

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСАДОЧНОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ СЕЯНЦЕВ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ В СРЕДЕ САПР С ПОЛНОРАЗМЕРНЫМ МАКЕТИРОВАНИЕМ СРЕДСТВАМИ 3D-ПЕЧАТИ

М.Н. Лысыч¹✉, С.В. Малюков¹, М.В. Шавков², М.А. Гнусов¹

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

²ООО «Русгидроком (РГК)», Россия, 394040, г. Воронеж, ул. Мазлумова, д. 25

miklynea@yandex.ru

Приведено обоснование необходимости разработки и применения посадочных машин для саженцев с закрытой корневой системой. Проанализированы существующие методы моделирования кинематики и динамики посадочных аппаратов с использованием CAD- и CAE-систем, а также методы моделирования процессов взаимодействия рабочих органов посадочных машин с почвенной средой. Изложено описание общей концепции разрабатываемой посадочной машины для саженцев с закрытой корневой системы. Разработана имитационная модель посадочного механизма в программном комплексе CAD SolidWorks и CAE SolidWorks Motion. Исследован рабочий процесс посадочного механизма на виртуальном стенде, реализованном в этой же программной среде. Получена группа параметров, необходимых для оценки работоспособности посадочного механизма, в частности: моменты сил виртуальных двигателей привода посадочного аппарата и зарядного устройства; силы, возникающие на виртуальных пружинах посадочного конуса и стакана зарядного барабана; сила контакта кулачка с роликом; величина раскрытия посадочных конусов. Выполнено моделирование процесса взаимодействия посадочных конусов с почвенной средой методом дискретных элементов. Разработан полноразмерный макетный образец с использованием 3D-печати, позволивший подтвердить полученные в результате моделирования силовые характеристики по такому ключевому параметру, как крутящий момент, требующийся для привода посадочного аппарата и зарядного устройства. Подтверждена правильность выбранных в процессе проектирования кинематических параметров механизма.

Ключевые слова: посадочный аппарат, закрытая корневая система, имитационное моделирование, 3D CAD, MBD, DEM, 3D-печать

Ссылка для цитирования: 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 // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 144–161. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-144-161

В настоящее время в мире наблюдается устойчивая тенденция увеличения количества площадей лесовосстановления с применением сеянцев и саженцев с закрытой корневой системой (ЗКС), коснувшаяся и России. Однако несмотря на очевидные преимущества ЗКС, значительный спектр почвенно-климатических условий вызывает некоторые опасения эффективности широкого внедрения этой технологии. Количество питомников, способных выращивать посадочный материал в требуемых объемах и фактически при полном отсутствии средств механизации для посадки сеянцев и саженцев с ЗКС, пока недостаточно. Согласно правилам лесовосстановления в РФ к 2025 г. не

менее 30 % площадей искусственного и комбинированного лесовосстановления следует обеспечить посадкой сеянцев и саженцев с ЗКС, для чего ведется развитие соответствующей сети питомников [1–3].

В связи с этим актуальность приобрела разработка посадочных машин, способных обеспечить столь значительные объемы лесовосстановления. Рассмотрим конструкции посадочных машин с рабочими органами в виде раскрывающихся в почве конусов, получившие наибольшее распространение для посадки лесных и сельскохозяйственных растений с ЗКС. Исследованию подобных конструкций посвящено достаточно много работ зарубежных авторов [4–16]. В России это направление исследований пока не получило широкого развития [17].

Предлагаем оригинальную концепцию посадочной машины для сеянцев и саженцев с ЗКС, отличающуюся работоспособностью и стабильным процессом рядной посадки.

Цель работы

Цель работы — определение кинематических и динамических характеристик посадочного механизма для саженцев с ЗКС методами имитационного моделирования и полноразмерного макетирования с использованием 3D-печати.

Материалы и методы

Методы моделирования кинематики и динамики посадочных аппаратов с использованием CAD- и CAE-систем (CAD — Computer-Aided Design — автоматизированная система проектирования; CAE — Computer-Aided Engineering — система обеспечения инженерных расчетов).

При проектировании многозвенных посадочных механизмов сложность вызывает их кинематическая составляющая. Для моделирования динамики многотельных систем (MBD — Multibody Dynamics — динамика многотельных систем) требуется применение 3D CAD-систем и CAE-программ. Этот подход в области разработки и испытания различных посадочных машин широко используется за рубежом.

В исследовании, посвященном оптимизации параметров многозвенного посадочного механизма полуавтоматической рассадочной машины, было использовано специализированное MBD-приложение RecurDyn V8R5. Обладая расширенным функционалом, оно требует экспорта модели из 3D CAD через промежуточные форматы [18–20].

Достаточно много аналогичных исследований по обоснованию параметров посадочных механизмов выполнено с использованием MBD-приложения ADAMS, где также требуется экспорт модели из сторонних 3D CAD [21–24].

При исследовании кинематики конусного посадочного аппарата была использована связка 3D CAD SolidWorks и CAE SolidWorks Motion (рис. 1) [25–27]. Этот подход оказался одним из наиболее эффективных, поскольку дал возможность создать динамическую имитационную модель механизма, используя непосредственно геометрию и сопряжения из CAD-модели и исключая необходимость экспорта геометрии в промежуточные форматы с разрушением обратной связи CAE — CAD.

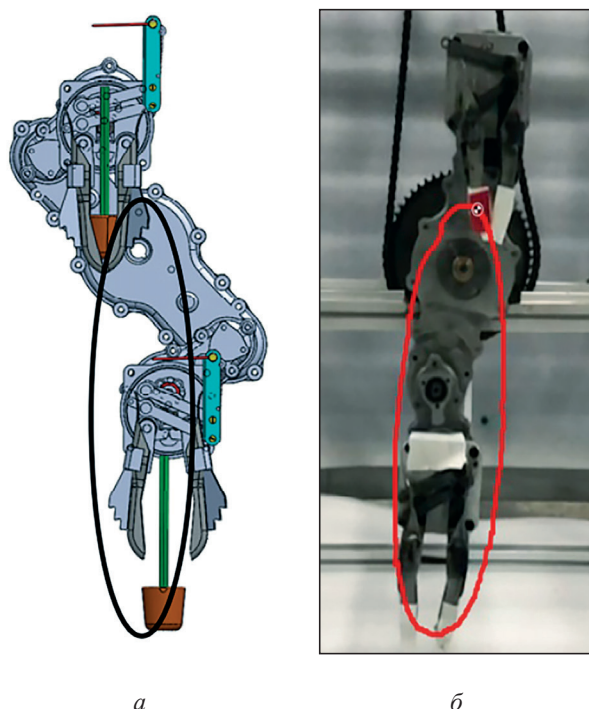


Рис. 1. Исследование кинематики посадочного механизма в программных комплексах 3D CAD SolidWorks, CAE SolidWorks Motion (а) и лабораторные исследования экспериментального образца (б) [26]

Fig. 1. Study of the kinematics of the planter mechanism in 3D CAD SolidWorks and CAE SolidWorks Motion (a) and laboratory studies of the experimental sample (b) [26]

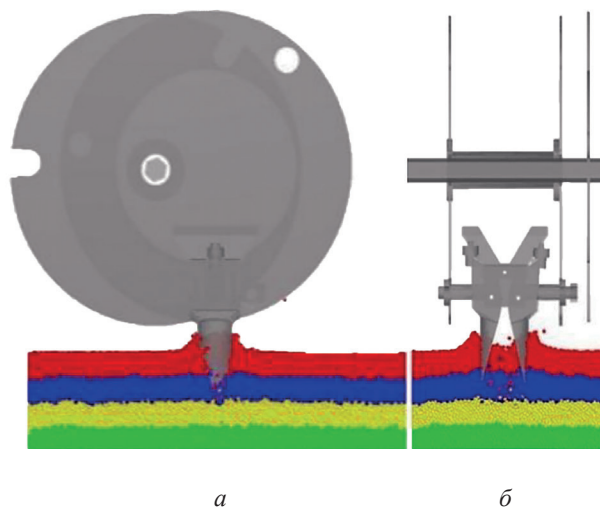


Рис. 2. Моделирование процессов лункообразования посадочным механизмом [28]: а — раскрытие конуса в продольной плоскости; б — раскрытие конуса в поперечной плоскости

Fig. 2. Modeling of hole formation processes using a planting mechanism [28]: a — cone opening in the longitudinal plane; б — cone opening in the transverse plane

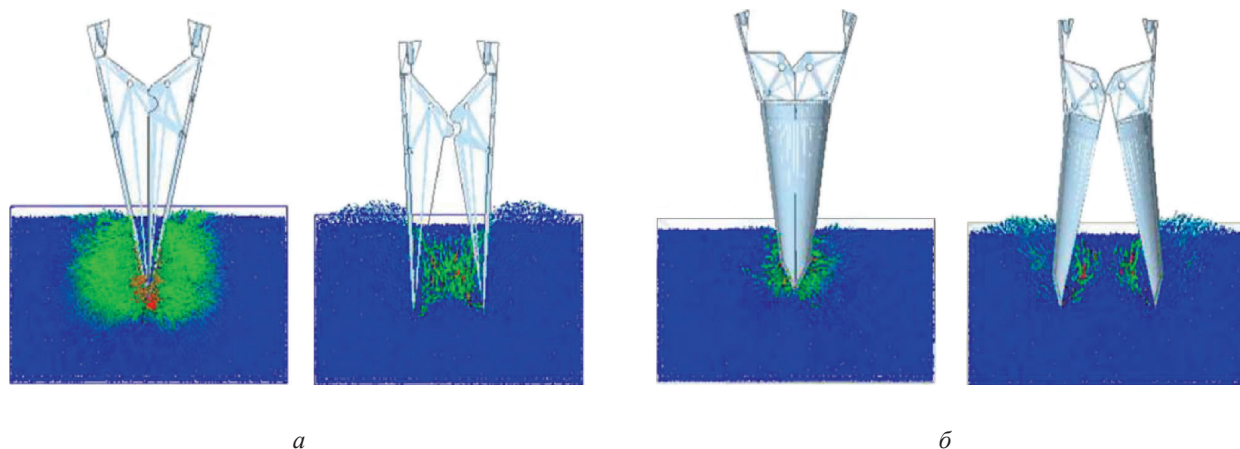


Рис. 3. Моделирование процессов внедрения посадочных конусов различных геометрических форм в почву [29]: *а* — четырехгранной; *б* — конической
Fig. 3. Modeling the processes of introducing planting cones of various geometric shapes into the soil [29]: *a* — tetrahedral; *b* — conical

Методы моделирования взаимодействия рабочих органов посадочных аппаратов с почвенной средой с использованием САД- и САЕ-систем. Для моделирования взаимодействия посадочных аппаратов и рабочих органов других машин, которые непосредственно взаимодействуют с почвенной средой наиболее часто в настоящее время используется метод дискретных элементов (DEM — Discrete Element Method — метод дискретных элементов) [28, 29].

