

На правах рукописи



ЧЕРНИК КРИСТИНА НИКОЛАЕВНА

**СИСТЕМА ПОДАЧИ СЕЯНЦЕВ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ
СИСТЕМОЙ В ПОСАДОЧНЫЙ АППАРАТ
ЛЕСОПОСАДОЧНОЙ МАШИНЫ**

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск - 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» на кафедре «Технологии конструкционных материалов и древесиноведения», г. Красноярск

Научный руководитель: кандидат технических наук
Елисеев Сергей Геннадьевич

Официальные оппоненты:

Гнусов Максим Александрович доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра «Безопасности жизнедеятельности и правовых отношений

Семенов Александр Викторович кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», кафедра «Механизация и технический сервис в АПК»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

Защита диссертации состоится «19» декабря 2025 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва» по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира 82. ауд. Ц-110.

Отзывы на автореферат с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира 82, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», ученому секретарю, e-mail: isaevaev@mail.sibsau.ru

В отзыве указывается фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица, представившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва и на официальном сайте <https://www.sibsau.ru/disfiles/58760/>.

Автореферат разослан « »

2025 г.

И. о. ученого секретаря
диссертационного совета



Исаева Елена Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В Российской Федерации активно внедряются прогрессивные методы искусственного лесовосстановления, в частности, посадка сеянцев с закрытой корневой системой (ЗКС). В настоящее время высокая доля ручного труда в процессе выполнения лесовосстановительных работ лимитирует производительность посадочных агрегатов и способствует возникновению пропусков, которые обусловлены человеческим фактором.

В России механизированная посадка осуществляется лесопосадочными машинами непрерывного действия, где главной причиной низкой производительности и качества посадки является ручная подача сеянцев в захваты посадочного аппарата.

Для повышения эффективности лесопосадочных работ необходимо усовершенствовать машины непрерывного действия путем разработки и внедрения механизированной системы подачи сеянцев с ЗКС, которая обеспечит бесперебойный рабочий цикл без остановок и позволит исключить ручной труд оператора.

Важным направлением является разработка системы подачи сеянцев непосредственно из кассет, а также увеличение емкости накопителей посадочного материала и минимизация или полная ликвидация пропусков.

Степень разработанности темы. Исследованиями, направленными на механизацию лесного хозяйства, обоснование характеристик лесопосадочных машин и их рабочих органов, занимались российские и зарубежные ученые: И.М. Бартенев, М.Л. Шабанов, М.В. Шавков, В.П. Горячкин, М.В. Драпалюк, В.И. Казаков, В. В. Стасюк, В. А. Зеликов, Н. Е. Проказин, А. А. Мартынюк, В.Ф. Мун, М. Ramantswana, T. Laine, J. Rantala, B.T. Ersson, M. R Ghaffariyan, F. Adamczyk, M. Szychta, J. Wojciechowski, M. Danielak, S. Sobocki.

Из-за увеличения объемов лесопосадочных работ сеянцами с закрытой корневой системой возникла необходимость перехода к машинам с механизированными подающими устройствами, заменяющими ручной труд и повышающими рабочую скорость, производительность агрегатов, снижая при этом нагрузку на рабочих и позволяя проводить посадки в сжатые агротехнические сроки.

Имеющиеся в настоящее время научные и экспериментальные исследования указывают на недостаточную изученность процесса механизированной подачи сеянцев в посадочный аппарат при посадке сеянцев с ЗКС лесопосадочными машинами непрерывного действия.

Однако, существуют научные работы (S. Sobocki, L. Hansson, R. Tadeusiewicz) в которых велись исследования по механизированной подаче сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат машин дискретного действия.

Цель работы состоит в разработке механизированной посадки сеянцев с ЗКС лесопосадочной машиной непрерывного действия, включающей в себя разработку и внедрение эффективной системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат.

Задачи исследования:

1) Теоретически обосновать необходимость усовершенствования машины непрерывного действия путем внедрения системы подачи семян с ЗКС для исключения ручного труда оператора;

2) Разработать конструктивно-технологическую схему системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия;

3) Разработать математическую модель рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия с учётом S-образного профиля разгона и торможения исполнительных механизмов системы;

4) Определить и обосновать основные характеристики системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины на основе результатов математического моделирования;

5) Установить зависимость влияния основных факторов на величину усилия извлечения семян с ЗКС из кассет захватным механизмом;

6) Провести экспериментальные исследования рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия;

7) Провести оценку экономической эффективности внедрения системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия.

Объект исследования – разработка механизированной посадки семян с ЗКС лесопосадочной машиной непрерывного действия.

Предмет исследования – механизированная подача семян с ЗКС в посадочный аппарат.

Научная новизна работы:

1) Теоретически обоснована разработанная система подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия;

2) Разработаны конструктивно-технологическая схема и алгоритм работы системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия;

3) Разработана математическая модель рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия;

4) Установлена зависимость влияния основных факторов на величину усилия в процессе извлечения семян с ЗКС из кассет захватным механизмом;

5) Определены оптимальные режимы работы системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия.

Методы исследования. Научные исследования проводились при помощи методов дифференциального и интегрального исчисления, теоретической механики, математического моделирования, а также численных методов анализа с использованием математических пакетов программ. Для математического моделирования использовалась программа MathCAD.

Экспериментальные исследования проводились на специальном оборудовании в лабораторных условиях. Машинный эксперимент проводился в специализированном модуле кинематического и динамического анализа SolidWorks Motion. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью программы *STATGRAPHICS® Centurion*. Обработка данных, полученных в результате математического моделирования проводилась с применением программы Microsoft Excel.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Разработана перспективная импортозамещающая конструкционно-технологическая схема механизированной системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия с характеристиками, позволяющими повысить производительность лесопосадочной машины до 67,2% и обеспечить отсутствие пропусков семян с ЗКС в процессе посадки.

Результаты работы включены в план развития ООО «Инсайт-проект» (г. Красноярск, Красноярский край).

Положения, выносимые на защиту:

- конструкционно-технологическая схема системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия;
- математическая модель рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия;
- зависимость влияния основных факторов на величину усилия в процессе извлечения семян с ЗКС из кассет захватным механизмом.

