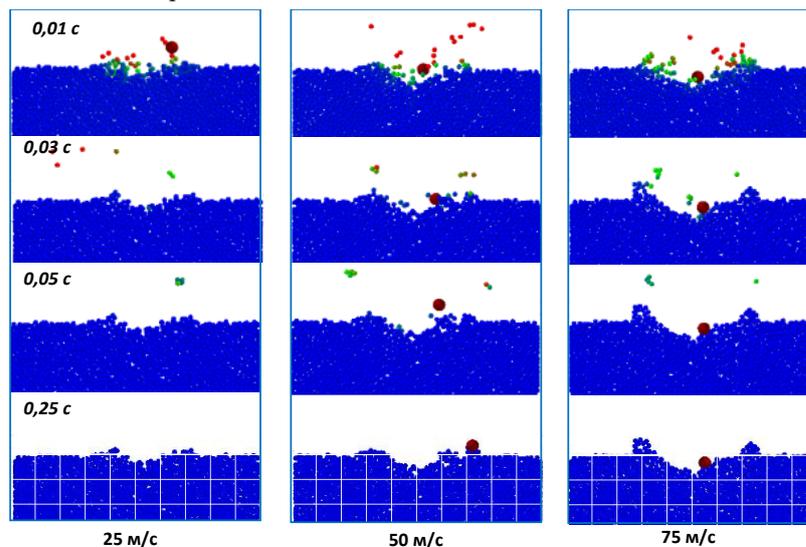


Рисунок 11. Процесс внедрения семени в связную почву
 Figure 11. The process of introducing a seed into cohesive soil

Источник: результаты моделирования авторов | Source: authors' own modeling results

На рисунок 12 приводятся сводные данные о средних глубинах воронок и средних глубинах проникновения на разных типах почв.

Можно сделать предварительные выводы, основанные на тенденциях, выявленных в моделировании. На несвязанных почвах достаточно скорости дражированного семени в 25 м/с для

исключения выброса семени из образовавшейся воронки и 75 м/с для 100% проникновения в поверхностный слой. На среднесвязных и связных почвах для обеспечения менее 30% выбросов семени за пределы воронки необходима скорость не менее 50 м/с. Коэффициент вариации (CV) не превышал 11,2% при числе повторов каждого опыта n=10.

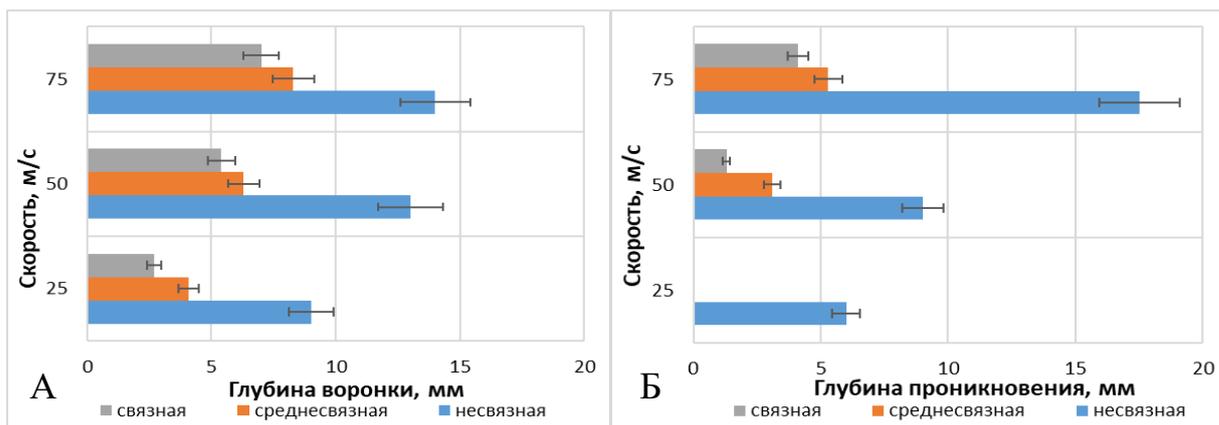


Рисунок 12. Средние глубины на разных типах почв:

А – проникновения дражированных семян; Б – образовавшихся воронок

Figure 12. Average depths in different soil types:

A – penetration of pelleted seeds; B – formed craters

Источник: данные моделирования авторов | Source: authors' own modeling data

Для проверки данных моделирования выполнен лабораторный эксперимент. На рисунке 13 показаны фотографии процесса ударного взаимодействия, полученные с применением скоростной камеры и даны аналогичные стадии процесса, полученные при моделировании.