В исследовании, представленном в работе [28] посвященном изучению процессов лункообразования рабочими органами посадочной машины, была рассмотрена имитационная модель взаимодействия посадочного конуса с почвенной средой, реализованная с использованием DEM-методов (рис. 2). Для этого применили 3D-модель, разработанную в САД-системе Pro E, которая экспортировалась через промежуточный формат в программу EDEM 2018. Почвенный пласт формировался из четырех различно окрашенных слоев дискретных частиц для мониторинга почвенных смещений. Описание взаимного контакта посадочного конуса с почвой выполнялось с использованием физической модели Герца — Миндлина (без скольжения). Выполненная авторами экспериментальная проверка подтвердила достаточно высокую достоверность данных, полученных с помощью моделирования.

В работе [29] представлены модели процессов внедрения посадочных конусов различных геометрических форм высокоскоростной посадочной машины в почву (рис. 3). Модели конусов создавались в специализированном комплексе 3D CAD Solidworks, которые затем

экспортировались через промежуточный формат в программу EDEM. В качестве физической модели применялась модель Герца — Миндлина с соединяющим контактом. В отличие от других исследований для задания движения посадочных конусов использовалось совместное моделирование с приложением MBD RecurDyn. Данный подход хотя и является более трудоемким и требует наличия сразу двух расчетных программ, все же позволяет корректнее описать сложное движение исследуемого объекта с учетом его кинематики.

Лабораторный эксперимент, выполненный в рамках представленного исследования, показал незначительное расхождение с данными моделирования.

Интерес вызывают исследования, реализуемые DEM-методами, посвященные моделированию поведения брикета почвенного субстрата саженца при его взаимодействии с элементами посадочного механизма [30, 31].

Полноразмерное макетирование с применением 3D-печати. Все шире применяется 3D-печать в различных отраслях, в том числе сельском и лесном хозяйстве. Ярким примером эффективного использования 3D-печати в сельском хозяйстве является деятельность лаборатории перспективных материалов одного из структурных подразделений Федерального научно-исследовательского института (ВИМ). Лаборатория профессионально занимается созданием полноразмерных и масштабных макетов, полнофункциональных изделий, предназначенных для проведения комплексных научно-исследовательских испытаний [32, 33].

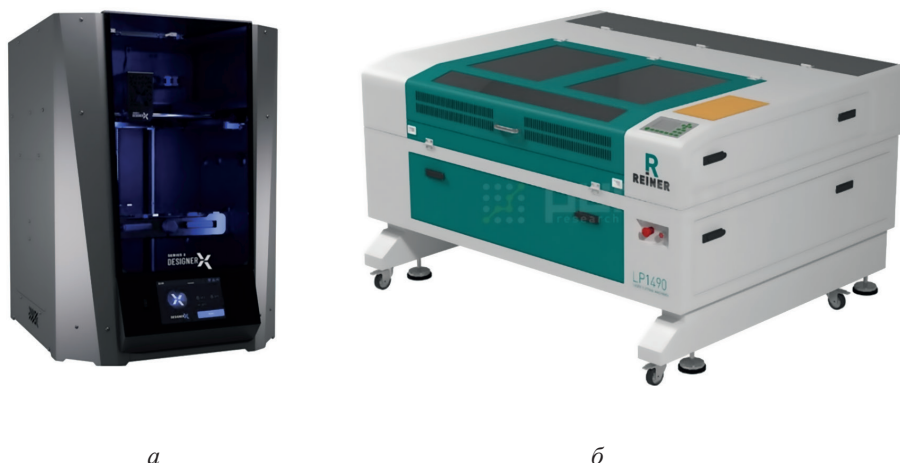


Рис. 4. Оборудование, используемое для изготовления полноразмерного макета: *а* — 3D-принтер Designer X Series 2; *б* — лазерный станок REINER LP1490-150W
Fig. 4. Equipment used to make a full-size mock-up: *a* — 3D-printer Designer X Series 2; *б* — laser machine REINER LP1490-150W

В области лесного хозяйства технологии 3D-печати пока ограниченно применяются, в частности при создании масштабных макетов почвообрабатывающих орудий [34] и полноразмерных образцов высевальных аппаратов [35].

Предлагаемая к рассмотрению конструкция посадочного аппарата имеет достаточно сложную кинематику и при этом размеры элементов, требующих использования 3D-печати, достаточно компактны и не превышают объем печати используемого принтера (200×200×200 мм). Это существенно облегчает процесс полноразмерного макетирования, исключая операции разбиения габаритных элементов на части с последующей их склейкой. Для изготовления габаритных деталей из листовых материалов эффективным признано применение станков для лазерной резки неметаллов (рис. 4).

Результаты и обсуждение

Общая концепция посадочной машины.

Перспективная машина для посадки семян и саженцев с ЗКС (рис. 5) состоит из рамы с навесным устройством 1, посадочной секции, включающей в себя кронштейн крепления 11 рамы посадочной секции 10, посадочного механизма 3, его кожухов 8, черенкового ножа с рыхлящими плоскорежущими крыльями 7, прикатывающей секции 6 с двумя пневматическими катками, опорных пневматических колес 9, цепной передачи 5, ящиков для посадочного материала 2 и кресла сажальщика 4.

Посадочный механизм (см. рис. 5) включает в себя посадочный аппарат (рис. 6), со-

стоящий из рамы посадочной секции 8, дисков 9, поводков 3, неподвижного посадочного конуса 10, подвижного посадочного конуса 11, пружинного механизма закрывания 2, ролика 1, кулачка 4, подшипниковых опор поводков 7, подшипниковых опор дисков 6 и приводных звездочек 5.

Кроме того, посадочный механизм (см. рис. 5) включает в себя зарядное устройство (рис. 7), состоящее из кронштейна зарядного устройства 7, зарядных стаканов 10 с крышками 9 и пружинами растяжения 1, направителя 8, сепаратора 2, кожуха 3, опорной пластины 4, углового редуктора 5 и приводной звездочки 6.

Виртуальные исследования посадочного механизма. Виртуальный стенд для исследования кинематических и динамических параметров посадочного аппарата представлен на рис. 8. Модель секции, используемая для виртуального эксперимента, была упрощена и стала включать в себя следующие основные элементы: раму 11, диски 8, поводки 10, неподвижный конус с кронштейном крепления 4, подвижный конус 3, ролик-размыкатель 1, кулачок 2, зарядный стакан с приводным механизмом 5, подпружиненную крышку 6, опорную пластину 7, саженец 9 и условную почву 12.

Для упрощения процедуры расчета модели и снижения вероятности возникновения ошибок были введены следующие упрощения: установлен только один посадочный конус в сборе, один кулачок, один зарядный стакан; из модели исключены все объекты, не воздействующие на кинематику, например крепежные элементы, подшипники и др. (табл. 1).