Степень достоверности полученных результатов обусловлена применением дифференциального и интегрального исчисления, теоретической механики, математического моделирования с использованием математического пакета программ MathCAD, машинного эксперимента с использованием специализированного модуля кинематического и динамического анализа SolidWorks Motion, экспериментальных исследований с использованием современного испытательного оборудования и программы Microsoft Excel.

Соответствие паспорту специальности. Представленная работа соответствует паспорту специальности 4.3.4 – «Технологии, машины и оборудования для лесного хозяйства и переработки древесины» (п.3 – Теория и методы воздействия техники и технологий на лесную среду в процессе лесовыращивания, заготовки и переработки древесного сырья).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации (Красноярск, 2023 г.), Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития (Воронеж, 2023 г.), Научное творчество молодежи - лесному комплексу России (Екатеринбург, 2023 г.), Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства (Красноярск, 2022-2023 г.), 3D технологии в решении научно-практических задач (Красноярск, 2023 г.), Молодые ученые в решении актуальных проблем науки (Красноярск, 2024 г.), Лесной и

химический комплексы - проблемы и решения (Красноярск, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, включая 3 статьи в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Личный вклад автора заключается в сборе и анализе литературных данных, разработке и теоретическом обосновании конструктивно-технологической схемы системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия, разработке математической модели рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия, постановке и проведении экспериментальных исследований процесса извлечения семян с ЗКС из ячеек кассет захватным механизмом, обработке полученных результатов исследования, формулировании выводов, подготовке и опубликовании статей.

Структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 100 наименований и 8 приложений. Текст работы изложен на 152 страницах, включая 48 рисунков и 19 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость.

Глава 1. Механизированная посадка семян с закрытой корневой системой. Первая глава посвящена анализу существующих технологий, методов и технических решений механизированной посадки семян с ЗКС. Современные системы подачи семян с ЗКС, применяемые на зарубежных лесопосадочных машинах дискретного действия, обладают рядом недостатков: необходимость ручной загрузки семян в буферную емкость системы подачи оператором, сложность извлечения семян без повреждения корневой системы, ограниченный объем накопителя посадочного материала, а также цикличность подачи, связанная с остановками лесопосадочной машины для пополнения запасов семян.

Для повышения эффективности лесопосадочных работ необходимо усовершенствовать машины непрерывного действия путем внедрения механизированной системы подачи семян с ЗКС, которая обеспечит бесперебойный рабочий цикл без остановок и позволит исключить ручной труд оператора. Важным направлением является разработка системы подачи семян непосредственно из кассет, а также увеличение емкости накопителей посадочного материала и минимизация или полная ликвидация пропусков.

Установлено, что более технологичным вариантом для разработки механизированной системы подачи семян с ЗКС является применение S-образного профиля разгона и торможения, который позволяет плавно сдвигать семена с места и разгонять до требуемой скорости, исключая повреждение стебля семени у основания корневой шейки, а также снижая риск разрушения кома почвы.

Глава 2. Математическое моделирование рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат. Во второй главе представлена разработанная конструкционно-технологическая схема системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия, включающая в себя 4 секции (рисунок 1):

I – в первой секции выполняются следующие операции: перемещение захватного устройства к сеянцам, извлечение семян из ячеек, доставка семян в секцию II;

II – во второй секции выполняются следующие операции: перемещение семян в накопитель, подача семени в буферную емкость накопителя, подача семени из буферной емкости накопителя в чашу посадочного аппарата;

III – в третьей секции выполняются следующие операции: вертикальное перемещение кассеты с сеянцами по транспортеру на площадку, горизонтальное перемещение кассеты в зону I толкателем;

IV – в четвертой секции выполняется сброс и хранение кассет после извлечения всех семян в секции I.

Для синхронной работы всех секций необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\begin{cases} t_{C1} < t_{C2} \\ kt_I < t_{C2} < nt_I \\ t_{C3.1} + t_{C4} < 2t_{C2} \\ t_{C3.2} < (2j - 1)t_{C2}, \end{cases} \quad (1)$$

где t_{Ci} – время работы i -той секции;

t_I – интервал времени прохождения чаш посадочного аппарата;

k – количество семян в ряду, шт., $k = 9$;

n – количество семян в накопителе;

j – количество рядов в кассете, $n = 9$.

В данной системе интервал времени t_I является ключевым фактором, который определяет время циклов всех секций. При этом t_I в свою очередь зависит от таких характеристик, как рабочая скорость агрегируемого трактора и шаг посадки. Количество семян в накопителе n позволяет варьировать временем работы секции I, t_{C1} .

Система подачи семян оснащена 10 кассетами, каждая из которых вмещает до 81 семя. Следовательно, лесопосадочная машина, оснащённая данной системой, способна осуществлять механизированную посадку без перезарядки до 810 семян.

Для определения характеристик системы на всех этапах движения механизмов за основу приняты функции, описывающие симметричный S-образный профиль разгона и замедления, который позволит плавно стронуть семена с места, разогнать до требуемой скорости и плавно снизить скорость до нуля.

Полученная общая зависимость изменения скорости при движении элементов системы от начальной до конечной точки представлена в виде