Для достижения коэффициента вариации (CV) равного 10,4 % потребовалось повторов каждого опыта n=14.

На рисунке 14, а представлено сравнение данных, полученных при имитационном моделировании и в лабораторном эксперименте. Анализ данных показал заметные различия. Данные моделирования показали, что средние значения на несвязных почвах при скорости дражированного семени 75 м/с составили: глубины проникновения семян 17,5 мм, глубины воронок 14 мм. В то же время в данные, полученные в лабораторных исследованиях на песчаных почвах, взятых непосредственно с участка лесовосстановления при аналогичной скорости в 75 м/с, составили: глубины проникновения семян 24,6 мм, глубины воронок 19,3 мм. При этом средний диаметр образуемых воронок в верхней части напротив был больше для

данных моделирования и составил 53,5 мм, а для экспериментальных данных 19,3 мм.

Столь заметные различия вероятно связаны со значительно меньшими размерами песчаных частиц в почве, использованной в лабораторном эксперименте и с их более высокой влажностью.

Также была выполнена проверка стабильности работы высевального аппарата (рисунок 14, б), характеризующая количество пропусков семян.

Полученные экспериментальные данные показывают, что при увеличении скорости вращения барабана высевального аппарата снижается стабильность захвата семян что аналогично данным, полученным при моделировании. При этом экспериментальные данные отличаются меньшим процентом захваченных семян в сравнении с данными моделирования. Так, например, при скорости 180 градусов/с высевается 93,3% семян что на 3% меньше, чем при моделировании.

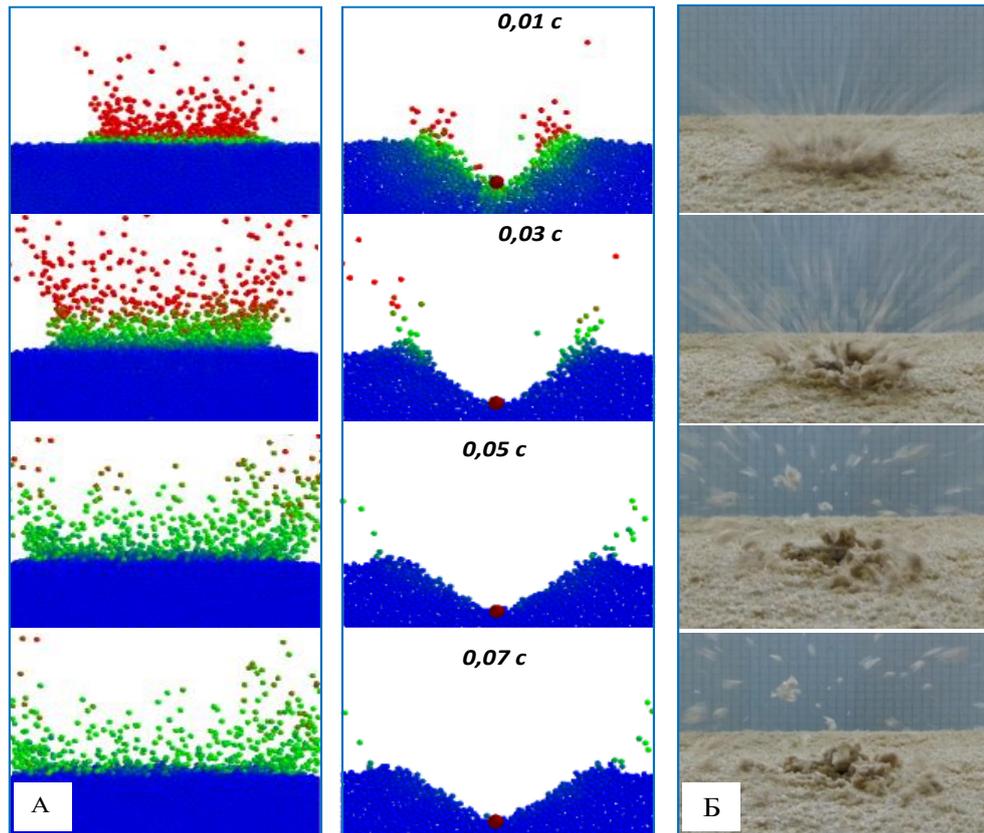


Рисунок 13. Процесс внедрения семени в слабосвязную почву:

А – моделирование; Б – эксперимент

Figure 13. The process of seed placement in weakly cohesive soil:

А – simulation; Б – experiment

Источник: результаты моделирования авторов | Source: authors' own modeling results

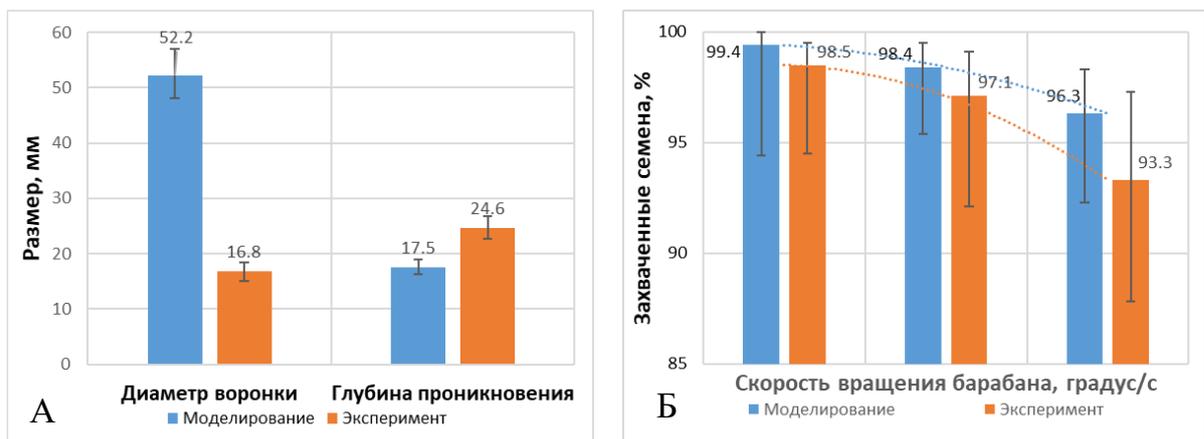


Рисунок 14. Сравнение данных моделирования и лабораторного эксперимента:

А – диаметр воронки и глубина проникновения; Б – стабильность захвата

Figure 14. Comparison of simulation and laboratory experiment data:

А – funnel diameter and penetration depth; Б – grip stability

Источник: данные моделирования авторов | Source: authors' own modeling data

Выводы

1. Масса высевающего аппарата, полученная по 3D-модели, составила 1140 г, а полученная при взвешивании экспериментального образца 1074 г. Незначительное снижение объясняется возможностью облегчения деталей за счет создания внутренних полостей при изготовлении с применением 3D-печати.

2. Моделирование показало, что проникновение дражированного семени наблюдается только на несвязных почвах при скоростях 75 м/с. При этом семя охватывается почвенными частицами с боковых сторон и сверху. Однако для исключения выброса семени из образовавшейся воронки уже достаточно скорости дражированного семени в 25 м/с. В случае среднесвязных и связных почв может наблюдаться только незначительный боковой охват семени почвенными частицами или нахождение на поверхности в пределах образованного углубления. При этом глубина воронки больше, чем глубина проникновения так как дражированное семя располагается не на дне воронки. Для обеспечения менее 30% выбросов семени за пределы воронки необходима скорость не менее 50 м/с.

3. Экспериментальная проверка, проводимая на несвязных почвах со скоростью движения дражированного семени 75 м/с выявила ряд расхождений с данными моделирования. Глубина проникновения при моделировании составила 17,5 мм, а в лабораторном эксперименте 24,6 мм. При этом средний диаметр образуемых воронок в верхней части напротив был больше для данных моделирования и составил 53,5 мм, а для экспериментальных данных 19,3 мм. Столь

заметные различия вероятно связаны со значительно меньшими размерами песчаных частиц в сравнении с имитирующими их дискретными элементами и их более высокой влажностью. Таким образом, разработанная DEM-модель требует дополнительной калибровки на реальных почвах с учетом их гранулометрического состава и влажности для повышения прогнозной точности.

4. Проверка стабильности работы высевающего аппарата показала, что как в лабораторном эксперименте, так и при моделировании с увеличением скорости вращения барабана высевающего аппарата снижается стабильность захвата семян. Экспериментально подтверждена адекватность модели работы высевающего барабана, однако модель склонна давать завышенные на 3-5% значения стабильности захвата, что необходимо учитывать при проектировании.