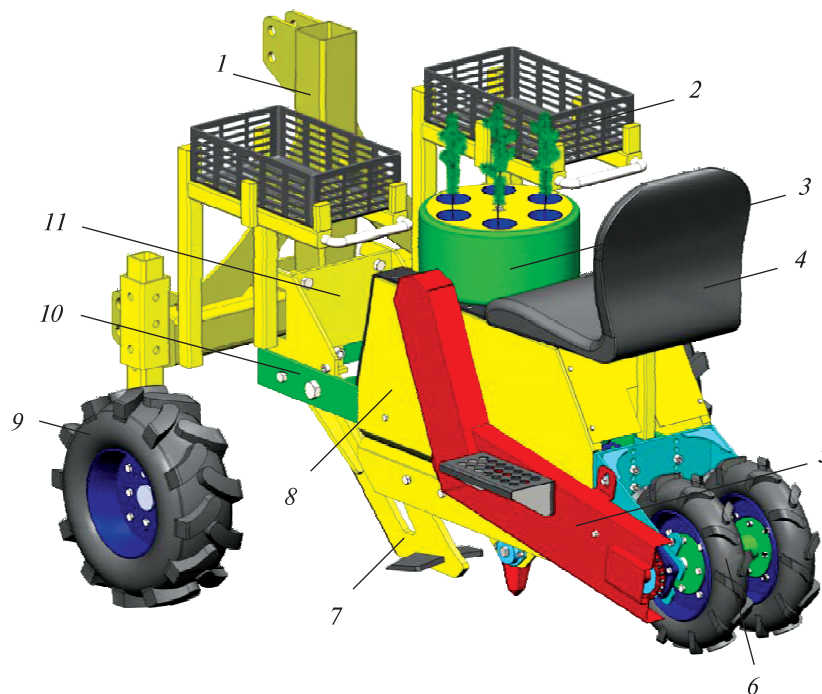


Рис. 5. Общий вид машины для посадки семян и саженцев с закрытой корневой системой
Fig. 5. General view of the machine for planting seedlings with a closed root system

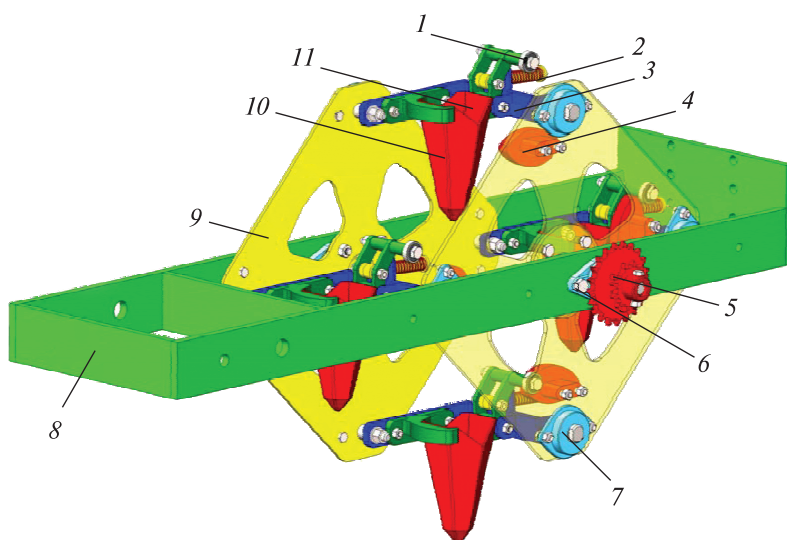


Рис. 6. Посадочный аппарат
Fig. 6. Planter gear

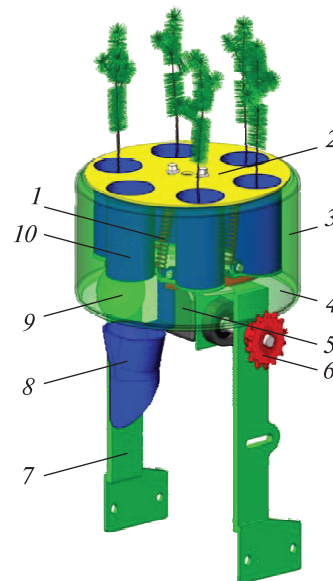


Рис. 7. Зарядное устройство
Fig. 7. Feeding device

Условно разобьем полный цикл движения посадочного аппарата на пять стадий (рис. 9):

1 — 0...0,7 с: свободное опускание конуса (рис. 9, а);

2 — 0,7...1,2 с: падение саженца в посадочный конус (рис. 9, б);

3 — 1,2...3 с: свободное опускание саженца в конус (рис. 9, в);

4 — 3...5,2 с: раскрытие посадочного конуса (рис. 9, г);

5 — 5,2...6 с: свободный подъем конуса (рис. 9, д).

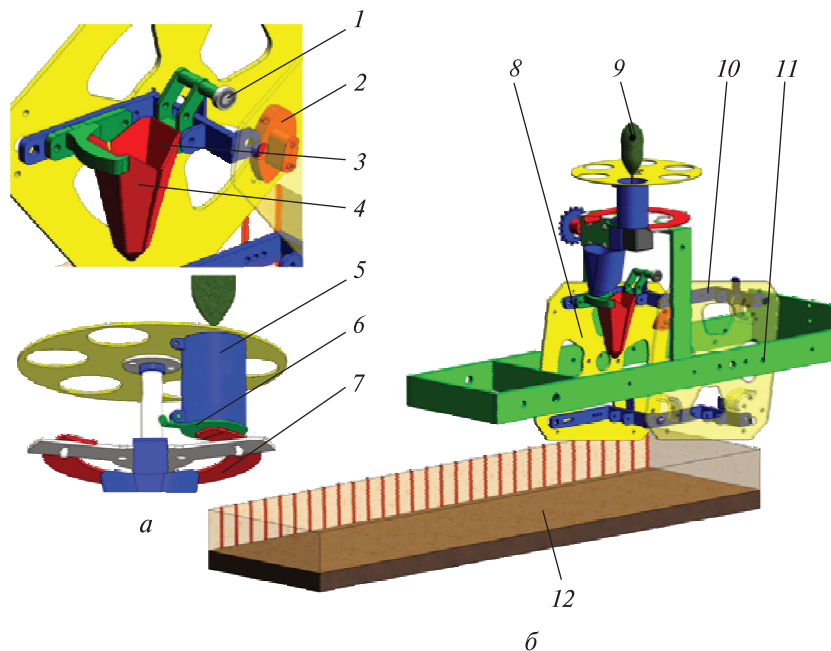


Рис. 8. Виртуальный стенд для исследования кинематических и динамических параметров посадочного механизма: *а* — рабочие органы; *б* — общий вид
Fig. 8. Virtual stand for studying the kinematic and dynamic parameters of the planter mechanism: *a* — working bodies; *b* — general view

Т а б л и ц а 1

Исходные параметры моделирования
Initial simulation parameters

Параметр	Единица измерения	Значение
<i>Общие</i>		
Поступательная скорость движения посадочного механизма	м/с	0,23
Угловая скорость движения посадочного устройства,	об./мин	10
Угловая скорость движения зарядного барабана	об./мин	7,5
Параметры 3D-контакта	–	Сталь–сталь
<i>Параметры сеянца с закрытой корневой системой</i>		
Масса сеянца	кг	0,11
Высота сеянца	мм	280
Максимальный диаметр сеянца	мм	60
<i>Параметры посадочного аппарата</i>		
Количество посадочных конусов	шт.	1
Масса подвижных частей	кг	25,66
Жесткость пружины	Н/м	500
Усилие предварительного натяжения	Н/м	14, 0
Коэффициент демпфирования	Н/(м/с)	200
<i>Параметры зарядного устройства</i>		
Количество зарядных стаканов	шт.	1
Масса подвижных частей	кг	1,66
Жесткость пружины стакана зарядного барабана	Н/м	180
Усилие предварительного натяжения пружины	Н	0,50
Коэффициент демпфирования	Н/(м/с)	90

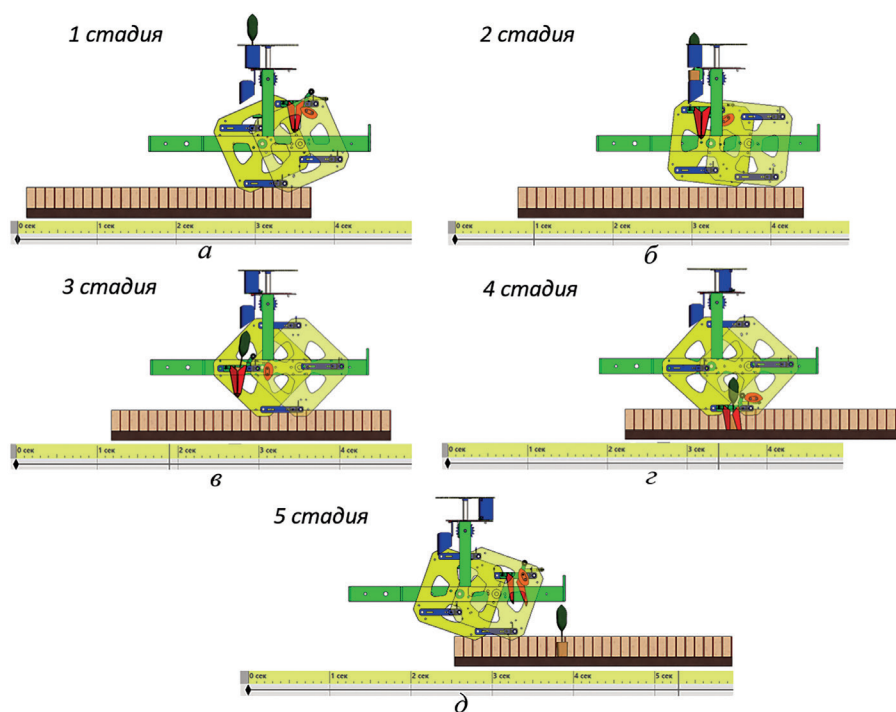


Рис. 9. Рабочие стадии посадочного механизма: *a* — свободное опускание конуса; *б* — падение саженца в конус; *в* — свободное опускание саженца в конусе; *г* — раскрытие конуса; *д* — свободный подъем конуса

Fig. 9. Working stages of the planter mechanism: *a* — free lowering of the cone; *б* — seedling falling into a cone; *в* — free lowering of the seedling in the cone; *г* — cone opening; *д* — free rise of the cone

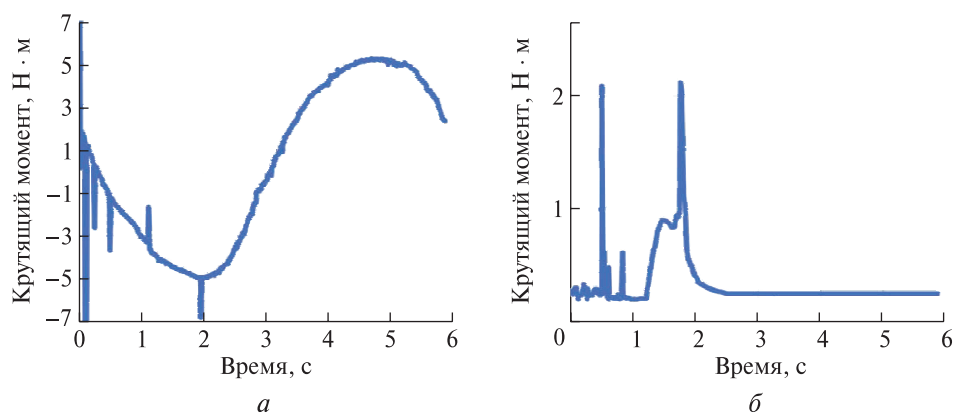


Рис. 10. Крутящие моменты сил виртуальных двигателей привода: *a* — посадочного аппарата; *б* — зарядного устройства

Fig. 10. Torques on the virtual motors of the drive: *a* — planter device; *б* — feeding device

На стадиях 3 и 4 в интервале 2,2...4,5 с происходит процесс взаимодействия посадочного конуса с грунтом, однако в настоящем исследовании этот процесс не моделировался.