кусочно-заданной функции

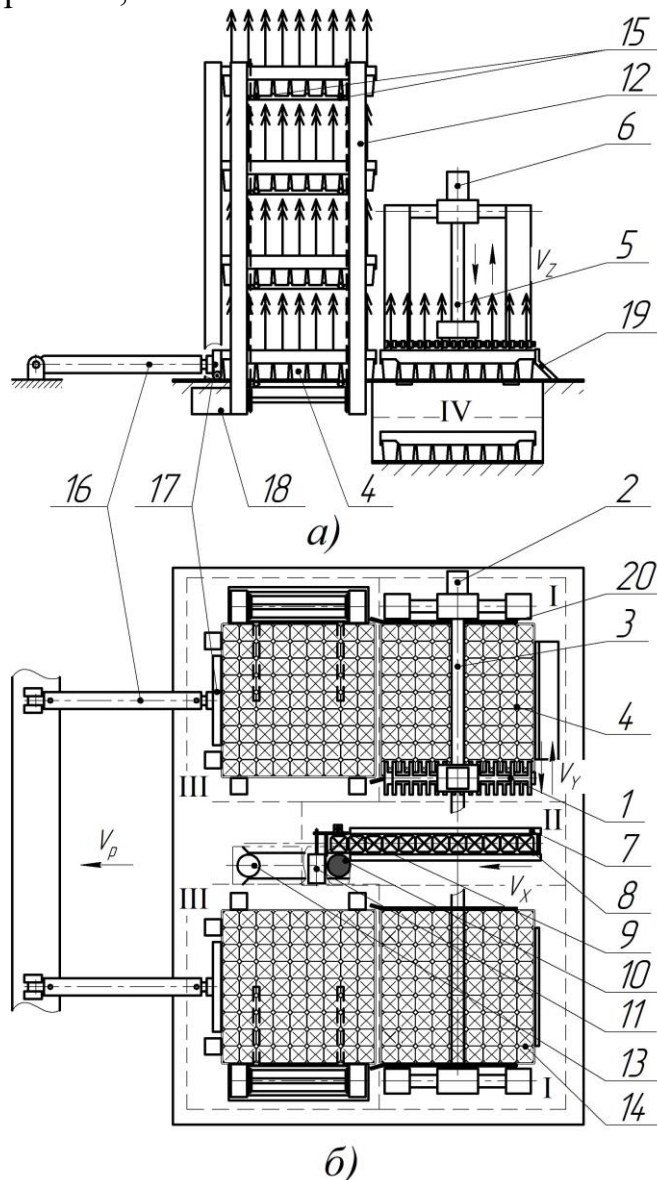
$$V(t) = \begin{cases} \frac{y_{m.a}}{t_a} \left(\sin \left(\pi \left(\frac{t}{t_a} - \frac{1}{2} \right) \right) + 1 \right), & \text{если } 0 \leq t \leq t_a, \\ \frac{2y_{m.a}}{t_a}, & \text{если } t_a < t < t_a + t_c, \\ \frac{y_{m.d}}{t_d} \left(\sin \left(\pi \left(\frac{t}{t_d} - \frac{3}{2} \right) \right) + 1 \right), & \text{если } t_a + t_c \leq t \leq t_a + t_c + t_d, \end{cases} \quad (2)$$

где $y_{m.a}$ и $y_{m.d}$ – перемещения при ускорении и замедлении соответственно;

t_a – время ускорения от нуля до максимальной скорости, с;

t_d – время замедления от максимальной скорости до нуля, с;

t_c – интервал времени, где механизм захвата движется с постоянной скоростью, с.



- 1 – захватное устройство;
- 2 – двигатель привода механизма захвата (ось Y);
- 3 – направляющая (ось Y);
- 4 – кассета с сеянцами ЗКС;
- 5 – направляющая (ось Z);
- 6 – двигатель привода механизма захвата (ось Z);
- 7 – накопитель;
- 8 – конвейер;
- 9 – оптический датчик;
- 10 – буферная емкость накопителя;
- 11 – толкатель сеянцев;
- 12 – вертикальный цепной конвейер;
- 13 – чаша посадочного аппарата;
- 14 – кассета;
- 15 – профильные опоры;
- 16 – цилиндр;
- 17 – толкатель кассет;
- 18 – двигатель привода механизма подачи кассет;
- 19 – ограничитель;
- 20 – направляющие

Рисунок 1 – Общая схема разрабатываемой системы подачи сеянцев в лесопосадочный аппарат: а) вид спереди, б) вид сверху

Для определения ускорений при перемещении элементов системы были продифференцированы уравнения скорости, построена кусочно-заданная функция, позволяющая определять ускорение при движении со скоростью $V(t)$ от начальной до конечной точки

$$a(t) = \begin{cases} \frac{\pi \cdot y_{m.a} \cdot \cos \left[\pi \left(\frac{t}{t_a} - \frac{1}{2} \right) \right]}{t_a^2}, & \text{если } 0 \leq t \leq t_a, \\ 0, & \text{если } t_a < t < t_a + t_c, \\ \frac{\pi \cdot y_{m.d} \cdot \cos \left[\pi \left(\frac{t - (t_a + t_c)}{t_d} - \frac{3}{2} \right) \right]}{t_d^2}, & \text{если } t_a + t_c \leq t \leq t_a + t_c + t_d, \end{cases} \quad (3)$$

Сила инерции определялась по формуле

$$F_i = m_i a_i. \quad (4)$$

Для определения перемещений элементов системы были проинтегрированы уравнения скорости, построена кусочно-заданная функция, позволяющая определять перемещение при движении со скоростью $V(t)$ от начальной до конечной точки

$$y(t) = \begin{cases} -\frac{y_{m.a} \sin \left(\frac{\pi \cdot t}{t_a} \right) - \frac{\pi \cdot y_{m.a} \cdot t}{t_a}}{\pi}, & \text{если } 0 \leq t \leq t_a, \\ -\frac{y_{m.a} \sin(\pi) - \pi \cdot y_{m.a}}{\pi} + 2 \cdot y_{m.a} (t - t_a), & \text{если } t_a < t < t_a + t_c, \\ -\frac{y_{m.a} \sin(\pi) - \pi \cdot y_{m.a}}{\pi} + 2 \cdot y_{m.a} \cdot t_c + \frac{y_{m.d} \sin \left(\frac{\pi \cdot (t - t_a - t_c)}{t_d} \right)}{\pi} + \\ + \frac{y_{m.d} \cdot (t - t_a - t_c)}{t_d}, & \text{если } t_a + t_c \leq t \leq t_a + t_c + t_d, \end{cases} \quad (5)$$

Выражения (2)-(5) в совокупности представляют собой основу математической модели процесса подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины на каждом этапе. Более подробное описание математической модели представлено в диссертационной работе.

Усилие, необходимое для извлечения семян из ячейки определялось по следующей формуле

$$F_H = F_{TP} + F_T + N_{Kop} + F_{z.1}, \quad (6)$$

где F_{TP} – сила трения, Н;

F_T – сила тяжести семянца, Н;

N_{Kop} – суммарное значение продольных сил корней, оказывающих сопротивление при извлечении семянца из кассеты, Н;

$F_{z,1}$ – сила инерции сеянца, Н.