5. Дальнейшим развитием данного исследования будет изучение прочностных характеристик, существующих дражированных семян и на основе полученных данных введение в виртуальный эксперимент разрушаемых дражированных семян различных диаметров. Это даст возможность исследовать величины допустимых скоростей разгона дражированного семени не вызывающие разрушения его оболочки, повысит точность модели и позволит определить эксплуатационные ограничения высевающего аппарата. Также для уменьшения расхождений в дальнейшем необходимо модифицировать модель с учетом влияния влажности, гранулометрического состава и объемной плотности естественных почв.

Список литературы

1. Mohan M. et al. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. *Remote Sens.* 2021, 13: 1-30. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13132596>.
2. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2020 № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений»: зарегистрировано в Мин-ве юстиции РФ от 18.12.2020 г., № 61556.
3. 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; 19: 1-47. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6163.
4. Lysych M.N., Chernyshev V.V., Nagaytsev V.M. Design and Simulation of Seed Metering Device for Aerosowing of Forest Pelleted Seeds. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021; 2032: 1-7. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012062>.
5. Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs. *Inventions.* 2021; 83: 1-26. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions6040083>.
6. Hou M., Peng Z., Liu R., Liu K., Li J., Li H. Projectile Impact and Penetration in Loose Granular Bed. *Science and Technology of Advanced Materials.* 2005; 6(7): 855-859. – DOI: 10.1088/1468-6996/6/7A08.
7. Ye X., Van Der Meer D. Hydrogel Sphere Impact Cratering, Spreading and Bouncing on Granular Media. *Granular Matter.* 2021; 23(4): 80. – DOI: 10.1007/s10035-021-01139-w.
8. Zhang X., Li J., Wang Y., Chen H., Liu R., Zhao T. Dynamic Characteristics of Sphere Impact into Wet Granular Materials Considering Suction. *Powder Technology.* 2023; 415: 118147. – DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118147.
9. Zhang X., Wang C., Li H., Yang J., Zhou W., Liu Y. The Force and Dynamic Response of Low-Velocity Projectile Impact into 3D Dense Wet Granular Media. *Physical Review E.* 2024; 109(2): 024901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.109.024901.
10. Zhang X., Li J., Wang Y., Chen X., Liu M. Resistance Force Scaling and the Solution for Penetration Depth of Impacting Wet Granular Materials. *Journal of Fluid Mechanics.* 2025; 987: 45. – DOI: 10.1007/s40571-024-00867-z.
11. Carvalho D.D., Bertho Y., Franklin E. Penetration of a Spinning Sphere impacting a Granular Medium. *Physical Review E.* 2024; 110(1): 014902. – DOI: 10.1103/PhysRevE.110.014902.
12. Ye X., Zhao T., Wang H., Liu K., Zhang R., Chen L. Projectile Oblique impact on Granular Media: Penetration Depth and Dynamic Process. *Powder Technology.* 2021; 378: 144-152. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.065.
13. Shen W., Zhang J., Liu K., Wang X., Li M., Yang H. Influence of Inter-Particle Friction and Damping on the Dynamics of Spherical Projectile Impacting Onto a Soil Bed. *Journal of Terramechanics.* 2022; 101: 35-45. – DOI: 10.1016/j.jterra.2022.03.002.
14. Liang S., Xu Y., Wang J. On Energy Transfer and Dissipation of Intruder Impacting Granular Materials based on Discrete Element Simulations. *Granular Matter.* 2022; 24(3): 88. – DOI: 10.1007/s10035-022-01254-2.
15. Zhang X., Wang Y., Li J., Chen H., Liu R., Zhao T. The Effect of Particle Shape on The Dynamics of Spherical Projectile Impacting into Granular Media. *Physical Review E.* 2024; 110(3): 034901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.110.034901.
16. Lin J., Zhao T., Jiang M. Investigating Projectile Penetration into Immersed Granular Beds Via CFD-DEM Coupling. *Powder Technology.* 2023; 415: 118151. – DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118151.
17. Wada K., Senshu H., Matsui T. Numerical Simulation of Impact Cratering on Granular Material. *Icarus.* 2006; 180(2): 528-545. – DOI: 10.1016/j.icarus.2005.10.029.
18. Ghazi Alshanti W. Discrete Element Modeling of a Projectile Impacting and Penetrating into Granular Systems. *Ballistics.* 2019; 1: 345-356. – DOI: 10.5772/intechopen.75550.

19. Sunday C., Umbanhowar P.B., Goldman D.I. The Influence of Gravity on Granular Impacts: I. A DEM Code Performance Comparison. *Powder Technology*. 2021; 377: 910-919. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.043.
20. Sunday C., Umbanhowar P.B., Goldman D.I. The Influence of Gravity on Granular Impacts: II. A Gravity-Scaled Collision Model for Slow Interactions. *Physical Review E*. 2022; 105(4): 044901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.105.044901.
21. Ye X., Zhang C. Impact Granular Media for Intruders with Different Geometries: Force and Rheology. *Journal of Fluid Mechanics*. 2023; 958: A34. – DOI: 10.1017/jfm.2023.98.
22. Wang F., Zhang H., Li X., Chen J., Liu Y., Yang K. A Drag Force Model of Vertical Penetration into a Granular Medium Based on DEM Simulations and Experiments. *Acta Mechanica Sinica*. 2024; 40(1): 123156. – DOI: 10.1007/s10409-023-23156-x.
23. Alshanti W.G., Wu Y. Numerical Simulation of Vertical Penetration into Granular Beds. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5(1): 182-188.
24. Бухтояров Л. Д., Лысыч М. Н., Малоков С. В. Моделирование взаимодействия почвы с комбинированным орудием – ножевой каток и пара дисковых плугов. *Лесотехнический журнал*. 2025; 3 (59): 186-200. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12.

References

1. Mohan M. et al. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. *Remote Sens*. 2021, 13: 1-30. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13132596>.
2. Prikaz Ministerstva prirodny'x resursov i e'kologii Rossijskoj Federacii ot 04.12.2020 № 1014 «Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya. sostava proekta lesovosstanovleniya. poryadka razrabotki proekta lesovosstanovleniya i vneseniya v nego izmenenij»: zaregistrirvano v Min-ve yusticii RF ot 18.12.2020 g., № 61556. [Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation 04.12.2020 No. 1014 "On approval of the Rules for reforestation, the composition of the reforestation project, the procedure for developing a reforestation project and amending it": registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation 18.12.2020, No. 61556]. (In Russ.).
3. Kalyashov V. A., Do T.A., Xitrov E. G., Grigoreva O. I., Gurev A.Yu., Novgorodov D.V. Sovremennye sistemy mashin i texnologii zagotovki drevesiny i lesovosstanovleniya v usloviyax gornyx lesesek. [Modern machine systems and technologies for timber harvesting and reforestation in mountain logging areas]. *Resources and Technology*. 2022 19: 1-47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6163>.
4. Lysych M.N., Chernyshev V.V., Nagaytsev V.M. *Design and Simulation of Seed Metering Device for Aerosowing of Forest Pelleted Seeds*. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021; 2032: 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012062>.
5. Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Druchinin D.Y. *Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs*. *Inventions*. 2021; 83: 1-26. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions6040083>.
6. Hou M., Peng Z., Liu R., Liu K., Li J., Li H. *Projectile Impact and Penetration in Loose Granular Bed*. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2005; 6(7): 855-859. – DOI: 10.1088/1468-6996/6/7A08.
7. Ye X., Van Der Meer D. *Hydrogel Sphere Impact Cratering, Spreading and Bouncing on Granular Media*. *Granular Matter*. 2021; 23(4): 80. – DOI: 10.1007/s10035-021-01139-w.
8. Zhang X., Li J., Wang Y., Chen H., Liu R., Zhao T. *Dynamic Characteristics of Sphere Impact into Wet Granular Materials Considering Suction*. *Powder Technology*. 2023; 415: 118147. – DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118147.
9. Zhang X., Wang C., Li H., Yang J., Zhou W., Liu Y. *The Force and Dynamic Response of Low-Velocity Projectile Impact into 3d Dense Wet Granular Media*. *Physical Review E*. 2024; 109(2): 024901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.109.024901.
10. Zhang X., Li J., Wang Y., Chen X., Liu M. *Resistance Force Scaling and the Solution for Penetration Depth of Impacting Wet Granular Materials*. *Journal of Fluid Mechanics*. 2025; 987: 45. – DOI: 10.1007/s40571-024-00867-z.

11. Carvalho D.D., Bertho Y., Franklin E. *Penetration of a Spinning Sphere Impacting a Granular Medium*. *Physical Review E*. 2024; 110(1): 014902. – DOI: 10.1103/PhysRevE.110.014902.
12. Ye X., Zhao T., Wang H., Liu K., Zhang R., Chen L. *Projectile Oblique Impact on Granular Media: Penetration Depth and Dynamic Process*. *Powder Technology*. 2021; 378: 144-152. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.065.
13. Shen W., Zhang J., Liu K., Wang X., Li M., Yang H. *Influence of Inter-Particle Friction and Damping on the Dynamics of Spherical Projectile Impacting Onto a Soil Bed*. *Journal of Terramechanics*. 2022; 101: 35-45. – DOI: 10.1016/j.jterra.2022.03.002.
14. Liang S., Xu Y., Wang J. *On Energy Transfer and Dissipation of Intruder Impacting Granular Materials based on Discrete Element Simulations*. *Granular Matter*. 2022; 24(3): 88. – DOI: 10.1007/s10035-022-01254-2.
15. Zhang X., Wang Y., Li J., Chen H., Liu R., Zhao T. *The effect of particle shape on the dynamics of spherical projectile impacting into granular media*. *Physical Review E*. 2024; 110(3): 034901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.110.034901.
16. Lin J., Zhao T., Jiang M. *Investigating Projectile Penetration into Immersed Granular Beds Via CFD-DEM Coupling*. *Powder Technology*. 2023; 415: 118151. – DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118151.
17. Wada K., Senshu H., Matsui T. *Numerical Simulation of Impact Cratering on Granular Material*. *Icarus*. 2006; 180(2): 528-545. – DOI: 10.1016/j.icarus.2005.10.029.
18. Ghazi Alshanti W. *Discrete Element Modeling of a Projectile Impacting and Penetrating into Granular Systems*. *Ballistics*. 2019; 1: 345-356. – DOI: 10.5772/intechopen.75550.
19. Sunday C., Umbanhowar P.B., Goldman D.I. *The Influence of Gravity on Granular Impacts: I. A DEM Code Performance Comparison*. *Powder Technology*. 2021; 377: 910-919. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.043.
20. Sunday C., Umbanhowar P.B., Goldman D.I. *The Influence of Gravity on Granular Impacts: II. A Gravity-Scaled Collision Model for Slow Interactions*. *Physical Review E*. 2022; 105(4): 044901. – DOI: 10.1103/PhysRevE.105.044901.
21. Ye X., Zhang C. *Impact Granular Media for Intruders with Different Geometries: Force and Rheology*. *Journal of Fluid Mechanics*. 2023; 958: A34. – DOI: 10.1017/jfm.2023.98.
22. Wang F., Zhang H., Li X., Chen J., Liu Y., Yang K. *A Drag Force Model of Vertical Penetration into a Granular Medium Based on DEM Simulations and Experiments*. *Acta Mechanica Sinica*. 2024; 40(1): 123156. – DOI: 10.1007/s10409-023-23156-x.
23. Alshanti W.G., Wu Y. *Numerical Simulation of Vertical Penetration into Granular Beds*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5(1): 182-188.
24. Bukhtoyarov L.D., Lysych M.N., Malyukov S.V. *Modelirovaniye vzaimodeystviya pochvy s kombinirovannym orudiyem – nozhevoy katok i para diskovykh plugov*. [Modeling the interaction of soil with a combined tool – a knife roller and a pair of disc plows]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2025; 3: 197-199. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.3/12.

Сведения об авторах

✉ *Лысыч Михаил Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru.

Бухтояров Леонид Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Гнусов Максим Александрович – доктор технических наук, зав. кафедрой Безопасности жизнедеятельности и правовых отношений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: mgnusov@ya.ru.

Дручинин Денис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

Мартыновский Евгений Викторович – инженер инжинирингового центра, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0434-575X>, e-mail: profootballjack@gmail.com.

Брындина Лариса Васильевна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: bryndinv@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Mikhail N. Lysych* – Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru.

Leonid D. Bukhtoyarov – Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vgltax-mlx@yandex.ru.

Maksim A. Gnuosov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Life Safety and Legal Relations, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: mgnusov@ya.ru. Mikhail N.

Denis Yu. Druchinin – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

Evgeniy V. Martynovsky – Engineer of the Engineering Center, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0434-575X>, e-mail: profootballjack@gmail.com.

Larisa V. Bryndina – Dr. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: bryndinv@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author