Методом моделирования был получен комплекс параметров, необходимых для оценки работоспособности посадочного механизма. На рис. 10 представлены крутящие моменты сил виртуальных двигателей, необходимые для

привода посадочного аппарата (*a*) и зарядного устройства (*б*).

Из рис. 10, *a*, видно, что максимальный крутящий момент на посадочном аппарате возникает практически при максимальном раскрытии посадочного конуса (4,8 с), т. е. непосредственно перед началом процесса его закрывания. Максимальное значение крутящего момента составляет 5,2 Н·м.

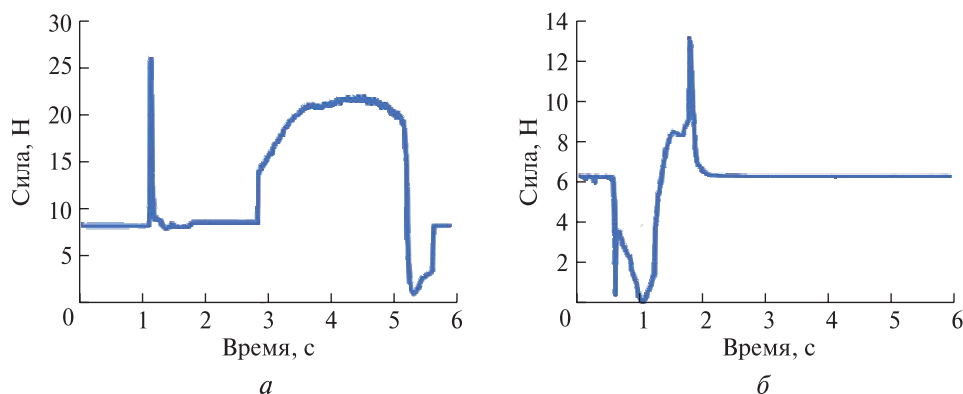


Рис. 11. Силы на пружинах посадочного конуса (*а*) и стакана зарядного барабана (*б*)
Fig. 11. Forces on springs of the planter cone (*a*) and cell of the feeding device (*b*)

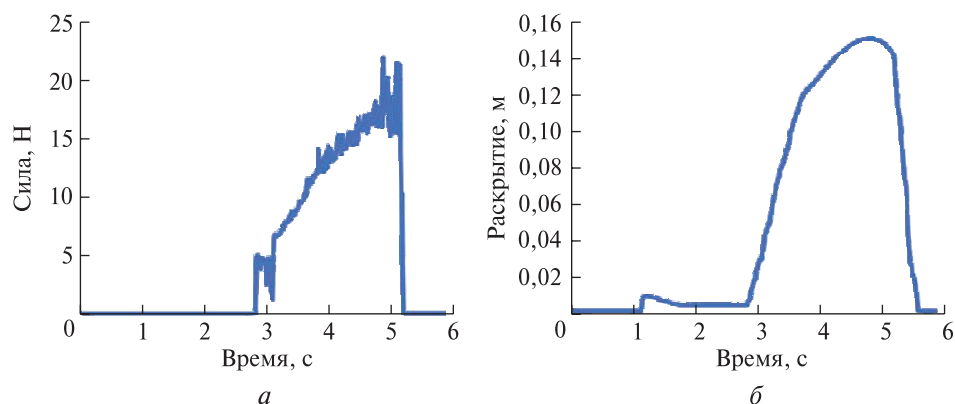


Рис. 12. Сила контакта кулачка и ролика (*а*) и величина раскрытия конусов (*б*)
Fig. 12. Contact force of the cam and roller (*a*) and the amount of opening of the cones (*b*)

Максимальный крутящий момент на зарядном устройстве (рис. 10, *б*) достигает значения 2,2 Н·м во время начала раскрытия подпружиненной крышки зарядного стакана (0,7 с), а также ее закрытия (1,8 с).

Из рис. 11, *а* видно, что максимальное усилие, создаваемое пружиной посадочного конуса, достигает 21,4 Н во время наибольшего раскрытия конуса (4,4 с). Также на 1,2 с наблюдался кратковременный скачок силы до 26,7 Н от удара саженца о посадочный конус, которым можно пренебречь.

Максимальное усилие на пружине отдельного стакана зарядного барабана (рис. 11, *б*) достигает 13,2 Н во время закрытия подпружиненной крышки (1,8 с).

Из рис. 12, *а* видно, что максимальная сила контакта кулачка и ролика составляет 21,9 Н. Она возникает непосредственно перед сходом кулачка с ролика (4,9 с). В это время также наблюдается максимальное раскрытие конуса, равное 0,15 м (рис. 12, *б*).

Исследование взаимодействия посадочных конусов с почвой. Для предварительного исследования сил, возникающих в посадочных конусах, воспользовались методом дискретных элементов. Представим основные параметры моделирования (табл. 2) и виртуальный стенд для исследования взаимодействия посадочного конуса с почвенной средой (рис. 13).

В имитационной модели использованы виртуальные силовые элементы. Это линейный вертикальный двигатель заглубления (рис. 14, *а*), обеспечивающий проникновение посадочного конуса на глубину 100 мм от поверхности почвы со скоростью 0,5 м/с. Линейный вертикальный двигатель выглубления осуществляющий обратный ход посадочного конуса также со скоростью 0,5 м/с (рис. 14, *б*). Угловой двигатель раскрытия подвижного полуконуса имеющий постоянную скорость 3,14 рад/с и служащий для имитации процесса экстракции саженца в нижней части траектории движения посадочного конуса (рис. 14, *в*).

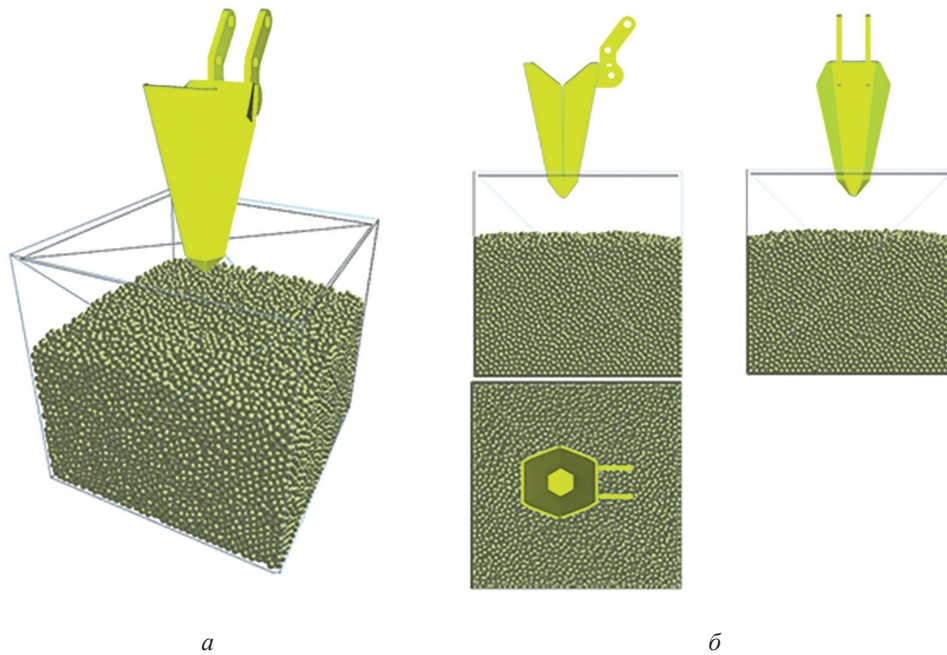


Рис. 13. Виртуальный стенд для исследования взаимодействия посадочного конуса с почвенной средой: *a* — общий вид; *б* — проекционные виды

Fig. 13. Virtual stand for studying the interaction of a planting cone with the soil environment: *a* — general view; *б* — projection views