Выполнено моделирование рабочих процессов системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат, которое осуществлялось в математической программе Mathcad. По результатам моделирования получены характеристики работы первой секции при заданной производительности лесопосадочной машины.

Варьируемыми параметрами, оказывающими влияние на продолжительность цикла работы первой секции, являются: рабочая скорость лесопосадочной машины (V_p), шаг посадки (S), количество сеянцев в накопителе (n). На рисунке 2 представлена зависимость максимальной скорости перемещения захвата к последнему ряду сеянцев от рабочей скорости лесопосадочной машины и шага посадки при $n = 14$.

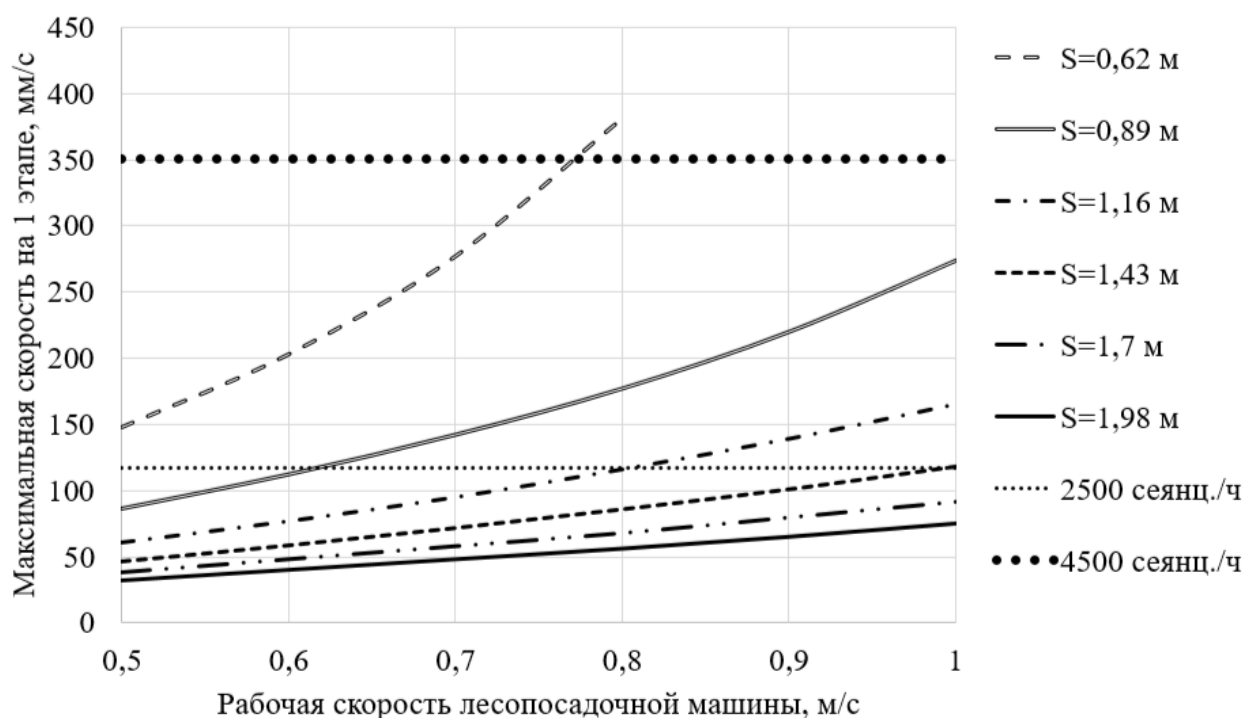


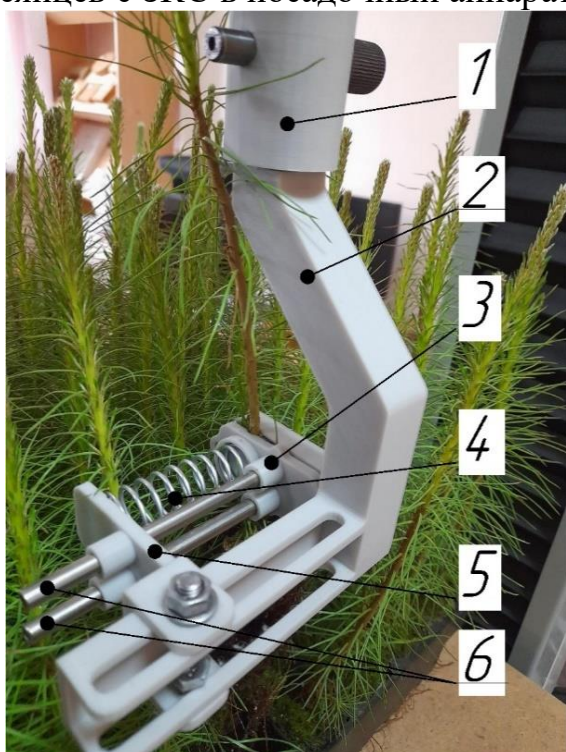
Рисунок 2 – Зависимость максимальной скорости перемещения захвата по оси у от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при $n = 14$

Ограничивающими производительность работы механизма захвата сеянцев факторами являются: скорость перемещения механизма захвата по оси Z (200 мм/с) и Y (723 мм/с), а также максимальная рабочая скорость лесопосадочной машины (1,0 м/с). Ограничивающими производительность работы конвейерного механизма подачи сеянцев факторами являются ускорение сеянца (1839 мм/с^2) и максимальная рабочая скорость лесопосадочной машины (1,0 м/с).

Производительность лесопосадочной машины, оснащенной механизированной системой подачи сеянцев в посадочный аппарат лесопосадочной машины, варьируется в зависимости от шага посадки и рабочей скорости от 952 до 4181 сеянц./ч.

Глава 3. Экспериментальные исследования рабочих процессов подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат. В третьей главе диссертационной работы был проведен анализ рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия.

Представлено описание лабораторной установки для извлечения семян из кассет и твердотельной модели системы подачи семян в лесопосадочный аппарат, описание захватного устройства для семян с ЗКС (рисунок 3), представлена характеристика семян с ЗКС, порядок и последовательность проведения экспериментов, методика определения силы извлечения семян и характеристик системы подачи. В ходе многофакторного эксперимента путем регрессионного анализа были определены характеристики системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат.



1 – втулка-крепление; 2 – основание захвата; 3 – прижимная пластина;
4 – пружина;
5 – регулировочная пластина;
6 – направляющие

Рисунок 3 – Захватное устройство для семян с ЗКС

На основании литературных источников и теоретических расчетов было установлено, что ключевыми факторами, оказывающими влияние на рабочие характеристики системы подачи, являются: рабочая скорость лесопосадочной машины (V_p), шаг посадки (S), количество семян в накопителе (n). Входные и выходные параметры представлены в виде входных факторов X и выходных параметров Y в таблице 1.

По результатам многочисленных поисковых экспериментов установлены уровни и шаги изменения входных параметров.

Математическая обработка выполнялась с использованием пакета программы **STATGRAPHICS® Centurion**.

Зависимость каждого выходного параметра от переменных факторов аппроксимировали полиномами третьей степени общего вида:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{22} X_2^2 + b_{23} X_2 X_3 + b_{33} X_3^2 + b_{112} X_1^2 X_2 + b_{113} X_1^2 X_3 + b_{122} X_1 X_2^2 + b_{123} X_1 X_2 X_3 + b_{133} X_1 X_3^2 + b_{223} X_2^2 X_3 + b_{233} X_2 X_3^2 \quad (7)$$

Проведен регрессионный анализ для оценки влияния величины шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества семян в накопителе на характеристики системы подачи семян с ЗКС в посадочный

аппарат лесопосадочной машины. Были построены поверхности откликов в зависимости от количества семян в накопителе.

Таблица 1 – Факторы активного многофакторного эксперимента

Параметр	Обозначение	
	натуральное	нормализованное
Входные (управляемые факторы)		
Шаг посадки, м	S	X_1
Рабочая скорость лесопосадочной машины, м/с	V_p	X_2
Количество семян в накопителе	n_n	X_3
Выходной параметр (контролируемый фактор)		
Первая секция		
Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян, мм/с	$V_{\Sigma 1}$	Y_1
Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян, мм/с ²	$a_{\Sigma 1}$	Y_2
Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян, мм/с	$V_{\Sigma 3}$	Y_3
Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян, мм/с ²	$a_{\Sigma 3}$	Y_4
Вторая секция		
Максимальная скорость перемещения семян в накопителе, мм/с	$V_{\Sigma 1}$	Y_5
Максимальное ускорение семян при перемещении в накопителе, мм/с ²	$a_{\Sigma 1}$	Y_6
Общий параметр		
Производительность, семян./ч	P	Y_7

Результаты эксперимента.

Первая секция. Рисунок 4 показывает, как изменяется максимальная скорость на первом этапе перемещения механизма захвата в зависимости от входных параметров: шага посадки S , рабочей скорости лесопосадочной машины V_p , количества семян в накопителе n .

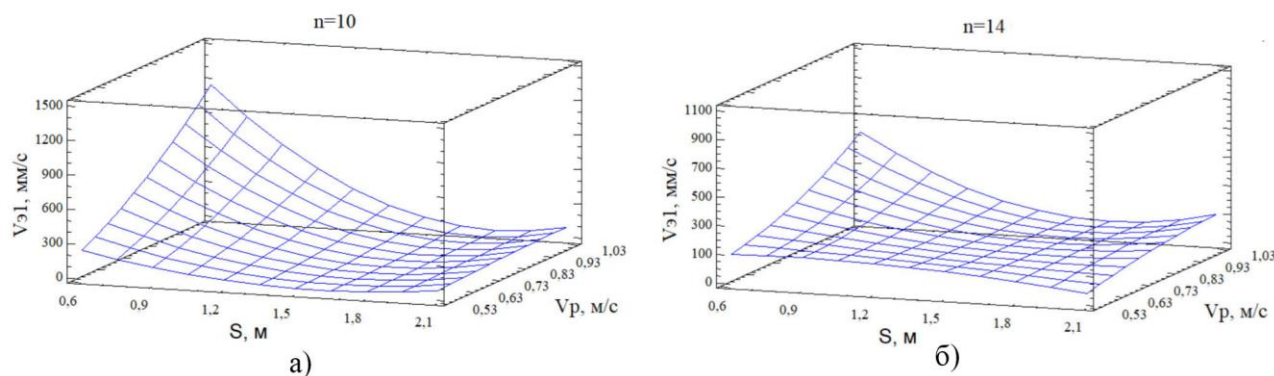


Рисунок 4 – Зависимость максимальной скорости механизма захвата (при перемещении к последнему ряду семян) от шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества семян в накопителе при (а) $n = 10$, (б) $n = 14$

Установлено, что изменения выходных параметров первой секции имеют схожий характер. Влияние рабочей скорости лесопосадочной машины усиливается по мере уменьшения шага посадки. При шаге посадки 1,98 м повышение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с приводит к увеличению выходных параметров первой секции в диапазоне от 2,11 до 2,36 раз. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту выходных параметров первой секции в диапазоне от 3,88 до 13,37 раз. Это связано с тем, что при уменьшении шага посадки сокращается расстояние между рабочими органами, что уменьшает время цикла. Кроме того, повышение рабочей скорости лесопосадочной машины также снижает время цикла, усиливая эффект.

При увеличении количества семян в накопителе наблюдается снижение значений выходных параметров первой секции при прочих равных условиях. Например, при шаге посадки 0,62 м и рабочей скорости лесопосадочной машины 1 м/с выходные параметры первой секции уменьшаются в диапазоне от 2,31 до 5,31 раз. Это объясняется тем, что увеличение числа семян в накопителе приводит к повышению времени рабочего цикла первой секции.

Вторая секция. Рисунок 5 показывает, как изменяются выходные параметры второй секции в зависимости от входных параметров: шага посадки S , рабочей скорости лесопосадочной машины V_p .

Количество семян в накопителе n не влияет на выходные параметры второй секции. Это связано с тем, что транспортер накопителя работает в непрерывном режиме, обеспечивая бесперебойную работу лесопосадочной машины.

Согласно представленным графикам, изменение выходных параметров второй секции носит схожий с первой секцией характер. Влияние рабочей скорости лесопосадочной машины усиливается с уменьшением шага посадки. При шаге посадки 1,98 м повышение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с приводит к увеличению выходных параметров второй секции в диапазоне от 3,00 до 3,69 раз. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту выходных параметров второй секции в диапазоне от 3,41 до 11,70 раз.

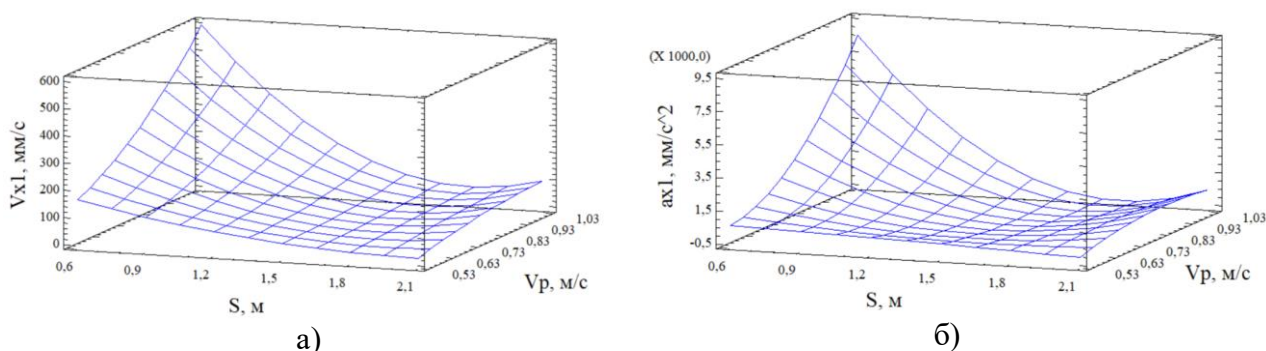


Рисунок 5 – Зависимость максимальной скорости перемещения семян в накопителе (а) и ускорения семян при перемещении в накопителе (б) от шага посадки и рабочей скорости лесопосадочной машины

Производительность лесопосадочной машины

Рисунок 6 показывает, как изменяется производительность лесопосадочной машины в зависимости от входных параметров: шага посадки S , рабочей скорости лесопосадочной машины V_p .

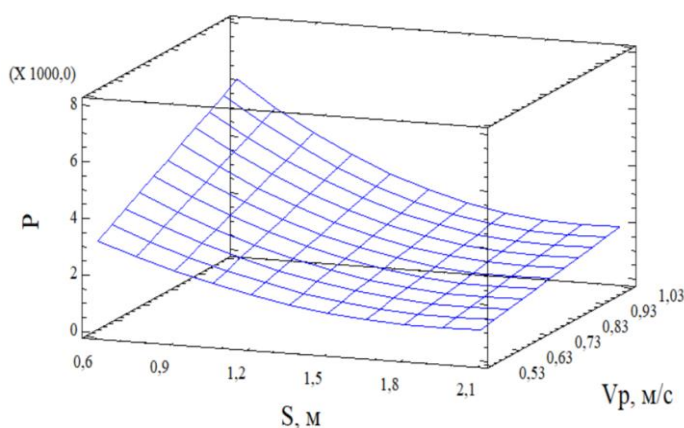


Рисунок 6 – Зависимость производительности лесопосадочной машины от шага посадки и рабочей скорости

Количество семян в накопителе n не влияет на производительность. Это связано с тем, что входной параметр n регулирует выходные параметры первой секции и не влияет на общую производительность лесопосадочной машины.

При шаге посадки 1,98 м повышение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с приводит к увеличению производительности от 964 до 1818 семян/ч. В то же время при минимальном шаге

посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту производительности от 3077 до 5806 семян в час.

Процесс извлечения семян из ячеек кассеты

По результатам проведённых лабораторных испытаний были получены зависимости усилия извлечения семени из ячейки от перемещения последнего для каждого опыта и максимальные значения усилия при извлечении семян.

Согласно полученным данным наибольшие значения усилия, необходимого для извлечения семян из ячеек, приходится на вариант эксперимента без обрезки корней с толкателем высотой 15 мм – 24,1 Н. Наименьшее значение усилия наблюдается при максимальном значении высоты толкателя и предварительной обрезки корней семян – 16,56 Н, что меньше наибольшего значения на 31 %. Применение толкателя высотой 5 мм в совокупности с обрезкой корней обеспечивает снижение усилия извлечения на 8,5 % с 20,48 до 18,73 Н, а использование толкателя высотой 10 мм снижает усилие почти на 13 % до 17,83 Н. Вместе с тем применение толкателей без обрезки корней показало низкую эффективность: усилие извлечения не только не уменьшается, но и возрастает. При применении толкателя высотой 15 мм в среднем усилие увеличивалось с 22,6 до 24,1 Н. А применение толкателей высотой 5 и 10 мм без обрезки корней вообще не имело достоверных различий изменения усилия в сравнении с сеянцами, извлеченными без толкателей. В целом эксперименты с варьированием высоты толкателя при необрезанных с внешней стороны дна кассеты корнях показали, что использование толкателей из-за защемления корней не оказывает существенного влияния на величину максимального усилия извлечения семени из ячейки. При этом использование толкателей высотой более 15 мм приводило к значительному наклону стебля семени от его начального положения, что усложняет позиционирование

захватного устройства при извлечении сеянца и может привести к его повреждению.

Определение оптимальных режимов работы системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины

В целях установления оптимальных режимов работы лесопосадочной машины, оснащенной системой подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат, был использован метод обобщенного (средневзвешенного) параметра оптимизации выходных параметров.

Для определения оптимальных режимов на основании предварительных опытов были выбраны следующие параметры: максимальная скорость механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда сеянцев (Y_3), максимальное ускорение сеянцев при перемещении в накопителе (Y_6), производительность системы подачи (Y_7).

С помощью регрессивного анализа на основе функций обобщенного параметра оптимизации от выходных факторов процесса подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины $W=f(x_1, x_2, x_3)$ получается уравнение регрессии, имеющее следующий вид:

$$W_g = 8,131 - 6,765X_1 - 18,311X_2 - 0,035X_3 + 1,06X_1^2 + 15,173X_1X_2 + 8,616X_2^2 - 2,12X_1^2X_2 - 5,264X_1X_2^2 \quad (8)$$

Аксонметрические изображения поверхностей откликов представлены на рисунке 7. Оптимальные режимы работы лесопосадочной машины представлены в таблице 2.

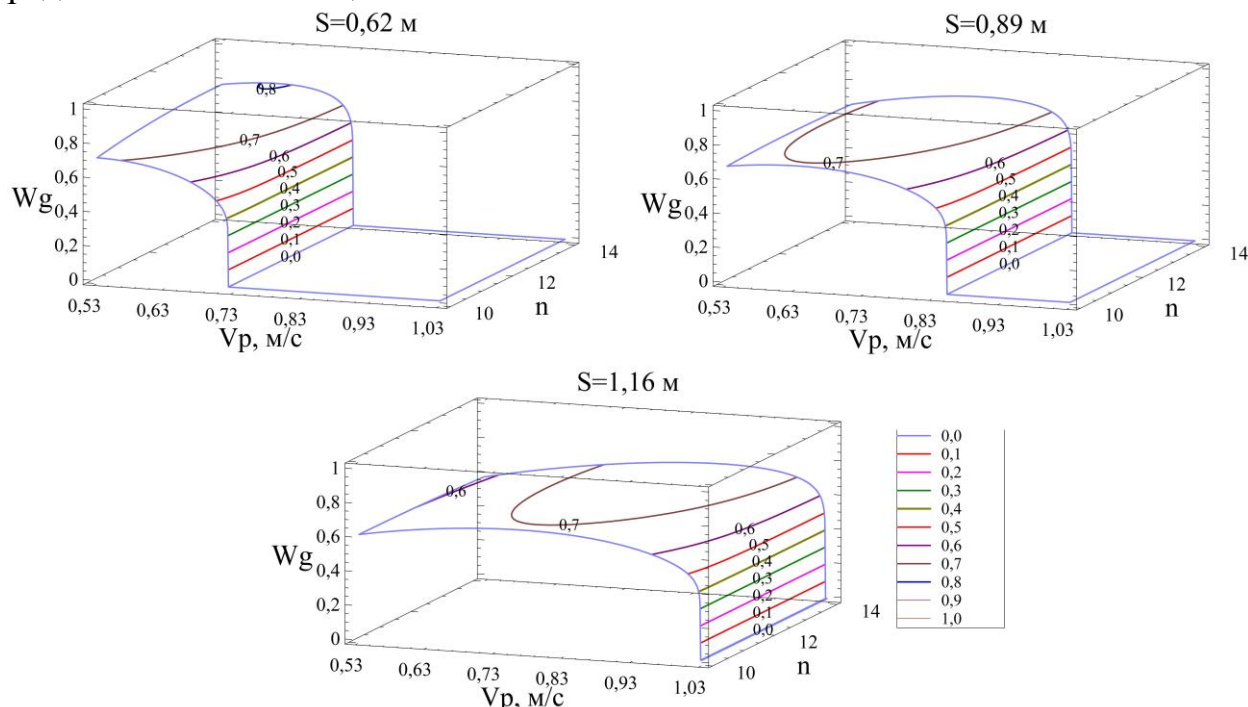


Рисунок 7 – Зависимость обобщенного параметра оптимизации W_g от шага посадки (0,62; 0,89; 1,16), рабочей скорости лесопосадочной машины и количества сеянцев в накопителе

Таблица 2 – Оптимальные режимы работы лесопосадочной машины

Шаг посадки, S , м	Рабочая скорость лесопосадочной машины, V_p , м/с	Количество семян в накопителе	Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян, $V_{зз}$, мм/с	Максимальное ускорение семян при перемещении в накопителе, $a_{кл}$, мм/с ²	Производительность лесопосадочной машины, P , семян/ч
0,62	0,61	14	150	1002	3542
0,89	0,73	14	112	570	2953
1,16	0,87	14	98	440	2700
1,43	1	14	88	362	2517
1,70	1	14	70	228	2118
1,98	1	14	57	155	1818

Глава 4. Технико-экономическое обоснование системы подачи семян с ЗКС. В данной главе определены затраты на изготовление системы подачи с ЗКС, экономическая эффективность внедрения разработанной системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия.

За показатель экономической эффективности принимались затраты, связанные с заменой ручного труда в результате внедрения разработанной системы подачи семян с закрытой корневой системой в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия.

Согласно проведенным расчетам наибольшие затраты на ручные операции приходится на посадку семян с ЗКС ручным способом и составляет 7,88 руб. за сеянец, что соответствует 15756 руб. за гектар. При этом производительность ручной посадки на одного человека достаточно низкая и составляет в среднем 800 семян в час.

Оплата ручного труда при посадке машинами дискретного действия составляет 5,18 руб. за сеянец, что соответствует 10350,6 руб. за гектар. При этом производительность составляет 2000, что в 2,5 раза превышает производительность ручного труда.

Стоимость затрат на ручной труд по извлечению, упаковке и подаче семян в лесопосадочный аппарат составил 2,74 руб. за один сеянец, а за высадку одного гектара – 5486 руб. При максимально интенсивной работе лесопосадочной машины с производительностью 13,216 тыс. семян за смену в течение весеннего и осеннего периодов годовая экономия на замену ручного труда (извлечение семян из ячеек кассет с последующей упаковкой, подача или загрузка семян в посадочный аппарат лесопосадочной машины) механизированной системы подачи может достигать 1,57 млн руб., что позволит окупить разработанную систему подачи семян в посадочный аппарат за 1,23 года (менее, чем за 3 периода) или за 542 га высаженных семян.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного анализа существующих технологий, методов и технических решений механизированной посадки семян с ЗКС установлено:

- механизированная посадка семян с ЗКС в России в основном выполняется машинами непрерывного действия с ручной подачей семян в посадочный аппарат, что ограничивает скорость и производительность работы, а также приводит к пропускам семян в процессе посадки;

- современные зарубежные системы подачи семян с ЗКС для лесопосадочных машин дискретного действия имеют ряд недостатков: ручную загрузку оператором, сложность извлечения семян без повреждений, ограниченный объем накопителя и цикличность подачи из-за остановок для пополнения запаса семян;

- для повышения эффективности лесопосадочных работ необходимо усовершенствовать машины непрерывного действия, внедрив механизированную систему подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат непосредственно из кассет, что обеспечит бесперебойный рабочий цикл без остановок и позволит исключить ручной труд оператора, обеспечив минимизацию или полную ликвидацию пропусков;

- более технологичным вариантом для разработки механизированной системы подачи семян с ЗКС является применение S-образного профиля разгона и торможения, который позволит плавно стронуть семена с места и разогнать до требуемой скорости, исключая повреждение стебля семени у основания корневой шейки, а также снижая риск разрушения кома почвы.

2. Разработана конструкционно-технологическая схема механизированной системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия.

3. Разработана математическая модель рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины, позволяющая определить наилучшие характеристики системы исходя из технологических и технических возможностей исполнительных механизмов и устройств.

4. По результатам математического моделирования получены и обоснованы основные характеристики механизированной системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия, позволяющие повысить производительность лесопосадочной машины на 67,2 %, которая варьируется в зависимости от шага посадки и рабочей скорости от 952 до 4181 семян в час.

5. В результате проведенных экспериментальных исследований процесса извлечения семян из ячеек кассет установлено:

- максимальное усилие, возникающее при извлечении семени из ячейки кассеты, не превышает 25 Н;

- наибольшее влияние на величину усилия извлечения семени из ячейки оказывает продольная сила корней. В то время, как сила трения и тяжести

сеянца суммарно составляют не более 4,3 % от общего усилия;

- использование толкателей без обрезки корней нецелесообразно, поскольку не обеспечивается снижение усилия на извлечение сеянца;

- нет необходимости усложнять технологический процесс дополнительными операциями, такими как обрезка и предварительное выталкивание кома из ячеек, поскольку сеянцы не получают повреждений при извлечении и без подготовительных операций.

6. В ходе многофакторного эксперимента путем регрессионного анализа было исследовано влияние основных факторов процесса посадки сеянцев с ЗКС лесопосадочной машиной непрерывного действия на характеристики механизированной системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат. Установлены следующие оптимальные режимы работы лесопосадочной машины, оснащенной системой подачи:

- количество сеянцев в накопителе – 14;
- скорость лесопосадочной машины при шаге посадки 0,62 м – 0,61 м/с;
- скорость лесопосадочной машины при шаге посадки 0,89 м – 0,73 м/с;
- скорость лесопосадочной машины при шаге посадки 1,16 м – 0,87 м/с;
- скорость лесопосадочной машины при шаге посадки 1,43 м – 1,0 м/с;
- скорость лесопосадочной машины при шаге посадки 1,70 м – 1,0 м/с;
- скорость лесопосадочной машины при шаге посадки 1,98 м – 1,0 м/с.

7. В результате проведенного технико-экономического обоснования с учетом повышения производительности и исключения ручного труда на технологических операциях по извлечению сеянцев из кассеты и подаче в посадочный аппарат, срок окупаемости механизированной системы подачи сеянцев в посадочный аппарат составляет 1,23 года (менее, чем за 3 периода) или за 542 га высаженных сеянцев.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Черник, К. Н. Анализ производительности машин дискретного действия, применяемых для механизированной посадки сеянцев с закрытой корневой системой / **К. Н. Черник**, В. А. Лозовой // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 1. – С. 136-144 (автора 0, 28 п.л.).

2. Черник, К. Н. Обоснование рабочей скорости лесопосадочной машины для сеянцев с закрытой корневой системой / **К. Н. Черник**, С. Г. Елисеев // Хвойные бореальной зоны. – 2025. – Т. 43, № 1. – С. 85-91 (автора 0, 22 п.л.).

3. Черник, К. Н. Экспериментальные исследования по определению максимального усилия по извлечению сеянцев с закрытой корневой системой из ячейки кассеты / **К. Н. Черник**, С. Г. Елисеев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15, № 1(57). – С. 138-153 (автора 0, 5 п.л.).

В сборниках научных трудов и материалах конференций

4. Черник, К. Н. Исследование производительности машин дискретного действия / **К. Н. Черник** // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. участием). – Красноярск : СибГУ им. М.Ф.

Решетнева, 2024. – С. 145-146 (автора 0,125 п.л.).

5. Черник, К. Н. Анализ современных механизированных устройств для искусственного лесовосстановления / **К. Н. Черник** // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : сб. материалов по итогам XXX Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2024. – С. 97-99 (автора 0,18 п.л.).

6. Черник, К. Н. Методы точечной подготовки почвы при механизированной посадке сеянцев с закрытой корневой системой машинами дискретного действия / **К. Н. Черник**, Д. В. Черник // Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития : материалы Всерос. науч.-практ. конф., / Отв. редактор А. А. Платонов. – Воронеж : ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 143-146 (автора 0,125 п.л.).

7. Черник, Д. В. Разработка модели лесопосадочной трубы в КОМПАС 3D / Д. В. Черник, **К. Н. Черник** // 3D технологии в решении научно-практических задач : сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 196-199 (автора 0,125 п.л.).

8. Черник, К. Н. Опыт механизированной посадки сеянцев с закрытой корневой системой и возможности его использования на территории лесничеств Красноярского края / **К. Н. Черник**, Д. В. Черник // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сб. статей X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием.— Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 324-328 (автора 0,15 п.л.).

9. Черник, К. Н. Технология ручной посадки сеянцев с закрытой корневой системой посадочной трубой / **К. Н. Черник**, В. А. Лозовой // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сб. статей X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 329-331 (автора 0,09 п.л.).

10. Черник, К. Н. Обзор исследований производительности механизированной посадки сеянцев с закрытой корневой системой / **К. Н. Черник**, Д. В. Черник // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России : материалы XIX Всерос. (нац.) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Екатеринбург : УГЛУ, 2023. – С. 368-372 (автора 0,15 п.л.).

11. Черник, К. Н. Анализ посадочных аппаратов лесопосадочных машин / **К. Н. Черник**, Д. В. Черник // Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития : материалы Всерос. науч.-практ. конф. / Отв. редактор А. А. Платонов. – Воронеж : ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 76-80 (автора 0,15 п.л.).

12. Chernik, K. N. Reviewing forest planting machines for mechanized planting of seedlings / **K. N. Chernik** // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2023. – No. 22. – P. 273-275 (автора 0,18 п.л.).