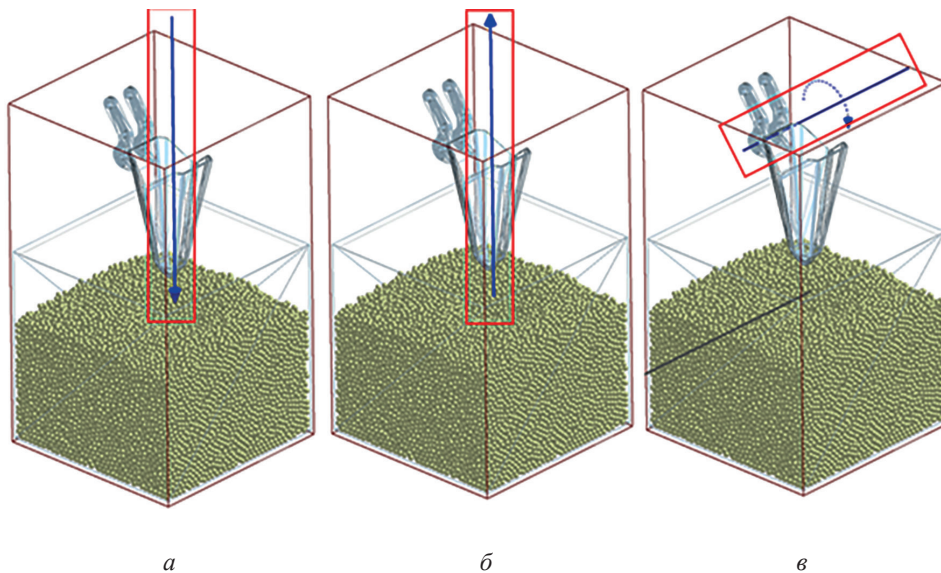


Рис. 14. Силовые элементы: *a* — линейный вертикальный двигатель заглубления; *б* — линейный вертикальный двигатель выглубления; *в* — угловой двигатель раскрытия полуконуса

Fig. 14. Power elements: *a* — linear vertical deepening motor; *б* — linear vertical excavation motor; *в* — angular semi-cone opening motor

Условно разобьем виртуальный эксперимент на 3 стадии (рис. 15):

1 — 0...6 с: формирование почвенного пласта (рис 15, *a*);

2 — 6...6,5 с: заглубление посадочного конуса (рис. 15, *б*); 3 — 6,5...7 с: выглубление посадочного конуса с одновременным раскрытием полуконуса (рис. 15, *в*).

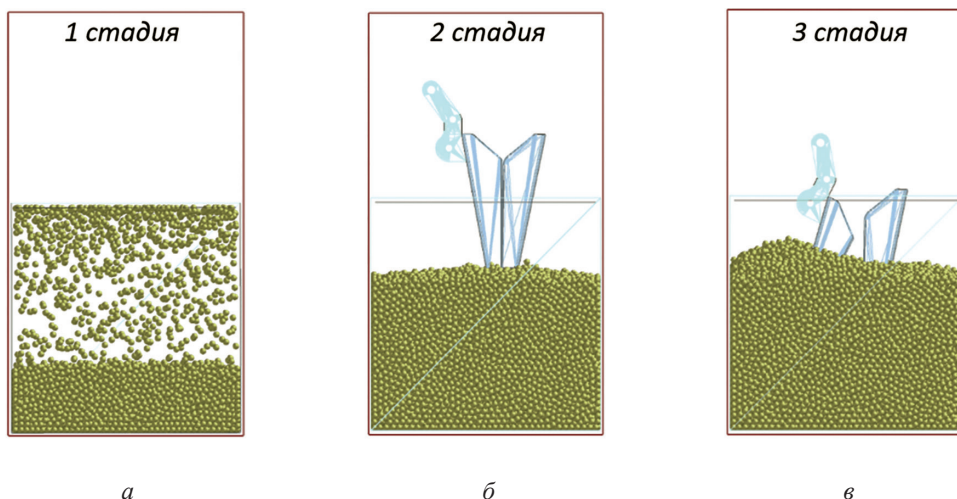


Рис. 15. Стадии моделирования: *а* — формирование почвенного пласта; *б* — заглубление посадочного конуса с раскрытием полуконуса
Fig. 15. Modeling stages: *a* — formation of the soil layer; *б* — deepening of the planting cone; *в* — removing of the planting cone with opening of the half-cone

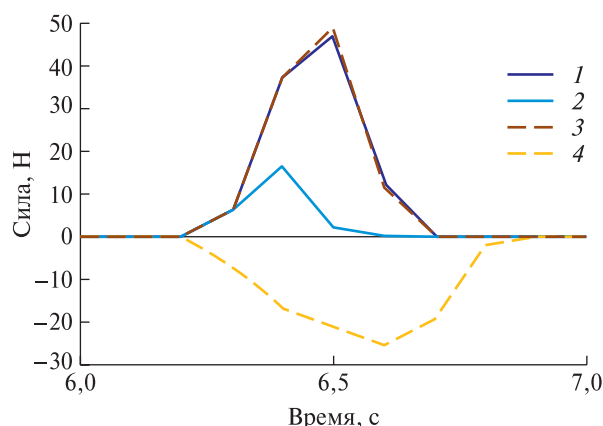


Рис. 16. Модель взаимодействия посадочного конуса с почвенной средой: *1* — вертикальная сила сопротивления почвы проникновению неподвижного полуконуса R_{zn} ; *2* — продольная сила сопротивления почвы проникновению неподвижного полуконуса R_{xn} ; *3* — вертикальная сила сопротивления почвы проникновению подвижного полуконуса R_{zm} ; *4* — продольная сила сопротивления почвы проникновению подвижного полуконуса R_{xm}

Fig. 16. Results of modeling the interaction of the planting cone with the soil environment: *1* — vertical force of soil resistance to penetration of fixed semi-cone R_{zn} ; *2* — longitudinal force of soil resistance to penetration of fixed semi-cone R_{xn} ; *3* — vertical force of soil resistance to penetration of movable semi-cone R_{zm} ; *4* — longitudinal force of soil resistance to penetration of movable semi-cone R_{xm}

Из рис. 16 видно, что вертикальные силы сопротивления почвы проникновению посадочного конуса R_z для его подвижной R_{zm} и неподвижной R_{zn} частей фактически совпадают и составляют около 49 Н. В то же время продольные

Т а б л и ц а 2

Исходные параметры моделирования
Initial simulation parameters

Параметр	Единица измерения	Значение
Форма дискретных частиц	—	Сферическая
Радиус дискретной частицы	мм	3,5
Масса частицы	кг	0,000448986
Количество дискретных частиц	шт.	40 000
Вертикальная скорость конуса	м/с	0,5
Угловая скорость раскрытия полуконуса	рад/с	3,14
Глубина проникновения	мм	100
Плотность твердой фазы почвы	кг/м ³	2500
Объемная плотность почвенного пласта	кг/м ³	1700
Размер формируемого почвенного пласта	мм	260×260×200

силы R_x для различных полуконусов противоположны по знаку и отличаются по значению. Так, для неподвижного полуконуса сила R_{xn} составляет 16,4 Н, для подвижного R_{xm} — 25,1 Н. Такое заметное различие объясняется дополнительным силовым воздействием на почву во время раскрытия подвижного полуконуса, однако оно не может повлиять ни на кинематику, ни на параметры пружин посадочного механизма.

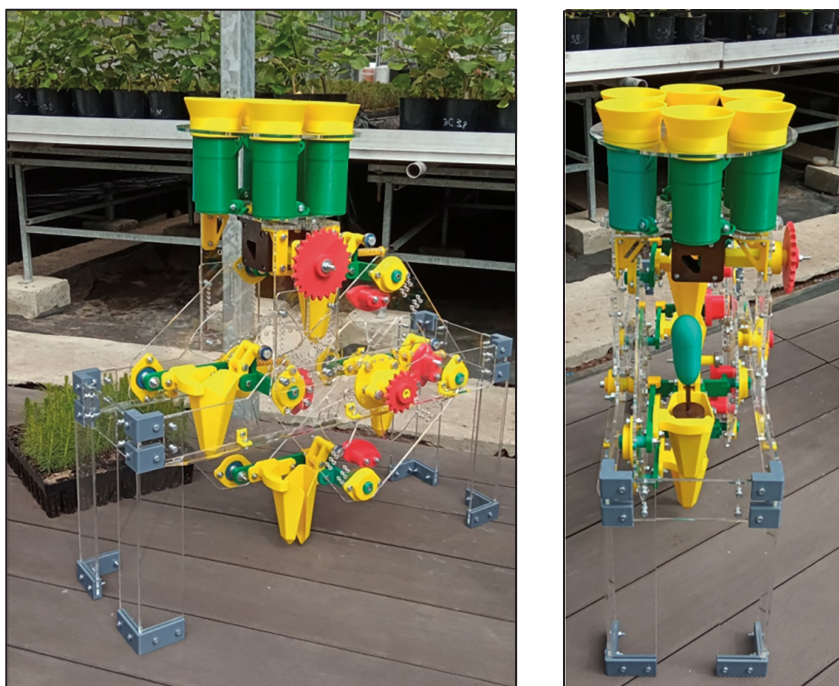


Рис. 17. Создание полноразмерного макетного образца посадочного механизма с использованием 3D-печати

Fig. 17. Creation of a full-size mock-up of the planter mechanism using 3D-printing

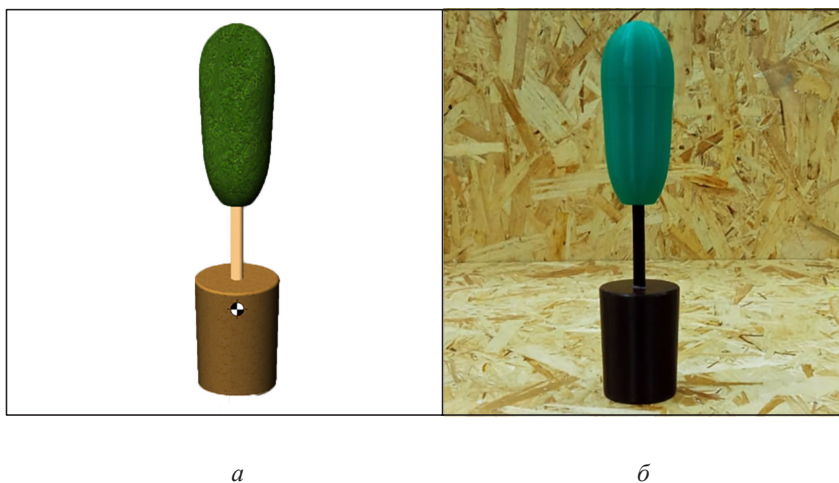


Рис. 18. Саженец с закрытой корневой системой: *a* — 3D-модель; *б* — макетный образец

Fig. 18. Seedling with a closed root system: *a* — 3d model; *б* — full-size mock-up

Создание полноразмерного макетного образца посадочного механизма с использованием 3D-печати. Для экспериментальной проверки кинематических и динамических параметров посадочного механизма, а также оптимизации параметров механизма размыкания был создан полноразмерный макетный образец из неметаллических материалов (рис. 17). Его изготовление осуществлялось с использовани-

ем оборудования «Лаборатории быстрого прототипирования» Инжинирингового центра Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (ВГЛТУ). Для изготовления деталей сложной конфигурации применялась 3D-печать АБС-пластиком, обладающим приемлемым в данном случае сочетанием физико-механических и технологических свойств. Изготовление наиболее нагруженных



а



б

Рис. 19. Исследование требующегося крутящего момента: а — посадочного аппарата; б — зарядного барабана

Fig. 19. Investigation of the required torque: а — planter device; б — feeding device

Т а б л и ц а 3
Дополнительные параметры согласно лабораторному эксперименту
Additional lab experiment parameters

Параметр	Единица измерения	Значение
<i>Параметры пружины сжатия посадочного конуса</i>		
Диаметр наружный D_1	мм	12
Диаметр проволоки D	мм	1
Жесткость пружины c	Н/м	500
Свободная длина L_0	мм	80
Рабочий ход пружины $L_2...L_1$	мм	38...64
Усилие предварительного натяжения F_1	Н/м	8,08
Рабочая максимальная нагрузка F_2	Н	21,21
<i>Параметры пружины растяжения зарядного стакана</i>		
Диаметр наружный D_1	мм	8
Диаметр проволоки D	мм	0,8
Жесткость пружины c	Н/м	180
Свободная длина L_0	мм	70
Рабочий ход пружины $L_2...L_1$	мм	105...80
Усилие предварительного натяжения F_1	Н	0,59
Рабочая максимальная нагрузка F_2	Н	6,14

элементов, в частности зубчатых колес редуктора и звездочек цепной передачи, выполнялось с использованием специального инженерного пластика, наполненного углеродными волокна-

ми и обладающего повышенной механической прочностью. На станке для лазерной резки неметаллов изготовили листовые детали, такие как диски, опорная пластина, сепаратор посадочного барабана, элементы рамы и опорную конструкцию.

Кроме того, был изготовлен полноразмерный макет саженца с ЗКС с геометрическими и массоинерционными характеристиками, идентичными 3D-модели саженца, использованной при имитационном моделировании (рис. 18).

Экспериментальные исследования полноразмерного макетного образца посадочного механизма. Для исследования крутящего момента, требуемого для работы посадочного механизма без учета сил сопротивления почвы, был изготовлен шкив, устанавливаемый на приводной вал механизма (рис. 19, а). На шкив наматывался шнур и подвешивался груз. С постепенным увеличением веса груза определялся крутящий момент, необходимый для свободного поворота посадочного аппарата. Аналогично производилось исследование характеристик зарядного барабана (рис. 19, б).

При создании макета были использованы реальные пружины, соответственно, дополнительно рассчитывались их параметры (табл. 3).

В результате лабораторного эксперимента было установлено, что крутящий момент, требующийся для свободного поворота посадочного аппарата, составляет 6,12 Н·м, для зарядного устройства — 3,42 Н·м.

Таким образом, главным силовым параметром, измеряемым на полноразмерном макетном образце, являлся крутящий момент,

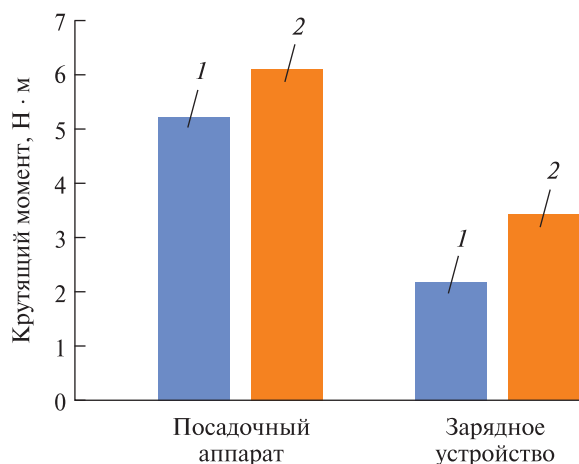


Рис. 20. Сравнение крутящих моментов на посадочном аппарате и зарядном устройстве, полученных в результате моделирования (1) и лабораторного эксперимента (2)

Fig. 20. Comparison of torques on the planter gear and the feeding device obtained as a result of simulation (1) and laboratory experiment (2)

требующийся для свободного поворота посадочного аппарата, а также для поворота зарядного устройства (рис. 20).

Для посадочного аппарата, по данным моделирования, крутящий момент составил 5,20 Н·м, а по результатам экспериментальной проверки — незначительно больше, т. е. 6,12 Н·м. Разница составила не более 17,7 %. Данное различие можно объяснить установкой в лабораторном эксперименте всех четырех посадочных конусов с пружинами. Поэтому ко времени схода ролика с кулачка текущего конуса, предшествующий ему конус уже начал свое раскрытие, что повышало общий крутящий момент.

Для зарядного устройства, по данным моделирования, крутящий момент составил 2,20 Н·м, а по результатам экспериментальной проверки был заметно больше — 3,42 Н·м. Разница уже является более существенной и составляет 55,5 %. Здесь различие вероятно, также, связано с тем, что в лабораторном эксперименте устанавливались все шесть зарядных стаканов с пружинами, что создавало дополнительную силу трения одновременно от пяти крышек об опорную пластину. К тому же, по-видимому, дополнительные силы сопротивления возникали в угловом редукторе макетного образца, через который осуществлялся привод зарядного устройства, в то время как при моделировании виртуальный двигатель прикладывался непосредственно к зарядному барабану, а силы трения в сопряжениях не учитывались.

Выводы

Результаты моделирования рабочего процесса посадочного механизма, включающего в себя посадочный аппарат и зарядное устройство, показали его приемлемые силовые характеристики и в целом общую работоспособность предлагаемой конструкции. Созданный полно-размерный функциональный макетный образец посадочного механизма позволил подтвердить полученные в результате моделирования силовые характеристики по такому ключевому параметру как крутящий момент, требующийся для привода посадочного аппарата и зарядного устройства. Наглядно была подтверждена правильность выбранных в процессе проектирования кинематических параметров механизма. Доказана эффективность использования полноразмерного макетирования с применением 3D-печати для оценки кинематических и силовых параметров посадочных механизмов. В дальнейшем планируется получение экспериментальным путем силовых характеристик процесса проникновения посадочного конуса для проверки данных, полученных при моделировании. Предлагаемую концепцию посадочного аппарата после незначительной переработки конструкции можно адаптировать для решения широкого спектра задач, например посадки семенных корнеплодов таких культур, как сахарная свекла, морковь и др.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Список литературы

- [1] Оплетаев А.С., Жигулин Е.В., Залесов С.В. Опыт многоротационного выращивания контейнерного посадочного материала для искусственного лесовосстановления в теплицах с регулируемым микроклиматом // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. 41. № 2. С. 152–157. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-2-152-157
- [2] Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Комарова О.В., Пилипенко В.Н., Похваленко В.А. Опыт создания лесных культур с закрытой коревой системой в степной и лесостепной зонах юга Российской Федерации // Астраханский вестник экологического образования, 2022. № 5 (70). С. 203–211. DOI: 10.36698/2304-5957-2022-5-203-211
- [3] Исаков И.Ю., Михин В.И., Трегубов О.В., Сидоров Г.С., Попов А.В., Ахтямов А.Г. Полиморфизм и биоразнообразие лесообразующих пород в искусственных и естественных насаждениях центральной лесостепи. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, 2021. 156 с.

- [4] Habineza E., Ali M., Reza N., Chung S.-O. Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms Onion transplanter View project // *Korean J. Agric. Sci.*, 2023, v. 50(1), pp. 113–129. DOI: 10.7744/kjoas.20230007
- [5] Karayel D., Çanakci M., Topakci M., Aktaş A., Aytem H., Kriauciuniene Z. Technical evaluation of transplanters' performance for potted seedlings // *Turkish J. Agric. For.*, 2023, v. 47, no. 1, pp. 116–123. DOI: 10.55730/1300-011X.3068
- [6] Khadatkar A., Mathur S.M., Gaikwad B.B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation // *Current Science. Indian Academy of Sciences*, 2018, v. 115, no. 10, pp. 1884–1892. DOI: 10.18520/cs/v115/i10/1884-1892
- [7] Tylek P., Szewczyk G., Kormanek M., Walczyk J., Sowa J. M., Pietrzykowski M., Woś B., Kielbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Adamczyk F., Danielak M., Wojciechowski J., Szczepaniak J., Szychta M., Szulc, T. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration // *Croat. J. For. Eng.*, 2023, v. 44, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.5552/crojfe.2023.1722
- [8] Iqbal Z. Design of a Gear Driven Hopper Type Dribbling Mechanism for a 2.7 kW Two-row Pepper Transplanter // Thesis for the Degree of Master of Science, Chungnam National University. DOI: 10.13140/RG.2.2.31847.80807
- [9] Durga M.L., Rao A.S., Kumar A.A. Performance Evaluation of Single Row-Low Horse Power Tractor Operated Vegetable Transplanter // *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, 2020, v. 39, no. 44, pp. 37–44. DOI: 10.9734/cjast/2020/v39i4431149
- [10] Mitrache P.M., Ciupercă R., Sărăcin I. Kinematics of the Seedling Plant with Vertical Distributor and Buckets // *E3S Web Conf.*, 2021, v. 286, pp. 2–11. DOI: 10.1051/e3sconf/202128603012
- [11] Sun W., Zhang H., Simionescu P.A. Numerical Optimization and Experimental Validation of a Five-link Mechanism, Potato planter // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 2021, v. 235, no. 23, pp. 6883–6892. DOI: 10.1177/09544062211004652
- [12] Han L.H., Mao H.P., Hu J.P., Kumi F. Development of a Riding-type Fully Automatic Transplanter for Vegetable Plug Seedlings // *Spanish J. Agric. Res.*, 2019, v. 17, no. 3. DOI: 10.5424/sjar/2019173-15358
- [13] Kumar G.V.P., Raheman H. Vegetable Transplanters for Use in Developing Countries Review // *Int. J. Veg. Sci.*, 2008, v. 14, no. 3, pp. 232–255. DOI: 10.1080/19315260802164921
- [14] Sun W., Simionescu P.A. Parameter Analysis and Field Tests of a Double Crank Multi-Rod under Plastic-Film Hill-Drop Mechanism Potato Planter // *Am. J. Potato Res.*, 2020, v. 97, no. 3, pp. 256–264. DOI: 10.1007/s12230-020-09773-5
- [15] Jin X., Li S., Yang X., Wu J., Liu Z., Liu H. Developments in Research on Seedling Auto-picking Device of Vegetable Transplanter // *Appl. Mech. Mater.*, 2013, v. 364, pp. 375–379. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.364.375
- [16] Jin X., Cheng Q., Zhao B., Ji J., Li M. Design and test of ZZYM-2 Potted Vegetable Seedlings Transplanting Machine // *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 1, pp. 101–110. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201301.5494
- [17] Бартенев И.И., Гаврин Д.С. Конструктивные особенности посадочных машин // *Лесотехнический журнал*, 2019. Т. 9. № 2. С. 147–155. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/16
- [18] Hwang S.J., Park J.H., Lee J.Y., Shim S.B., Nam J.S. Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter // *Agron.*, 2020, v. 10, p. 1938. DOI: 10.3390/AGRONOMY10121938
- [19] Markumningsih S., Hwang S.-J., Kim J.-H., Jang M.-K., Shin C.-S., Nam J. Comparison of Consumed Power and Safety of Two Types of Semi-Automatic Vegetable Transplanter: Cam and Four-Bar Link // *Agriculture. MDPI AG*, 2023, v. 13, no. 3, p. 588. DOI: 10.3390/agriculture13030588
- [20] Chowdhury M., Ali M., Habineza E., Reza M.N., Kabir M.S.N., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung, S.-O. Analysis of Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards // *Agriculture. MDPI AG*, 2023, v. 13, no. 3, p. 652. DOI: 10.3390/agriculture13030652
- [21] Zhou M., Shan Y., Xue X., Yin D. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings // *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 4, pp. 85–92. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404
- [22] Sun K., Ge R., Li T., Wang J. Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, v. 692, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012029
- [23] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission // *Chinese J. Mech. Eng. Springer Singapore*, 2019, v. 32, no. 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3
- [24] Shao Y., Liu Y., Xuan G., Hu Z., Han X., Wang Y., Chen B., Wang W. Design and Test of Multifunctional Vegetable Transplanting Machine // *IFAC-PapersOnLine. Elsevier Ltd*, 2019, v. 52, no. 30, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.503
- [25] Reza M. N., Islam M. N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S. J., Choi I. S., Chung S. O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter // *Machines. MDPI*, 2021, v. 9, no. 9. DOI: 10.3390/machines9090183
- [26] Iqbal M.Z., Islam M.N., Ali M., Kabir M.S.N., Park T., Kang T.G., Park K.S., Chung, S.O. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter // *J. Mech. Sci. Technol. Korean Society of Mechanical Engineers*, 2021, v. 35, no. 6, pp. 2605–2614. DOI: 10.1007/s12206-021-0531-2
- [27] Iqbal M. Z., Islam M. N., Chowdhury M., Islam S., Park T., Kim Y. J., Chung, S. O. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kw walking-type automatic pepper transplanter // *Machines*, 2021, v. 9, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/machines9010006
- [28] Zeng F., Li X., Bai H., Cui J., Liu X., Zhang Y. Experimental Research and Analysis of Soil Disturbance Behavior during the Hole Drilling Process of a Hanging-Cup Transplanter by DEM // *Processes*, 2023, v. 11, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/pr11020600

- [29] Yang Q., Zhang R., Jia C., Li Z., Zhu M., Addy M. Study of dynamic hole-forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter // *Front. Mech. Eng.*, 2022, v. 8, no. August, pp. 1–16. DOI: 10.3389/fmech.2022.896881
- [30] Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System // *Horticulturae*, 2022, v. 8, no. 11. DOI: 10.3390/horticulturae8111080
- [31] Cui J., Li X., Zeng F., Bai H., Zhang Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force // *Appl. Sci.*, 2023, v. 13, no. 10. DOI: 10.3390/app13106278
- [32] Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Применение технологий 3D-печати и 3D-сканирования при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // *Техника и оборудование для села*, 2023. № 1. С. 34–38. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-34-38
- [33] Гончарова Ю.А. Реновация технических средств с использованием 3D-печати полимерных запасных частей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. Москва, 2022. 188 с.
- [34] Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Боровенский В.Р. Использование технологий 3D-печати при проектировании почвообрабатывающих орудий // *Фундаментальные исследования*, 2016. № 11. С. 306–311.
- [35] Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs // *Inventions*, 2021, v. 8, no. 83. DOI: 10.3390/inventions6040083

Сведения об авторах

Лысыч Михаил Николаевич [✉] — канд. техн. наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», miklynea@yandex.ru

Малюков Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», malyukovsergey@yandex.ru

Шавков Михаил Викторович — канд. техн. наук, руководитель отдела снабжения и логистики, ООО «Русгидроком (РГК)», shavkovmv@mail.ru

Гнусов Максим Александрович — канд. техн. наук, руководитель лаборатории лесного машиностроения Инжинирингового центра ВГЛТУ, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», mgusov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.03.2024.

Одобрено после рецензирования 08.11.2024.

Принята к публикации 27.11.2024.

STUDY OF SEMI-AUTOMATIC PLANTING MECHANISM FOR SEEDLINGS WITH ROOT-BALLED TREE SYSTEM IN CAD WITH FULL-SIZE 3D-PRINTING TOOLS

M.N. Lysych¹✉, S.V. Malyukov¹, M.V. Shavkov², M.A. Gnusov¹

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev st., 394087, Voronezh, Russia

²Rushydrocom (RGK) LLC, 25, Mazlumova st., 394040, Voronezh, Russia

miklynea@yandex.ru

The necessity of developing and creating planting machines for seedlings with a root-balled tree system is substantiated. Existing methods for modeling the kinematics and dynamics of planting machines using CAD and CAE systems, as well as methods for modeling the processes of interaction between the working bodies of planting machines and the soil environment are analyzed. The general concept of the developed planter machine for seedlings with a root-balled tree system is described. A simulation model of the planter mechanism has been created in the 3D CAD SolidWorks software package and CAE SolidWorks Motion. The working process of the planter mechanism was studied on a virtual stand implemented in the same software. As a result of the simulation, a group of parameters necessary for assessing the performance of the planter mechanism was obtained. These are the moments of forces of the virtual motors of the planter gear drive and the feeding device, the forces arising on the virtual springs of the retainer cone and the feeding drum cell, as well as the values of the contact force of the cam with the roller and the size of the opening of the retainer cones. The process of interaction of retaining cones with the soil environment was simulated using the discrete element method. For experimental verification of the obtained parameters, a full-size mock-up sample was created using 3D-printing. It made possible to confirm the power characteristics obtained as a result of modeling for such a key parameter as the torque required to drive the planter gear and the feeding device. Also, the correctness of the kinematic parameters of the mechanism chosen during the design process was clearly confirmed.

Keywords: planter, closed root system, simulation, 3D CAD, MBD, DEM, 3D-printing

Suggested citation: Lysych M.N., Malyukov S.V., Shavkov M.V., Gnusov M.A. *Issledovanie poluavtomaticheskogo posadochnogo mekhanizma dlya seyantsev s zakrytoy kornevoy sistemoy v srede SAPR s polnorazmernym maketirovaniem sredstvami 3D-pechati* [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, vol. 29, no. 1, pp. 144–161. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-144-161

References


- [1] Opletaev A.S., Zhigulin E.V., Zalesov S.V. *Opyt mnogorotatsionnogo vyrashchivaniya konteynernogo posadochnogo materiala dlya iskusstvennogo lesovosstanovleniya v teplitsakh s reguliruемым mikroklimatom* [Experience of multi-rotation cultivation of container planting material for artificial reforestation in greenhouses with a controlled microclimate]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2023, v. 41, no. 2, pp. 152–157. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-2-152-157
- [2] Tregubov O.V., Laktionov A.P., Mizin Yu.A., Komarova O.V., Pilipenko V.N., Pokhvalenko V.A. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur s zakrytoy kornevoy sistemoy v stepnoy i lesostepnoy zonakh yuga Rossiyskoy Federatsii* [Experience of creating forest crops with a closed bark system in the steppe and forest-steppe zones of the south of the Russian Federation]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* [Astrakhan Bulletin of Environmental Education], 2022, no. 5 (70), pp. 203–211. DOI 10.36698/2304-5957-2022-5-203-211
- [3] Isakov I.Yu., Mikhin V.I., Tregubov O.V., Sidorov G.S., Popov A.V., Akhtyamov A.G. *Polimorfizm i bioraznoobrazie lesoobrazuyushchikh porod v iskusstvennykh i estestvennykh nasazhdeniyakh tsentral'noy lesostepi* [Polymorphism and biodiversity of forest-forming species in artificial and natural plantations of the central forest-steppe]. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. 156 p.
- [4] Habineza E., Ali M., Reza N., Chung S.-O. Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms Onion transplanter View project. *Korean J. Agric. Sci.*, 2023, v. 50(1), pp. 113–129. DOI: 10.7744/kjoas.20230007
- [5] Karayel D., Çanakci M., Topakci M., Aktaş A., Aytem H., Kriauciuniene Z. Technical evaluation of transplanters' performance for potted seedlings. *Turkish J. Agric. For.*, 2023, v. 47, no. 1, pp. 116–123. DOI: 10.55730/1300-011X.3068
- [6] Khadatkar A., Mathur S.M., Gaikwad B.B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation. *Current Science. Indian Academy of Sciences*, 2018, v. 115, no. 10, pp. 1884–1892. DOI: 10.18520/cs/v115/i10/1884-1892
- [7] Tylek P., Szewczyk G., Kormanek M., Walczyk J., Sowa J. M., Pietrzykowski M., Woś B., Kielbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Adamczyk F., Danielak M., Wojciechowski J., Szczepaniak J., Szychta M., Szulc, T. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration. *Croat. J. For. Eng.*, 2023, v. 44, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.5552/crojfe.2023.1722

- [8] Iqbal Z. Design of a Gear Driven Hopper Type Dibbling Mechanism for a 2.7 kW Two-row Pepper Transplanter. Thesis for the Degree of Master of Science, Chungnam National University. DOI: 10.13140/RG.2.2.31847.80807
- [9] Durga M.L., Rao A.S., Kumar A.A. Performance Evaluation of Single Row-Low Horse Power Tractor Operated Vegetable Transplanter. *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, 2020, v. 39, no. 44, pp. 37–44. DOI: 10.9734/cjast/2020/v39i4431149
- [10] Mitrache P.M., Ciupercă R., Sărăcin I. Kinematics of the Seedling Plant with Vertical Distributor and Buckets. *E3S Web Conf.*, 2021, v. 286, pp. 2–11. DOI:10.1051/e3sconf/202128603012
- [11] Sun W., Zhang H., Simionescu P.A. Numerical Optimization and Experimental Validation of a Five-link Mechanism, Potato planter. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 2021, v. 235, no. 23, pp. 6883–6892. DOI: 10.1177/09544062211004652
- [12] Han L.H., Mao H.P., Hu J.P., Kumi F. Development of a Riding-type Fully Automatic Transplanter for Vegetable Plug Seedlings. *Spanish J. Agric. Res.*, 2019, v. 17, no. 3. DOI: 10.5424/sjar/2019173-15358
- [13] Kumar G.V.P., Raheman H. Vegetable Transplanters for Use in Developing Countriesa Review. *Int. J. Veg. Sci.*, 2008, v. 14, no. 3, pp. 232–255. DOI: 10.1080/19315260802164921
- [14] Sun W., Simionescu P.A. Parameter Analysis and Field Tests of a Double Crank Multi-Rod under Plastic-Film Hill-Drop Mechanism Potato Planter. *Am. J. Potato Res.*, 2020, v. 97, no. 3, pp. 256–264. DOI: 10.1007/s12230-020-09773-5
- [15] Jin X., Li S., Yang X., Wu J., Liu Z., Liu H. Developments in Research on Seedling Auto-picking Device of Vegetable Transplanter. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, v. 364, pp. 375–379. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.364.375
- [16] Jin X., Cheng Q., Zhao B., Ji J., Li M. Design and test of 2ZYM-2 Potted Vegetable Seedlings Transplanting Machine. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 1, pp. 101–110. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201301.5494
- [17] Bartenev I.I., Gavrin D.S. *Konstruktivnye osobennosti posadochnykh mashin* [Design features of planting machines]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2019, v. 9, no. 2, pp. 147–155. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/16
- [18] Hwang S.J., Park J.H., Lee J.Y., Shim S.B., Nam J.S. Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter. *Agron.*, 2020, v. 10, p. 1938. DOI: 10.3390/AGRONOMY10121938
- [19] Markummingsih S., Hwang S.-J., Kim J.-H., Jang M.-K., Shin C.-S., Nam J. Comparison of Consumed Power and Safety of Two Types of Semi-Automatic Vegetable Transplanter: Cam and Four-Bar Link. *Agriculture*. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 588. DOI: 10.3390/agriculture13030588
- [20] Chowdhury M., Ali M., Habineza E., Reza M.N., Kabir M.S.N., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung, S.-O. Analysis of Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards. *Agriculture*. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 652. DOI: 10.3390/agriculture13030652
- [21] Zhou M., Shan Y., Xue X., Yin D. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 4, pp. 85–92. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404
- [22] Sun K., Ge R., Li T., Wang J. Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, v. 692, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012029
- [23] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission. *Chinese J. Mech. Eng.* Springer Singapore, 2019, v. 32, no. 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3
- [24] Shao Y., Liu Y., Xuan G., Hu Z., Han X., Wang Y., Chen B., Wang W. Design and Test of Multifunctional Vegetable Transplanting Machine. *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier Ltd, 2019, v. 52, no. 30, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.503
- [25] Reza M.N., Islam M.N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S.J., Choi I.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. *Machines*. MDPI, 2021, v. 9, no. 9. DOI: 10.3390/machines9090183
- [26] Iqbal M.Z., Islam M.N., Ali M., Kabir M.S.N., Park T., Kang T.G., Park K.S., Chung, S.O. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter. *J. Mech. Sci. Technol.* Korean Society of Mechanical Engineers, 2021, v. 35, no. 6, pp. 2605–2614. DOI: 10.1007/s12206-021-0531-2
- [27] Iqbal M.Z., Islam M.N., Chowdhury M., Islam S., Park T., Kim Y.J., Chung, S.O. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kw walking-type automatic pepper transplanter. *Machines*, 2021, v. 9, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/machines9010006
- [28] Zeng F., Li X., Bai H., Cui J., Liu X., Zhang Y. Experimental Research and Analysis of Soil Disturbance Behavior during the Hole Drilling Process of a Hanging-Cup Transplanter by DEM. *Processes*, 2023, v. 11, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/pr11020600
- [29] Yang Q., Zhang R., Jia C., Li Z., Zhu M., Addy M. Study of dynamic hole-forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter. *Front. Mech. Eng.*, 2022, v. 8, no. August, pp. 1–16. DOI: 10.3389/fmech.2022.896881
- [30] Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System. *Horticulturae*, 2022, v. 8, no. 11. DOI: 10.3390/horticulturae8111080
- [31] Cui J., Li X., Zeng F., Bai H., Zhang Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force. *Appl. Sci.*, 2023, v. 13, no. 10. DOI: 10.3390/app13106278
- [32] Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. *Primenenie tekhnologiiy 3D-pechati i 3D-skanirovaniya pri izgotovlenii i remonte sel'skokhozyaystvennoy tekhniki* [Application of 3D printing and 3D scanning technologies in the manufacture and repair of agricultural machinery]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* [Machinery and equipment for the village], 2023, no. 1, pp. 34–38. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-34-38

- [33] Goncharova Yu.A. *Renovatsiya tekhnicheskikh sredstv s ispol'zovaniem 3D-pechati polimernykh zapasnykh chastey* [Renovation of technical equipment using 3D printing of polymer spare parts]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.20.03. Moscow, 2022, 188 p.
- [34] Lysych M.N., Shabanov M.L., Borovenskiy V.R. *Ispol'zovanie tekhnologii 3D-pechati pri proektirovanii pochvoobrabatyvayushchikh orudiy* [The use of 3D printing technologies in the design of tillage implements]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2016, no. 11, pp. 306–311.
- [35] Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs. *Inventions*, 2021, v. 8, no. 83. DOI: 10.3390/inventions6040083

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Authors' information

Lysych Mikhail Nikolaevich  — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VGLTU), miklynea@yandex.ru

Malyukov Sergey Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VGLTU), malyukovsergey@yandex.ru

Shavkov Mikhail Viktorovich — Cand. Sci. (Tech.), Head of Supply and Logistics Department, RusHydrocom (RGK) LLC, shavkovmv@mail.ru

Gnusov Maksim Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Forestry Engineering Laboratory of the Engineering Center VGLTU, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VGLTU), mgnusov@yandex.ru

Received 28.03.2024.

Approved after review 08.11.2024.

Accepted for publication 27.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest