

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

«Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнева»

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук – Елисеев С.Г.

Красноярск – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 4  |
| ГЛАВА 1. МЕХАНИЗИРОВАННАЯ ПОСАДКА СЕЯНЦЕВ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ.....  | 10 |
| 1.1. Состояние вопроса.....  | 10 |
| 1.2. Конструкции систем подачи семян с закрытой корневой системой в посадочный аппарат.....  | 13 |
| 1.3. Обзор исследований технологического процесса подачи семян с закрытой корневой системой в посадочный аппарат.....                          | 17 |
| Выводы по первой главе .....   | 23 |
| ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ СЕЯНЦЕВ С ЗКС В ПОСАДОЧНЫЙ АППАРАТ .....                                | 25 |
| 2.1. Разработка конструктивно-технологической схемы системы подачи семян в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия..... | 25 |
| 2.2. Разработка математической модели процессов извлечения семян из ячеек кассеты и подачи в накопитель.....                                   | 30 |
| 2.3. Разработка математической модели процессов перемещения семян в накопителе и сброса в буферную емкость.....                                | 44 |
| 2.4. Моделирование рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат.....  | 47 |
| 2.4.1. Захватный механизм.....   | 48 |
| 2.4.2. Накопитель .....  | 61 |
| Выводы по второй главе .....   | 65 |
| ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ СЕЯНЦЕВ С ЗКС В ПОСАДОЧНЫЙ АППАРАТ .....                                      | 67 |
| 3.1. Цель и задачи исследования .....  | 68 |
| 3.2. Методика проведения эксперимента .....  | 68 |
| 3.2.1. Описание твердотельной модели системы подачи семян в лесопосадочный аппарат.....  | 68 |
| 3.2.2. Описание экспериментальной установки для извлечения семян из ячеек кассет .....   | 69 |
| 3.2.3. Описание захватного устройства для семян с ЗКС.....   | 71 |
| 3.2.4. Характеристики семян с ЗКС и высота толкателей .....  | 72 |
| 3.2.5. Порядок проведения эксперимента .....   | 74 |
| 3.3. Планирование проведения эксперимента .....  | 80 |
| 3.4. Результаты экспериментальных исследований .....   | 83 |
| 3.5. Определение оптимальных режимов работы системы подачи семян с ЗКС в   |    |

|  |     |
|--|-----|
| посадочный аппарат лесопосадочной машины .....   | 95  |
| Выводы по третьей главе .....  | 99  |
| ГЛАВА 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ<br>СЕЯНЦЕВ С ЗКС.....  | 101 |
| 4.1 Определение затрат на изготовление системы подачи семян с ЗКС .....  | 101 |
| 4.2. Экономическая эффективность внедрения разработанной системы подачи семян с<br>ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия..... | 104 |
| Выводы по четвертой главе .....  | 108 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....  | 109 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....   | 112 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А.....  | 125 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....   | 134 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В.....  | 139 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....   | 145 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....  | 146 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....  | 147 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....  | 149 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Согласно Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 года ключевой задачей является воспроизводство лесов за счет превышения темпов роста площади лесовосстановления и лесоразведения к площади вырубленных и погибших лесных насаждений в базовом и стратегическом сценариях.

В связи с этим в Российской Федерации активно внедряются прогрессивные методы искусственного лесовосстановления, в частности, посадка сеянцев с закрытой корневой системой (ЗКС). В соответствии с национальным проектом к 2030 году до 45 % площадей искусственного лесовосстановления должно воспроизводиться сеянцами с ЗКС.

В настоящее время существует большое количество лесопосадочных машин для посадки сеянцев, конструкция каждой из которых, зависит от конкретных задач и условий эксплуатации. Все они обладают общим технологическим процессом, состоящим из подготовки посадочного места, подачи в него посадочного материала и заделки корневой системы почвой. Как следствие, лесопосадочные машины имеют одинаковую схему и последовательность выполнения основных операций рабочих органов. В результате чего им свойственны следующие недостатки: подача сеянцев осуществляется оператором, который лимитирует производительность лесопосадочной машины; возникновение пропусков при посадке и отсутствие механизированной системы подачи посадочного материала.

Механизированная посадка сеянцев с ЗКС на территории России почти не применяется, поскольку отечественная промышленность практически не выпускает подобную технику. Очевидно, что лесопосадочные машины для сеянцев с ЗКС отечественного производства должны быть невысокой стоимости, простыми в эксплуатации и обслуживании, не требующие высокой квалификации рабочего персонала. Исходя из вышесказанного повышение эффективности лесопосадочных работ на основе внедрения

механизированной системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины является актуальной темой.

**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 объема лесопосадочных работ сеянцами с ЗКС, назрела необходимость перейти к машинам, оборудованным механизированными подающими устройствами, заменяющими ручной труд сажальщиков, которые позволят увеличить производительность агрегатов и качество посадки, а также снизить уровень ручного труда, занятого в рабочем процессе лесопосадочных машин.

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

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

**Цель работы** состоит в разработке механизированной посадки семян с ЗКС лесопосадочной машиной непрерывного действия, включающей в себя разработку и внедрение эффективной системы подачи семян 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 конструкционно-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 конструкционно-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 сеянцев с ЗКС из кассет захватным механизмом;

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

**Методы исследования.** Научные исследования проводились при помощи методов дифференциального и интегрального исчислений, 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 сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия с характеристиками, позволяющими повысить производительность лесопосадочной машины до 67,2% и обеспечить отсутствие пропусков сеянцев с ЗКС в процессе посадки.

**Положения, выносимые на защиту:**

- конструкционно-технологическая схема системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия;
- математическая модель рабочих процессов системы подачи сеянцев 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 исчислений, 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.

**Структура работы.** Работа состоит из введения, четырех глав,

заключения, списка литературы из 100 наименований и 7 приложений. Текст работы изложен на 150 страницах, включая 48 рисунков и 19 таблиц.

**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.

# ГЛАВА 1. МЕХАНИЗИРОВАННАЯ ПОСАДКА СЕЯНЦЕВ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ

## 1.1. Состояние вопроса

Создание насаждений посадкой сеянцев с закрытой корневой системой (ЗКС) является прогрессивным направлением в лесовосстановлении. Сеянцы с ЗКС — это растения, полученные путем посева семян в брикеты, кассеты и другие емкости с субстратом. Корни сеянцев находятся внутри кома почвы и практически не подвержены повреждениям при посадке, в то время как сеянцы с открытой корневой системой (ОКС) более уязвимы к высыханию и механическим повреждениям, что может негативно сказаться на их приживаемости и дальнейшем росте. К преимуществам сеянцев с ЗКС относятся: снижение трудозатрат, высокая приживаемость и последующая сохранность, что позволяет оптимизировать посадку сеянцев [1-2].

В России механизированная посадка сеянцев с ОКС осуществляется лесопосадочными машинами преимущественно непрерывного действия. В процессе поступательного движения лесопосадочного агрегата образуется борозда, в которую подаются растения и, далее, производится заполнение борозды почвой с последующим уплотнением [1].

Известны и широко применяются в нашей стране лесопосадочные машины для посадки сеянцев с ОКС: СЛЧ-1, СЛНЧ-1, ССН-1, ЛПА-1, МУЛ-1, МПП-1, МЛУ-1А, ЛМД-81, СЛГ-1, МЛБ-1 и другие [3].

В работах Ghaffariyan M. R., Ersson B.T., Rantala J., Laine T, Hallonborg U, Hofsten H., Mattsson S, Saarinen V.-M., Linnea J. Hansson, Ryszard Tadeusiewicz [4-13] отмечается, что в странах Северной Европы, Бразилии, Австралии и Канаде механизированная посадка сеянцев с ЗКС осуществляется лесопосадочными машинами дискретного действия. С помощью специальной посадочной головки срезается необработанный участок почвы, оборачивается и прижимается к образовавшемуся микроповышению. Затем, с помощью посадочной трубы, в подготовленную

почву выталкивается сеянец, почва вокруг которого уплотняется под действием лесопосадочного устройства, что способствует надежному закреплению сеянца в земле. Наиболее распространенными машинами являются шведская Bracke и финские M-Planter и Risutec [14].

Как показал анализ научно-технической литературы, посадка сеянцев с ЗКС машинами дискретного действия имеет следующие недостатки: низкая производительность относительно машин непрерывного действия; высокая стоимость машин и оборудования для дискретной посадки, превосходящая стоимость машин непрерывного действия в десятки раз; высокие затраты при работе, обслуживании и хранении; управление машиной требует высокой квалификации оператора, что приводит к дополнительным финансовым затратам на заработную плату [14-17].

Уровень механизации лесопосадочных работ в РФ невысок и составляет 52-63 %. При этом уровень механизации ручного труда при обслуживании процесса механизированной посадки еще ниже и составляет около 25 %. В процессе выполнения работ лесопосадочной машиной участвуют один-два сажальщика и, в некоторых случаях, один оправщик [18,19]. К тому же труд сажальщика – это тяжелый и опасный труд. Он проходит в сложных климатических условиях (дождь, мокрый снег, низкая температура, ветер).

Посадка леса производится ранней весной, в сжатые агротехнические сроки. Это определяет парк лесопосадочных машин и штат обслуживающего персонала, в зависимости от объема посадки культур, поскольку производительность посадочного агрегата ограничена скоростью движения последнего не более 3 км/ч. Главной причиной столь малой скорости движения агрегата является ручная подача растений в захваты посадочного аппарата машины или непосредственно в посадочную борозду одним или двумя сажальщиками [20].

Академик В.П. Горячкин отмечал, что пределы скорости лесопосадочных машин ограничены, в первую очередь, самим человеком и

условиями работы [21-22]. Каждый человек имеет определенные пределы своих физиологических особенностей и возможностей, которые ограничивают быстроту его реакции. Установлено [1, 21-22], что в среднем время восприятия человеком простой информации и ее переработки равна 0,25-0,5 с, а время действия 0,15-0,3 с. При таких скоростях реакций работа является очень утомительной, и с каждым часом работы в течение смены темп подачи растений снижается.

С целью повышения рабочей скорости и производительности лесопосадочных машин предпринимались попытки улучшить условия работы сажальщиков и интенсифицировать их работу путем использования специальных приемных столиков; промежуточных транспортеров или увеличением времени нахождения захвата в зоне вкладывания растений [23]. Однако, все эти приемы оказались недостаточно эффективными и практически не приводили к увеличению частоты подачи растений.

С одной стороны, из-за ограничений человеческих возможностей сажальщики выступают фактором, ограничивающим повышение скорости и производительности лесопосадочных машин; с другой стороны, при внесении определённых технических усовершенствований лесопосадочные агрегаты могут работать с скоростью в 2-3 раза выше, чем машины с участием сажальщиков [1].

В настоящее время в Российской Федерации активно внедряются прогрессивные методы искусственного лесовосстановления посадкой сеянцев с ЗКС. Связано это с тем, что согласно приказу Минприроды России от 04.12.2020 №1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений», не менее 20% площадей искусственного и комбинированного лесовосстановления, проводимого на территории субъекта Российской Федерации, выполняется посадкой сеянцев и (или) саженцев с ЗКС. С 2025 года эта доля должна составлять не менее 30%, а с 2030 года — 45%.

Механизированная посадка сеянцев с ЗКС на территории Российской Федерации практически не применяется. Отечественная промышленность не выпускает подобную технику. Поэтому внедрение новых технологий в искусственном лесовосстановлении требует применения новых средств механизации при посадке сеянцев.

## **1.2. Конструкции систем подачи сеянцев с закрытой корневой системой в посадочный аппарат**

Сеянцы с ЗКС в большей степени отвечают критерию подготовленности к механизации процессов посадки их на лесокультурной площади. Такие сеянцы имеют определенную геометрическую форму кома почвы с постоянными размерными характеристиками, что позволяет использовать их для механизированной посадки. Прочность кома почвы и возможность поштучного свободного отделения их из ячеек кассет, поштучная подача в посадочный аппарат, упорядоченное размещение в буферной емкости накопителя дает возможность обеспечить непрерывность рабочего цикла посадки [24].

В настоящее время за рубежом широко применяются различные механизированные устройства, высаживающие сеянцы с ЗКС. Для посадки применяются комплексные машины, совмещающие подачу сеянцев в посадочный аппарат, подготовку почвы и посадку. Большинство зарубежных лесопосадочных машин оснащены механизированной системой подачи сеянцев в посадочный аппарат.

Скандинавские ученые Ghaffariyan M. R., Ersson B.T., Rantala J., Laine T. и др. отмечают, что лесопосадочные машины Bracke и M-Planter используют механизированную систему подачи сеянцев, где сеянцы с ЗКС загружаются вручную оператором из кассет в удерживающие лотки, а подача сеянцев происходит путем захвата растения специальным захватным устройством, которое удерживает ком почвы вместе с сеянцем, для

перемещения его в посадочную трубу. Стеллаж для хранения семян в таких лесопосадочных машинах установлен на базовой машине (харвестер или экскаватор) и вмещает около 2080 ед. посадочного материала (13 пластиковых лотков по 160 семян в каждом) [4-13].

Ученые стран Северной Европы, занимающиеся исследованиями в области механизированной посадки семян с ЗКС, отмечают, что такие лесопромышленные корпорации, как, Risutec Ltd. и UPM Forest, разработали автоматизированную систему подачи семян с ЗКС из кассет Risutec APC, которая вмещает более 1200 семян и прикреплена к одноблочному посадочному устройству. Семена автоматически извлекаются из ячеек кассет, избавляя оператора от необходимости вручную загружать их по одному. При загрузке стеллажа для хранения семян, посадочный материал в каждой ячейке должен быть вручную извлечен из кассет для выращивания с помощью толкателей, чтобы ослабить корневую систему. Посадочное устройство вмещает до 16 кассет на двух уровнях, что соответствует в общей сложности 1296 семенам [12].

Захватное устройство, расположенное в середине устройства Risutec APC, набирает одновременно из кассет (с левой и правой стороны по очереди) один ряд, состоящий из девяти единиц посадочного материала. После отбора девять семян загружаются в накопитель, в то время как вся машина остается неподвижной. Семена высаживаются по одному, и после посадки седьмого семени захватное устройство начинает набирать еще девять семян из кассет. После посадки девятого семени захватное устройство возвращается для пополнения запасов посадочного материала, а пока в это время машина формирует насыпи. Цикл посадки повторяется до тех пор, пока все кассеты не будут опорожнены или работа не будет завершена [12].

В Польше научно-промышленный консорциум под руководством ученых R. Tadeusiewicz, P. Tylek, F. Adamczyk, M. Pietrzykowski разработали лесопосадочного робота RoboFoR [25]. RoboFoR является самоходным транспортно-технологическим комплексом, предназначенным для посадки

сеянцев с ЗКС на территориях, не требующих специальной предварительной обработки почвы.

Конструкция поворотного стола RoboFoR вмещает в себя 15 кассет с сеянцами. Гнезда позиционирования кассет оснащены системой фиксации и позиционирующими планками, в результате чего положение кассеты в тот момент, когда из нее необходимо извлечь сеянец и перенести его в накопитель точно известно [25]. Вращающийся стол перемещает последующие кассеты под захват для сбора сеянцев. После того, как кассета опустеет, поворот стола вводит следующую кассету под захватное устройство, а пустая кассета перемещается в дальнейшее положение, откуда она будет изъята и заменена полной кассетой во время следующего перерыва в обслуживании, т. е. после того, как все 15 кассет будут опустошены.

Для решения ряда задач, связанных с лесовосстановлением, шведскими учеными L. Hansson, H. Lideskog, J. Manner и R. van Westendorp была разработана автономная машина Autoplant, ключевой частью которого является система автоматической подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат. Для подачи сеянцев используется система автоматической передачи из лотков Niko. Сеянцы доставляются из питомника напрямую и хранятся во встроенном модуле емкостью до 1500 штук [26].

Для захвата и перемещения сеянцев в посадочный аппарат Autoplant использует специализированное захватное устройство, интегрированное с манипулятором. Этот рабочий орган способен аккуратно брать сеянцы из накопителя и точно подавать их в посадочный аппарат, обеспечивая минимальное повреждение растений.

Исходя из приведенных конструктивных особенностей, технологический процесс подачи сеянцев состоит из следующих операций:

1. Загрузка сеянцев - сеянцы с ЗКС, выращенные в кассетах, загружаются вручную или с помощью захватного устройства в накопители, которые установлены на лесопосадочной машине. Во втором случае захватное устройство захватывает поштучно или рядами сеянцы из ячеек

кассет, удерживая ком почвы и корни. Для ослабления корневой системы иногда применяется предварительное выталкивание сеянцев из кассет толкателями.

2. Передача в накопитель - после извлечения сеянцы перемещаются в накопитель или промежуточную буферную емкость посадочного аппарата. Накопитель обеспечивает бесперебойный поток посадочного материала и позволяет осуществлять непрерывный рабочий цикл.

3. Подача в посадочный аппарат - из накопителя сеянец поштучно подается в посадочный аппарат с помощью захватного механизма или транспортного промежуточного элемента. Это сопровождается точной ориентировкой растения для правильного размещения на месте посадки.

Далее осуществляется посадка сеянца в грунт, а после чего цикл повторяется, обеспечивая постоянный темп посадки.

Современные лесопосадочные машины, применяемые за рубежом для посадки сеянцев с ЗКС, обладают рядом достоинств, таких как механизированная подача сеянцев и автоматизация рабочего процесса. Однако большинство из них являются устройствами дискретного действия, что ограничивает непрерывность посадочного цикла и снижает общую производительность [14, 15]. Кроме того, у существующих машин наблюдаются следующие недостатки: необходимость ручной загрузки сеянцев в лотки или кассеты оператором, сложность автоматического извлечения сеянцев без повреждения корневой системы, ограниченный объем накопителя посадочного материала, а также цикличность подачи, связанная с остановками машины для пополнения запасов сеянцев.

Для повышения эффективности лесопосадочного процесса необходимо усовершенствовать машины непрерывного действия путем внедрения систем подачи сеянцев с ЗКС, которые обеспечат бесперебойный рабочий цикл и исключат ручной труд оператора. Важным направлением является разработка механизмов захвата и подачи сеянцев прямо из кассет, а также увеличение емкости накопителей посадочного материала.

### **1.3. Обзор исследований технологического процесса подачи семян с закрытой корневой системой в посадочный аппарат**

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, M. Ramantswana, T. Laine, J. Rantala, B.T. Ersson, M. R Ghaffariyan.

Исследованиями в области технологического процесса подачи семян в посадочный аппарат занимались В.Ф. Мун, F. Adamczyk, M. Szychta, J. Wojciechowski, M. Danielak, S. Sobocki и др.

Польскими учеными S. Sobocki, F. Adamczyk, P. Tylek, M. Szaroleta, K. Zurowski, M. Kormanek, G. Szewczyk, S. Tabor, M. Zwierzyn'ski, M. Kaz'mierczak и J. Mac, при разработке автоматической машины для посадки семян с ЗКС RoboFoR, проведены исследования по определению усилия, необходимого для извлечения семян дуба, бука, сосны и ели из ячеек кассет [27-30].

Использовались два типа кассет для лиственных и хвойных пород деревьев на 28 и 40 ячеек. В зависимости от породы дерева высота семян, использованных в ходе исследования, варьировалась от примерно 0,08 м для сосны и ели до примерно 0,6 м для бука и дуба. Наибольшее значение силы вытягивания было определено: для семян дуба составило 18,84 Н, семян бука - 11,87 Н, семян сосны - 7,75 Н, семян ели - 6,67 Н. Наибольшие различия в силе воздействия наблюдались для семян лиственных пород, в частности дуба. Это связано с размером семян; в случае лиственных деревьев они гораздо крупнее и, следовательно, более разнообразны. По этой причине, а также из-за большей высоты кассет, для извлечения семени с комом почвы из ячейки кассеты требуются большие усилия, чем для хвойных семян [29].

Для извлечения сеянцев из ячеек кассет польские ученые использовали два захвата - угловой P7K20 производства Metal Work и параллельный MNK2-20D производства SMC, для которых были проведены испытания по измерению усилия, необходимого для извлечения сеянцев. В случае углового захвата максимальные значения усилия, удерживающего сеянец, достигало 20 Н, в случае параллельного захвата – 50 Н. Угловое расположение рычагов в угловом захвате позволяло захватывать сеянцы со всей поверхности кассеты, в то время как параллельный захват позволял захватывать только сеянец, который рос в центральной части кассеты. Этот аспект определил выбор углового захвата в качестве основы для разработки устройства подачи сеянцев для RoboFoR [27-30].

Дополнительно был определен интервал допустимых ускорений, действующих на сеянцы при перемещении последних в горизонтальной плоскости, которые варьируются от 15 до 30 м/с<sup>2</sup>. Также польскими учеными был разработан захватный механизм, позволяющий извлекать сеянцы с ЗКС из ячеек кассет по 5 растений. Чтобы синхронизировать процесс забора сеянцев из кассеты с процессом посадки, учеными был сконструирован буферный узел, принимающий сеянцы рядами и выдающий их в посадочный аппарат по одному [27-30].

Несмотря на то, что последние исследования польских учёных значительно продвинули разработку RoboFoR, механизированная подача сеянцев остается ключевой областью, требующей дальнейших технических решений и инноваций. Кроме того, не было исследовано влияние на усилие извлечения сеянцев из ячейки кассеты следующих факторов: наличие или отсутствие обрезки корней сеянцев и высота толкателей.

Шведские ученые компании Bracke Forest провели исследования и разработали захватное устройство для эффективного перемещения сеянцев с ЗКС из накопителя в посадочное устройство. В рамках исследований анализировались такие аспекты как, конструкция захватного устройства, обеспечивающая аккуратный и надежный захват сеянцев без повреждения

корневой системы; механизм движения по оси Z (вверх-вниз), который позволяет поднимать сеянец из кассеты-накопителя и опускать его в посадочную трубу посадочного аппарата; интеграция захватного устройства с манипулятором базовой машины, позволяющая обеспечить рациональное и точное размещение сеянцев в грунте; оценка эффективности и производительности работы захватного устройства в реальных условиях посадки, включая проверку скорости работы и качество посадки. Основное внимание во время исследований уделялось проектированию и наилучшим характеристикам захватного устройства [26]. Высокая стоимость и сложность систем являются ограничивающими факторами для широкого применения в лесном хозяйстве, в связи с чем необходима разработка более доступных и простых в обслуживании механизированных решений [31-33].

Зарубежные исследователи отмечают [27-30], что в большинстве случаев в качестве исполнительных органов механизированных систем подачи применяются сервоприводы и шаговые двигатели, которые обеспечивают высокие скорость и точность позиционирования. Точность позиционирования и время позиционирования являются основными критериями производительности для механизированных решений. Режимы ускорения и замедления, особенно режим замедления, оказывают влияние на работу системы, в том числе и на точность позиционирования.

Польские ученые, проведя ряд исследований и испытаний для RoboFoR, сделали выводы, что для повышения эффективности работы механизированной системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат требуется плавный разгон и торможение захватного устройства, что в свою очередь накладывает дополнительные условия к выбору комплектующих для проектирования механизированной системы. Резкий разгон может способствовать повреждению стебля сеянца у основания корневой шейки за счёт большой разности масс верхней и нижней частей растения, а также разрушению значительной части кома почвы. При чрезмерно плавном разгоне система не будет успевать подавать сеянцы в лесопосадочный

аппарат для достижения заявленной производительности [27-30].

На основании научных работ зарубежных исследователей, а в частности корейских ученых [34-54], можно сделать выводы, что 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, разогнать до требуемой скорости и плавно выйти на нужную скорость. При таком разгоне меньше изнашивается механика, за счёт плавного сцепления механических частей при разгоне и торможении [39-52]. Уравнения, описывающие S-образный профили разгона и торможения приведены в таблице 1.1. [54].

Таблица 1.1 Уравнения S-образного профиля разгона и торможения шагового двигателя

| Характеристики | Ускорение  | Замедление   |
|----------------|--|--|
| Симметричное   | $f_a(u) = \frac{V_m}{2} \left( \sin \left( \pi \left( u - \frac{1}{2} \right) \right) + 1 \right)$ | $f_d(u) = \frac{V_m}{2} \left( \sin \left( \pi \left( u - \frac{3}{2} \right) \right) + 1 \right)$ |
| Несимметричное | $f_a(u) = V_m \sin \left( \frac{\pi}{2} u \right)$   | $f_d(u) = \frac{V_m}{2} \left( \sin \left( \pi \left( u - \frac{3}{2} \right) \right) + 1 \right)$ |

В. Ф. Мун разработал математическую модель процесса посадки растений в посадочный аппарат, определил оптимальные значения рабочих скоростей посадочных машин по величине пропусков растений в захватах и обосновал конструктивную схему посадочного аппарата с накопительным устройством, где определены ее конструктивные характеристики и режимы работы [23]. Проведенные исследования В.Ф. Мун указывают на несовершенство конструкций существующих систем подачи лесопосадочных машин, а именно ручную подачу семян в посадочный аппарат, что ведет к низкому качеству механизированной посадки, особенно по величине пропусков растений [55].

Согласно исследованиям В. Ф. Муна ручное размещение семян в рабочие органы посадочного аппарата обуславливает случайный характер

интервала времени подачи семян [23].

Пропуск растений возникает вследствие запаздывания подачи семени в рабочий орган посадочного аппарата, то есть в случае не соблюдения условия:

$$t_R \leq t_I, \quad (1.1)$$

где  $t_R$  – время выполнения всех операций по размещению семени в захвате;

$t_I$  – интервал времени прохождения рабочих органов.

Интервал времени прохождения рабочих органов определяется по формуле:

$$t_I = \frac{S}{V_P}, \quad (1.2)$$

где  $S$  – шаг посадки, м;

$V_P$  – рабочая скорость посадочного агрегата, м/с.

Исходя из выражений (1.1) и (1.2) при заданном шаге посадки количество пропусков будет зависеть от выбранной рабочей скорости. С увеличением рабочей скорости повышается вероятность пропусков растений.

Рабочая скорость посадочного аппарата определяется зависимостью:

$$V_P = qS, \quad (1.3)$$

где  $q$  – средний темп подачи семян, шт/с.

Данная зависимость справедлива только при регулярном характере подачи семян и не отражает влияние скорости на величину пропусков растений, в то время как последнее является основным критерием выбора скоростного режима посадочного агрегата.

Для уменьшения количества пропусков семян в рабочих органах посадочного аппарата рабочая скорость устанавливается такой, чтобы интервал времени прохождения рабочих органов был больше

математического ожидания времени вкладывания ( $t_I > M_{tR}$ ). Причем, чем больше статистический разброс  $t_R$  тем меньше должна быть скорость. Это ведет к тому, что большую часть сеянцев оператор подает к месту вкладывания раньше подхода рабочего органа посадочного аппарата. Однако запас времени не используется для размещения очередного сеянца, а тратится на ожидание подхода рабочего органа посадочного аппарата.

Для снижения пропусков сеянцев автором [23] предлагалось ввести промежуточное устройство (накопитель) между оператором и посадочным аппаратом, которое позволяет аккумулировать некоторое количество сеянцев и обеспечивать их автоматическую подачу в посадочный аппарат.

Условием отсутствия пропусков сеянцев при посадке посадочным аппаратом с накопителем является соблюдение неравенства:

$$t_R \leq nt_I, \quad (1.4)$$

где  $n$  - число растений в накопителе.

Следовательно, накопитель позволяет снизить пропуски растений в захватах за счет запаса сеянцев.

Возможность нахождения в накопителе нескольких сеянцев одновременно практически исключает время ожидания подхода захвата. Это позволяет уменьшить интервал времени прохождения захватов до математического ожидания времени  $t_R$ , то есть повысить рабочую скорость посадочного агрегата [55].

Обзор исследований показывает, что процесс подачи сеянцев с ЗКС в посадочные аппараты — это сложный технический вызов, в котором достигнуты значительные успехи, однако повышение производительности и внедрение новых решений остаются актуальной задачей для повышения эффективности механизированной посадки.

## **Выводы по первой главе**

На основании анализа научно-технической литературы о механизированной посадке и особенностях технологического процесса подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат можно сделать следующие выводы:

1. Механизированная посадка семян с ЗКС на территории Российской Федерации осуществляется в основном машинами непрерывного действия. Отечественная промышленность выпускает подобную технику с ручной подачей семян в посадочный аппарат, что выступает фактором, ограничивающим повышение скорости и производительности лесопосадочных машин, а также способствует возникновению пропусков семян при посадке.

2. 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.

3. 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.

4. Установлено, что более технологичным вариантом для разработки механизированной системы подачи семян с ЗКС является применение S-образного профиля разгона и торможения, который позволит плавно

стронуть сеянцы с места и разогнать до требуемой скорости, исключая повреждение стебля сеянца у основания корневой шейки, а также снижая риск разрушения кома почвы.

## **ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ СЕЯНЦЕВ С ЗКС В ПОСАДОЧНЫЙ АППАРАТ**

### **2.1. Разработка конструкционно-технологической схемы системы подачи семян в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия**

В качестве базы для разработки системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат была выбрана лесопосадочная машина ZKT WOLF PRO предприятия ООО «Завод коммунальной техники» республики Беларусь, как наиболее адаптированная и технически проработанная машина для непрерывной посадки семян с ЗКС [56-62].

Условно конструкционно-технологическая схема разрабатываемой системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины разделена на 4 секции (рисунок 2.1):

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 ёмкость накопителя, подача семени из буферной ёмкости 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.

Работа системы подачи начинается с секции I, где механизм захватного устройства 1 с помощью двигателя 2 перемещается вдоль портала 3 по оси Y к ближайшему ряду семян кассеты 4. Далее с помощью захватного

устройства осуществляется фиксация корневых шеек ряда семян с усилием, необходимым для дальнейшего извлечения последних из ячеек кассеты 4. Извлечение семян из кассеты выполняется перемещением захватного устройства 1 вдоль направляющей 5 вверх по оси Z, приводимым в движение двигателем 6. После извлечения ряда семян захватный механизм перемещается в секцию II к накопителю 7. Далее механизм захвата перемещается по оси Z вниз к накопителю для размещения семян, после чего перемещается в секцию I к ближайшему ряду семян кассеты 13.

В секции II работа начинается с поступательного перемещения семян к чашам посадочного аппарата по конвейеру 8, который приводится в движение ременной передачей, расположенной под основанием накопителя. После размещения семян в накопителе 7 конвейер 8 перемещает ряд семян до тех пор, пока ближайший к посадочному аппарату семя не достигнет пластины толкателя 11, после чего срабатывает оптический датчик 9 и толкатель 11 перемещает семя в буферную емкость накопителя 10. При достижении чаши 13 посадочного аппарата буферной емкости накопителя 10 открывается затворка и семя под собственной тяжестью опускается в чашу. В процессе опорожнения накопителя 7 захватный механизм 1 осуществляет подачу следующего ряда семян в накопитель. После опорожнения накопителя захватный механизм 1 опускает следующий ряд семян. Цикл замыкается.

В секции III осуществляется своевременная подача кассет с сеянцами из вертикального цепного конвейера 12 в секцию I. После опорожнения кассеты 4 захватное устройство перемещается к противоположно расположенной кассете 14 за последним рядом семян. Параллельно выполняется сброс пустой кассеты в секцию IV, после чего осуществляется подача кассеты с сеянцами из цепного конвейера 12 следующим образом. Цепной конвейер приводится в движение с помощью двигателя 18, перемещая вертикально вниз ближайшую к площадке кассету, установленную на двух профильных опорах 15. Достигая платформы кассета

останавливается, а опоры 15 продолжают движение до полного скрытия за плоскостью поверхности платформы, перемещаясь сквозь специальные прорези. Далее цилиндр 16 перемещает с помощью толкателя 17 кассету с сеянцами 14 в зону I, при этом ограничитель 19 и направляющие 20 обеспечивают необходимое позиционирование кассеты в секции I.

Упрощенная циклограмма работы всех секций приведена на рисунке 2.2. Более развернутая циклограмма приведена в приложении А.

Исходя из разработанной циклограммы системы подачи сеянцев в лесопосадочный аппарат для синхронной работы всех секций необходимо чтобы выполнялись следующие условия [23]:

$$\begin{cases} t_{C1} < t_{C2} \\ kt_I < t_{C2} < nt_I \\ t_{C3.1} + t_{C4} < 2t_{C2} \\ t_{C3.2} < (2j - 1)t_{C2}, \end{cases} \quad (2.1)$$

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

$t_I$  – интервал времени прохождения чаш посадочного аппарата,

$k$  – количество сеянцев в ряду,  $k = 9$

$n$  – количество сеянцев в накопителе  $n > 9$ ,

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

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 сеянцев в накопителе  $n$  позволяет варьировать временем работы секции 1,  $t_{C1}$ .

Система подачи сеянцев вмещает в себя 10 кассет. В каждой кассете располагается до 81 сеянца. Таким образом разрабатываемая лесопосадочная машина, оснащенная данной системой может осуществлять механизированную посадку без перезарядки до 810 сеянцев.

В рамках данной работы будут рассмотрены только первые две секции, как наиболее сложные по своему технологическому процессу и требующие более тщательной проработки, в том числе для обеспечения синхронизации работы всей системы: 1) перемещение захватного устройства к сеянцам, извлечение сеянцев из ячеек, доставка сеянцев в секцию II; 2) перемещение сеянцев в накопителе, подача сеянца в буферную ёмкость накопителя, подача сеянца из буферной емкости накопителя в чашу посадочного аппарата.

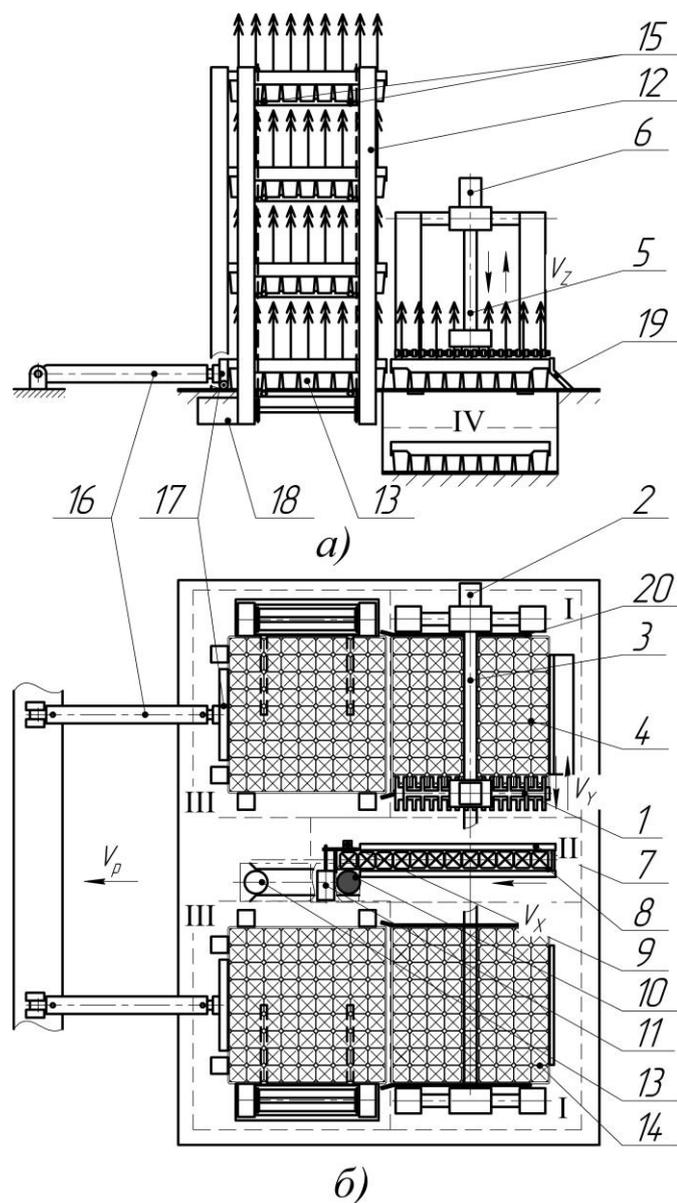


Рисунок 2.1 - Общая схема разрабатываемой системы подачи сеянцев в лесопосадочный аппарат: а) вид спереди, б) вид сверху

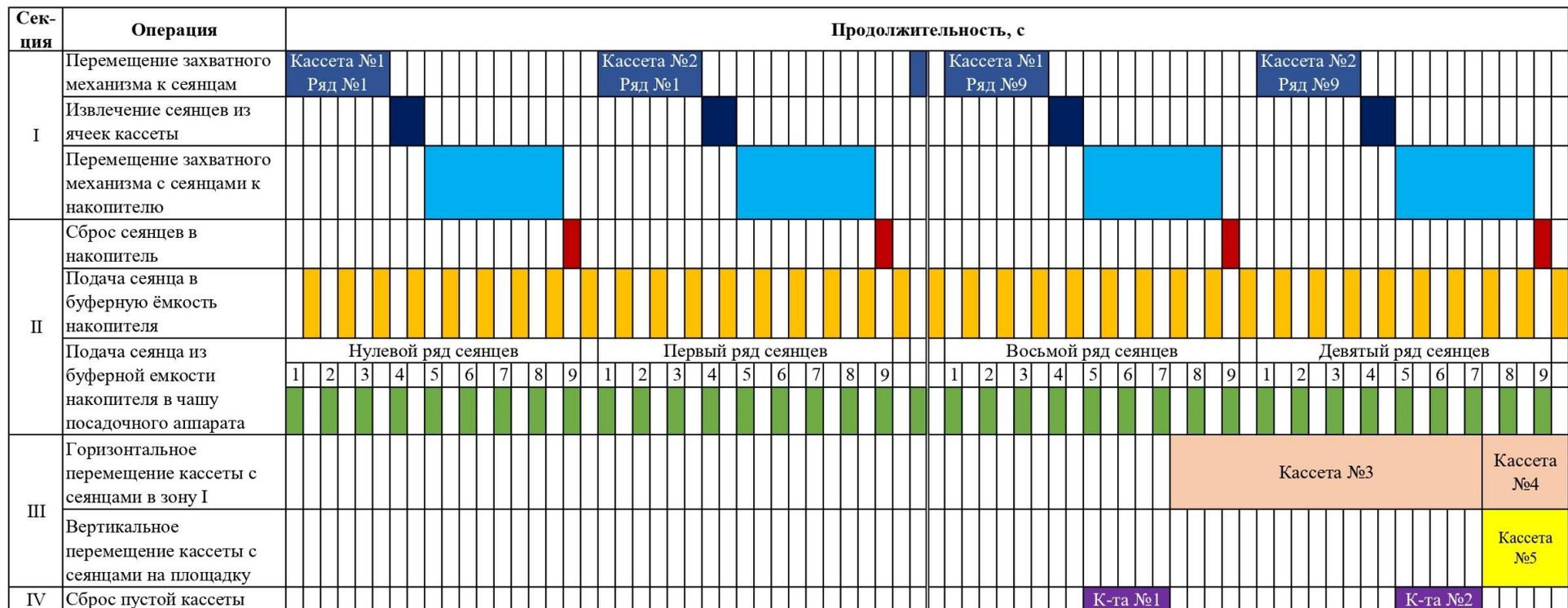


Рисунок 2.2 - Упрощенная циклограмма работы системы подачи сеянцев в посадочный аппарат

## 2.2. Разработка математической модели процессов извлечения семян из ячеек кассеты и подачи в накопитель

Рассмотрим перемещение механизма захвата по осям  $y$  и  $z$  поэтапно. Условимся, что начало координат оси  $y$  будет лежать на продольной оси накопителя, а центр масс механизма захвата совпадает с его геометрическим центром (рисунок 2.3) [63].

В начале цикла механизм захвата с приводом массой  $m_{М.З.}$  находится на некотором расстоянии  $y_0$  от начала координат. На первом этапе механизм захвата семян массой  $m_{М.З.}$  перемещается от накопителя (точки А) к ближайшему ряду семян (точки В) со скоростью  $V_{y.1.i}$  и ускорением  $a_{y.1.i}$ , преодолевая расстояние  $y_1$ . При этом на механизм действует сила инерции  $F_{y.1.i}$ . С каждым новым циклом расстояние до ряда семян увеличивается на расстояние  $l_p$ . Таким образом перемещение механизма захвата на первом этапе для каждого ряда можно определить по формуле

$$y_1 = y_{1.1} + (i-1)l_p, \quad (2.2)$$

где  $i$  – номер ряда семян кассеты от накопителя.

$l_p$  – междурядное расстояние семян в кассете, мм.

Сила инерции определяется по известной формуле

$$F_{y.1.i} = m_{М.З.} a_{y.1.i}. \quad (2.3)$$

На втором этапе осуществляется захват семян с последующим извлечением из ячеек (рисунок 2.4).

После захвата выполняется извлечение ряда семян массой  $m_{p.c.}$  с помощью подвижной относительно оси  $z$  части механизма захвата массой  $m_3$  из ячеек кассеты со скоростью  $V_{z.1.}$ , ускорением  $a_{z.1}$  и силой инерции  $F_{z.1}$ .

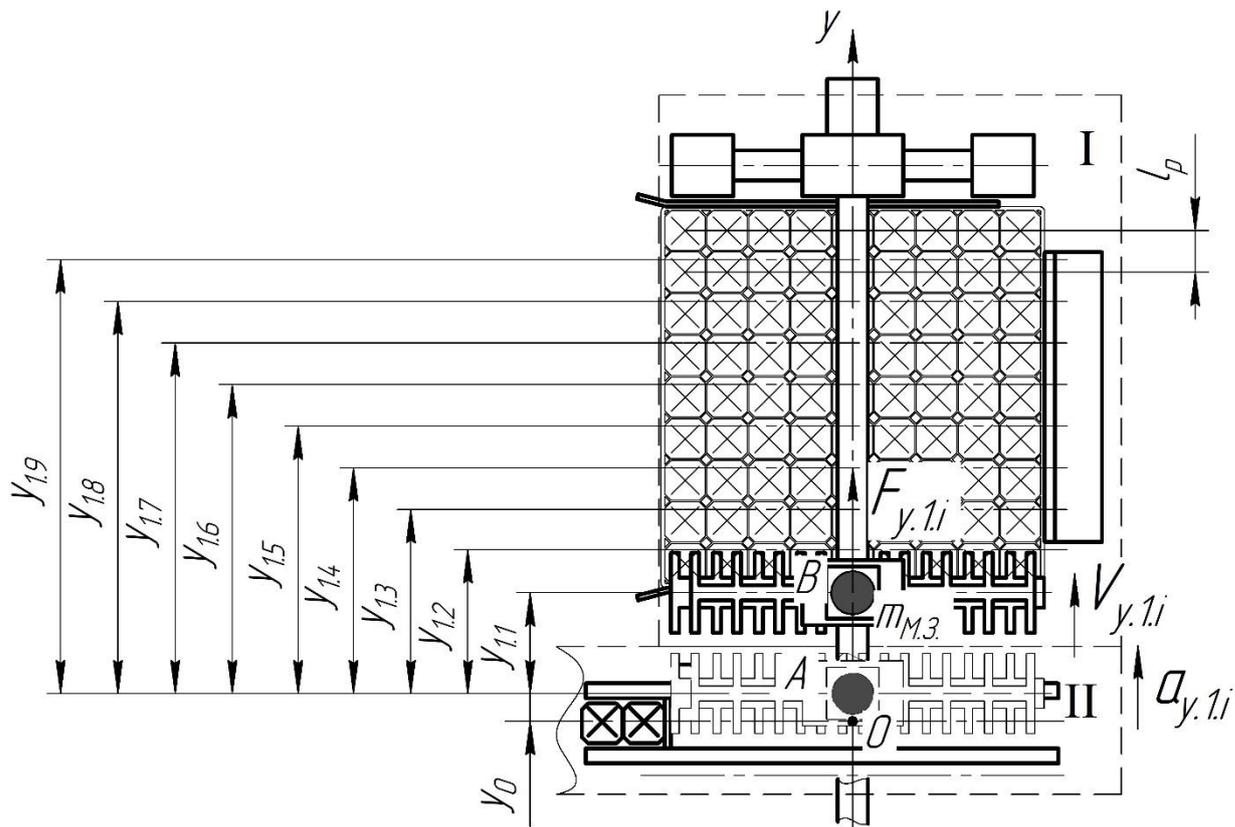


Рисунок 2.3 - Схема перемещения механизма захвата по оси  $y$ , 1 этап

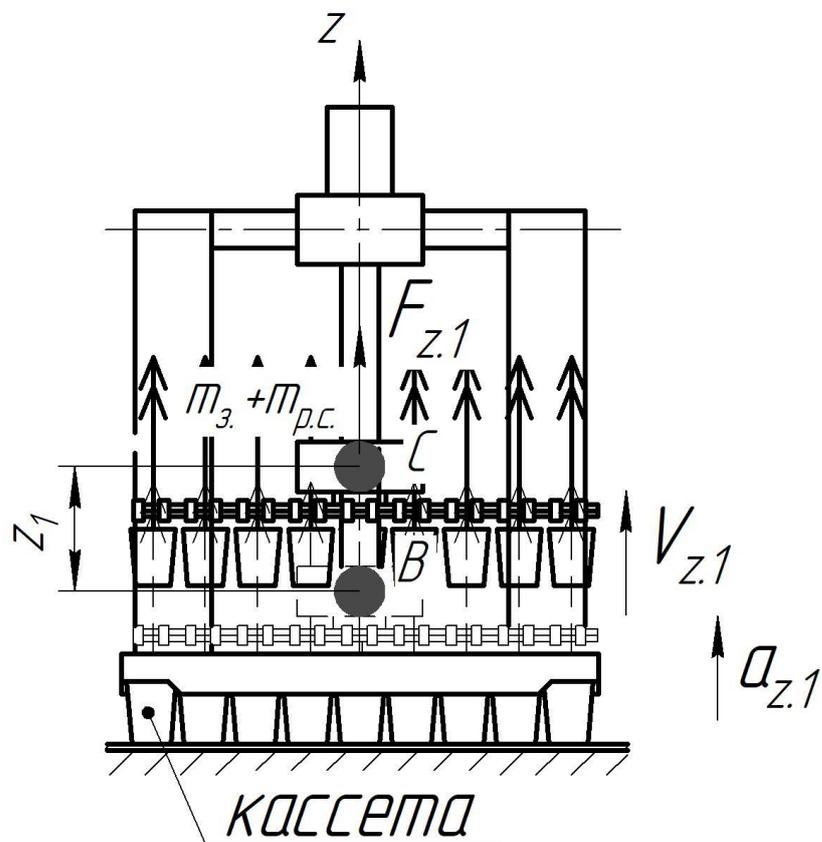


Рисунок 2.4 - Схема перемещения механизма захвата по оси  $z$ , 2 этап

При извлечении сеянца из кассеты, корни, вышедшие за пределы ячейки, создают дополнительное сопротивление, которое необходимо учитывать при проектировании системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины. Корни, застревают в вертикальных технологических отверстиях (направляющих), подвергаются растяжению, в связи с этим, помимо других сил, возникают продольные силы корней, которые необходимо учитывать при моделировании процесса извлечения сеянцев.

Исходя из этого, при извлечении сеянцев из ячеек кассет возникают следующие силы: сила трения покоя, сила тяжести сеянца и продольные силы корней ( $N_{Кор}$ ), зацепившихся за стенки ячейки в процессе извлечения. В случае неравномерного движения сеянца добавляется сила инерции. На рисунке 2.5 представлена схема извлечения сеянца из ячейки кассеты.

В начальный момент времени извлечения сеянца действует сила трения покоя:

$$F_{mp} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (2.4)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения кома почвы о стенки кассеты;

$m$  - масса сеянца, кг;

$\alpha$  - угол между стенкой ячейки и горизонталью.

При этом,

$$\alpha = \arctg \cdot \left( \frac{2h_k}{a_1 - a_2} \right) \quad (2.5)$$

где  $h_k$  – высота кома почвы сеянца, мм;

$a_1$  – ширина верхнего основания кома почвы, мм;

$a_2$  – ширина нижнего основания кома почвы, мм.

Усилие  $N_{Кор}$  изменяется в процессе извлечения сеянца из ячейки и

зависит от количества корней, застрявших в полостях ячеек и подвергнувшихся растяжению, их диаметров и текущей величины напряжения каждого корня.

Текущее значение продольной силы одного корня, оказывающего сопротивление при извлечении сеянца из кассеты, определяется по формуле:

$$N_i = A_i \cdot \sigma_i \quad (2.6)$$

где  $A_i$  - площадь поперечного сечения корня, м<sup>2</sup>;

$\sigma_i$  - напряжение, возникающее в корне при растяжении.

Суммарное текущее значение продольных сил корней, оказывающих сопротивление при извлечении сеянца из кассеты, определяется по формуле:

$$N_{\text{Кор}} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sigma_i \quad (2.7)$$

где  $n$  – количество корней, оказывающих сопротивление движению сеянца в текущий момент времени.

Исходя из того, что в процессе извлечения сеянца из кассеты величина суммарного усилия, возникающего от продольных сил корней, носит случайный характер, не представляется возможным точно описать данный процесс теоретически. Поэтому было принято решение определить зависимость величины усилия извлечения сеянца из ячейки от количества корней, одновременно испытывающих предельные напряжения при различных значениях их диаметров экспериментальным методом.

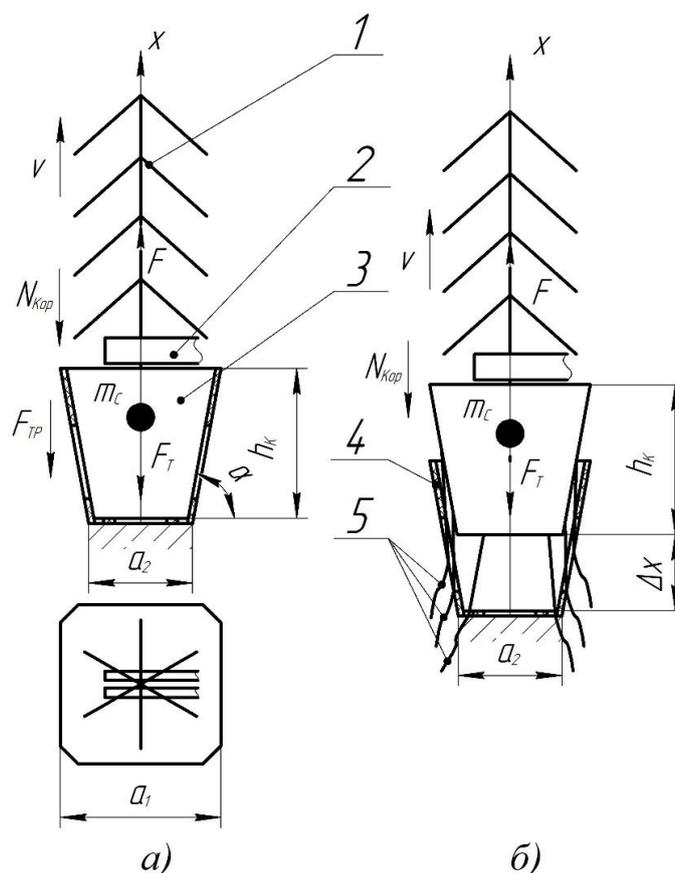


Рисунок 2.5 – Схема извлечения сеянца с ЗКС из ячейки кассеты.  
 1 – сеянец; 2 – захватное устройство; 3 – ком почвы; 4 – ячейка кассеты; 5 – корни сеянца

Усилие, необходимое для извлечения сеянцев из ячейки определялось по следующей формуле:

$$F_{И} = F_{TP} + F_T + N_{Коп} + F_{z.1}, \quad (2.8)$$

где  $F_T$  – сила тяжести сеянца, Н;

$F_{z.1}$  – сила инерции сеянца, Н.

При равномерном прямолинейном движении  $F_{z.1} = 0$ .

Средняя масса сеянцев определялась на основе данных, полученных от красноярского лесничества по формуле:

$$m_c = \frac{m_o - m_k}{n_{я}} \quad (2.9)$$

где  $m_0$  – общая масса кассеты с сеянцами, кг;

$m_K$  – масса пустой кассеты, кг;

$n_{я}$  – количество ячеек в кассете.

В соответствии с описанной методикой определения суммарного значения продольных сил корней были проведены расчеты, по результатам которых были получены зависимости усилия извлечения сеянца из ячейки от количества около предельно нагруженных корней при различных значениях их диаметров (рисунок 2.6).

Согласно полученному графику, минимальное значение усилия извлечения сеянца возникает в том случае, когда в процессе извлечения сеянца один корень с минимальным диаметром подвержен около предельному растяжению и величина этого усилия составляет 1,39 Н. Максимальное значение усилия возникает в случае, когда 10 корней с максимальным диаметром одновременно подвержены около предельному растяжению, величина усилия составляет 35,36 Н, при этом сила тяжести и сила трения покоя в совокупности не превышают 2% от общей силы.

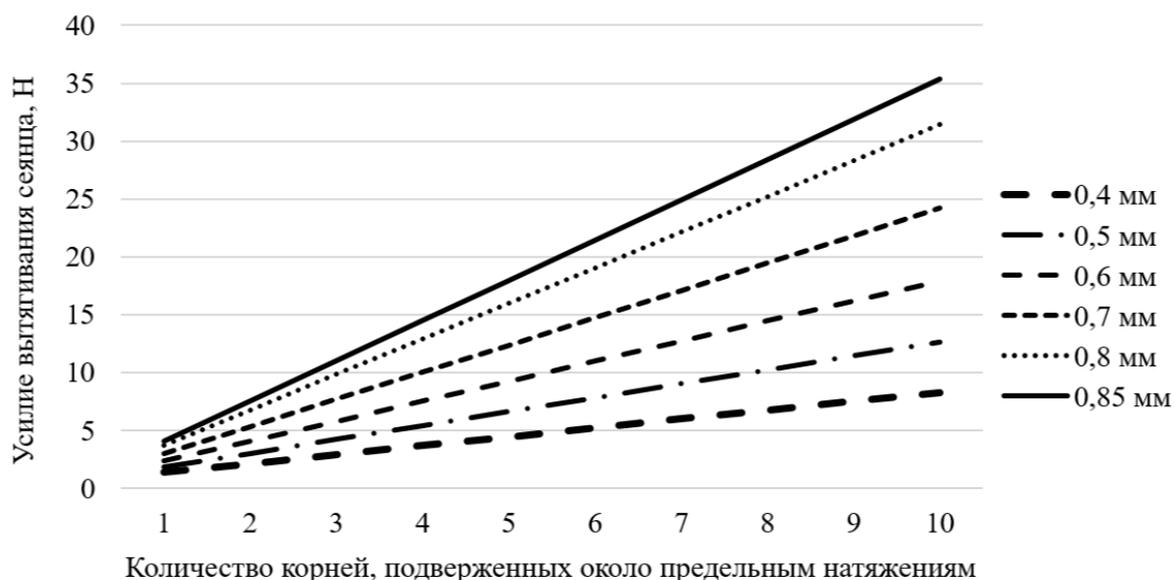


Рисунок 2.6 – График зависимостей усилия извлечения сеянца от количества корней, подверженных около предельным напряжениям

В реальных условиях в процессе извлечения сеянца из ячейки количество корней, препятствующих движению, может изменяться с течением времени, диаметры данных корней, как правило, имеют различные значения, которые могут варьироваться от 0,4 до 0,85 мм. При этом корни в текущий момент времени подвергаются разной степени натяжения. К тому же существует вероятность, что корень на определенном этапе растяжения может выскользнуть и не достигнуть предельных напряжений. Поэтому более подробное изучение столь сложного процесса не входило в задачи исследования. Экспериментальные исследования, направленные на определение усилия извлечения сеянцев с ЗКС из ячейки кассеты будут рассмотрены в следующей главе данной работы.

На третьем этапе механизм захвата с сеянцами общей массой  $m_{М.З.} + m_{p.c.}$  перемещается от текущего ряда (точки В) к противоположной стороне накопителя (точки А') со скоростью  $V_{y.2.i}$  и ускорением  $a_{y.2.i}$ , преодолевая расстояние  $y_2$  (рисунок 2.7). При этом на механизм действует сила инерции  $F_{y.2.i}$ . С каждым новым циклом расстояние до ряда сеянцев увеличивается на междурядное расстояние  $l_p$ . Согласно схеме, перемещение механизма захвата на третьем этапе для каждого ряда определяется по формуле

$$y_2 = 2y_0 + y_{1.1} + (i - 1)l_p, \quad (2.10)$$

На четвертом этапе осуществляется погрузка извлеченных сеянцев в накопитель (рисунок 2.8). Механизм захвата с сеянцами общей массой  $m_{з.} + m_{p.c.}$  перемещается вдоль оси  $z$  со скоростью  $V_{z.2.}$ , ускорением  $a_{z.2}$  и силой инерции  $F_{z.2.}$

Далее следует первый этап, но на противоположной от накопителя стороне секции I (рисунок 2.1, б), а после завершения четвертого этапа механизм захвата возвращается к прежней стороне для повторения цикла. Таким образом выполнение четырех этапов перемещения механизма захвата

осуществляется в шахматном порядке.

Согласно вышесказанному время работы секции один включает в себя четыре составляющие

$$t_{c1} = t_{\text{э}1} + t_{\text{э}2} + t_{\text{э}3} + t_{\text{э}4}, \quad (2.11)$$

где  $t_{\text{э}j}$  – время  $j$ -го этапа.

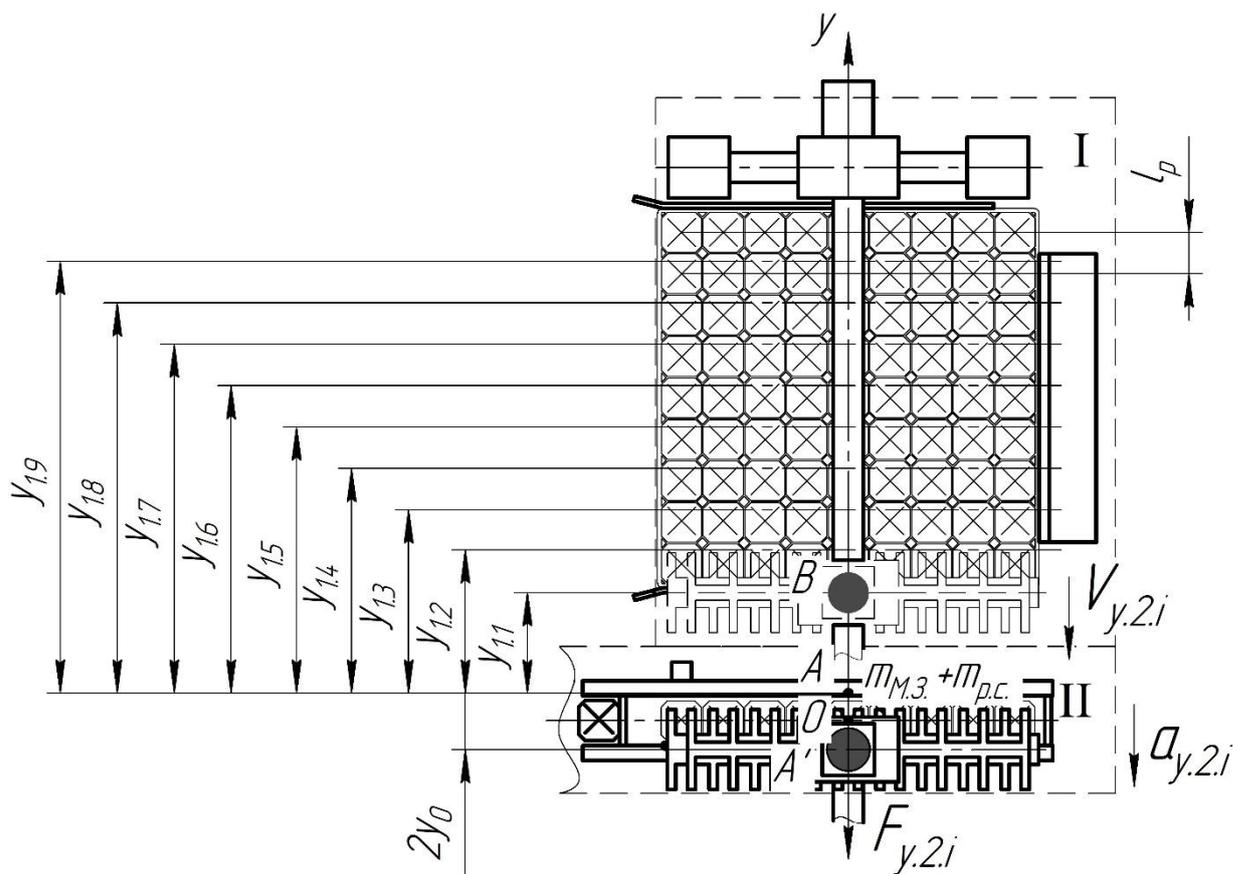


Рисунок 2.7 - Схема перемещения механизма захвата по оси  $y$ , 3 этап

Для определения скоростей и ускорений на всех этапах движения механизма захвата семян воспользуемся функциями, описывающими симметричный S-образный профиль разгона и ускорения, где для ускорения применяется функция [58]

$$f_a(u) = \frac{V_m}{2} \left( \sin \left( \pi \left( u - \frac{1}{2} \right) \right) + 1 \right), \quad (2.12)$$

для замедления применяется функция [50]

$$f_d(u) = \frac{V_m}{2} \left( \sin \left( \pi \left( u - \frac{3}{2} \right) \right) + 1 \right), \quad (2.13)$$

где  $V_m$  – точка максимума функций,

$u$  – аргумент функций,  $0 \leq u \leq 1$ .

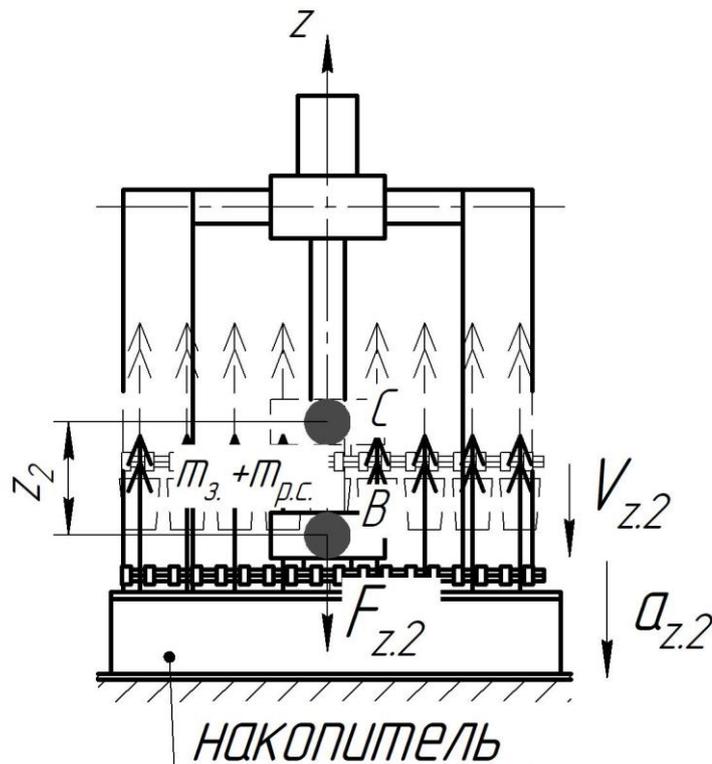


Рисунок 2.8 - Схема перемещения механизма захвата по оси z, 4 этап

Поскольку в нашем случае входными параметрами для определения скоростей и ускорений являются временные интервалы и перемещения, а также с целью применения функций (2.12) и (2.13) для интервалов ускорения и замедления, равных менее одной секунде добавим к аргументу новую переменную, определяющую величину общего временного интервала функции

$$V_a(t) = \frac{V_m}{2} \left( \sin \left( \pi \left( \frac{t}{t_a} - \frac{1}{2} \right) \right) + 1 \right), \quad (2.14)$$

где  $V_m$  – максимальная скорость, м/с;

$t$  – текущее время, с;

$t_a$  – время ускорения от нуля до максимальной скорости, с.

$$V_d(t) = \frac{V_m}{2} \left( \sin \left( \pi \left( \frac{t}{t_d} - \frac{3}{2} \right) \right) + 1 \right), \quad (2.15)$$

где  $t_d$  – время замедления от максимальной скорости до нуля, с.

Так как функции (2.14) и (2.15) основаны на уравнении синусоиды, средняя скорость на всем интервале определяется половиной максимальной скорости  $V_m$ , исходя из этого перемещение  $y_{m,n}$ , совершенное за время  $t_n$

$$y_{m,n} = \frac{V_m}{2} \cdot t_n. \quad (2.16)$$

Выражая отсюда  $V_m$ , получим

$$V_m = \frac{2y_{m,n}}{t_n}. \quad (2.17)$$

Подставляя выражение (2.17) в функции (2.14) и (2.16), получим

$$V_a(t) = \frac{y_{m,a}}{t_a} \left( \sin \left( \pi \left( \frac{t}{t_a} - \frac{1}{2} \right) \right) + 1 \right), \quad (2.18)$$

$$V_d(t) = \frac{y_{m.d}}{t_d} \left( \sin \left( \pi \left( \frac{t}{t_d} - \frac{3}{2} \right) \right) + 1 \right), \quad (2.19)$$

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

Выражения (2.18), (2.19) описывают зависимость скорости перемещения механизма от заданных пути и времени при ускорении и замедлении соответственно.

Для обеспечения эффективности работы системы, необходимо добавить промежуточную функцию, при которой механизм захвата, достигая максимальной скорости, продолжает движение с постоянной скоростью

$$V_c = \frac{2y_{m.a}}{t_a}. \quad (2.20)$$

Используя выражения (2.18-2.20) опишем общую функцию изменения скорости при движении механизма захвата от начальной до конечной точки с помощью кусочно-заданной функции

$$V(t) = \begin{cases} \frac{y_{m.a}}{t_a} \left( \sin \left( \pi \left( \frac{t}{t_a} - \frac{1}{2} \right) \right) + 1 \right), & \text{если } 0 \leq t \leq t_a, \\ \frac{2y_{m.a}}{t_a}, & \text{если } t_a < t < t_a + t_c, \\ \frac{y_{m.d}}{t_d} \left( \sin \left( \pi \left( \frac{t}{t_d} - \frac{3}{2} \right) \right) + 1 \right), & \text{если } t_a + t_c \leq t \leq t_a + t_c + t_d, \end{cases} \quad (2.21)$$

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

Выражение суммарного перемещения механизма захвата на  $j$ -том этапе имеет вид

$$y_{\Delta,j} = y_{m.a} + y_c + y_{m.d}, \quad (2.22)$$

где  $y_c$  – перемещение механизма захвата с постоянной скоростью.

В случае с симметричным профилем разгона и торможения механизма захвата необходимо задать условия, при которых величины перемещения с ускорением и замедлением будут зависеть от общего времени движения механизма захвата, при этом перемещение с ускорением и перемещение замедлением будут равны. В этом случае максимальное время разгона и ускорения на каждом этапе не превышает одной секунды

$$y_{m.a} = y_{m.d} = \begin{cases} \frac{y_{\Delta,j}}{2}, & \text{если } 0 \leq t_{\Delta,j} \leq 2, \\ \frac{y_{\Delta,j}}{2(1+t_c)}, & \text{если } t_{\Delta,j} > 2. \end{cases} \quad (2.23)$$

Выражение суммарного времени перемещения механизма захвата на  $j$ -том этапе

$$t_{\Delta,j} = t_a + t_c + t_d. \quad (2.24)$$

Аналогично зададим условия времени ускорения и времени замедления механизма захвата при симметричном профиле

$$t_a = t_d = \begin{cases} \frac{t_{\Delta,j}}{2}, & \text{если } 0 \leq t_{\Delta,j} \leq 2, \\ 1, & \text{если } t_{\Delta,j} > 2. \end{cases} \quad (2.25)$$

При этом время перемещения с постоянной скоростью будет зависеть от величины суммарного времени

$$t_v = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq t_{\text{э},j} \leq 2, \\ t_{\text{э},j} - 2t_a, & \text{если } t_{\text{э},j} > 2, \end{cases} \quad (2.26)$$

Для определения ускорений при перемещении механизма захвата с симметричным S-образным профилем разгона и торможения продифференцируем уравнения (2.18) и (2.19) по времени

$$a_a(t) = \frac{\pi \cdot S_a \cdot \cos \left[ \pi \left( \frac{t}{t_a} - \frac{1}{2} \right) \right]}{t_a^2}, \quad (2.27)$$

$$a_d(t) = \frac{\pi \cdot S_d \cdot \cos \left[ \pi \left( \frac{t}{t_d} - \frac{3}{2} \right) \right]}{t_d^2}. \quad (2.28)$$

Выражения (2.27) и (2.28) описывают зависимость величины ускорения от времени при разгоне и торможении соответственно.

Используя выражения (2.24), (2.27), (2.28) построим кусочно-заданную функцию, позволяющую определять ускорение при движении со скоростью  $V(t)$  от начальной до конечной точки

$$a(t) = \begin{cases} \frac{\pi \cdot y_{m.a} \cdot \cos \left[ \pi \left( \frac{t}{t_a} - \frac{1}{2} \right) \right]}{t_a^2}, & \text{если } 0 \leq t \leq t_a, \\ 0, & \text{если } t_a < t < t_a + t_c, \\ \frac{\pi \cdot y_{m.d} \cdot \cos \left[ \pi \left( \frac{t - (t_a + t_c)}{t_d} - \frac{3}{2} \right) \right]}{t_d^2}, & \text{если } t_a + t_c \leq t \leq t_a + t_c + t_d, \end{cases} \quad (2.29)$$

Проинтегрировав выражения (2.18) и (2.19) получим функцию перемещения механизма захвата от времени с симметричным S-образным профилем разгона и торможения соответственно

$$y_a(t) = -\frac{y_{m.a} \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{t_a}\right) - \frac{\pi \cdot y_{m.a} \cdot t}{t_a}}{\pi}, \quad (2.30)$$

$$y_d(t) = \frac{y_{m.d} \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{t_d}\right)}{\pi} + \frac{y_{m.d} \cdot t}{t_d}. \quad (2.31)$$

Используя выражения (2.17), (2.24), (2.30), (2.31) построим кусочно-заданную функцию, позволяющую определять перемещение при движении со скоростью  $V(t)$  от начальной до конечной точки

$$y(t) = \begin{cases} \frac{y_{m.a} \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{t_a}\right) - \frac{\pi \cdot y_{m.a} \cdot t}{t_a}}{\pi}, & \text{если } 0 \leq t \leq t_a, \\ \frac{y_{m.a} \sin(\pi) - \pi \cdot y_{m.a}}{\pi} + 2 \cdot y_{m.a} (t - t_a), & \text{если } t_a < t < t_a + t_c, \\ \frac{y_{m.a} \sin(\pi) - \pi \cdot y_{m.a}}{\pi} + 2 \cdot y_{m.a} \cdot t_c + \frac{y_{m.d} \sin\left(\frac{\pi \cdot (t - t_a - t_c)}{t_d}\right)}{\pi} + \\ + \frac{y_{m.d} \cdot (t - t_a - t_c)}{t_d}, & \text{если } t_a + t_c \leq t \leq t_a + t_c + t_d, \end{cases} \quad (2.32)$$

Выражения (1.2), (2.3), (2.11), (2.21), (2.23), (2.24), (2.25), (2.26), (2.29), (2.32) в совокупности представляют собой математическую модель процесса извлечения семян из ячеек кассеты и подачи в накопитель.

### 2.3. Разработка математической модели процессов перемещения семян в накопителе и сброса в буферную емкость

Работу второй секции условно разделим на 3 этапа: 1) перемещение семян по транспортеру накопителя, 2) сброс семени в буферную ёмкость, 3) сброс семени в посадочную чашу. При этом первый и третий этап осуществляются одновременно.

Конструкция второй секции (рисунок 2.9) представляет собой конвейер с зубчатым ремнем 3, который вращается на ведущем 2 и ведомом 8 шкивах, и приводится в движение с помощью шагового двигателя 1, перемещая таким образом семена 5 к толкателю 9 вдоль направляющих 4. По достижению семенем толкателя 9 срабатывает оптический датчик 11 и толкатель с помощью Г-образной пластины сбрасывает семя в буферную ёмкость 6. Когда чаша посадочного аппарата 7 приближается к буферной ёмкости, открывается затворка 12 и семя 10 под собственной тяжестью падает в чашу 7.

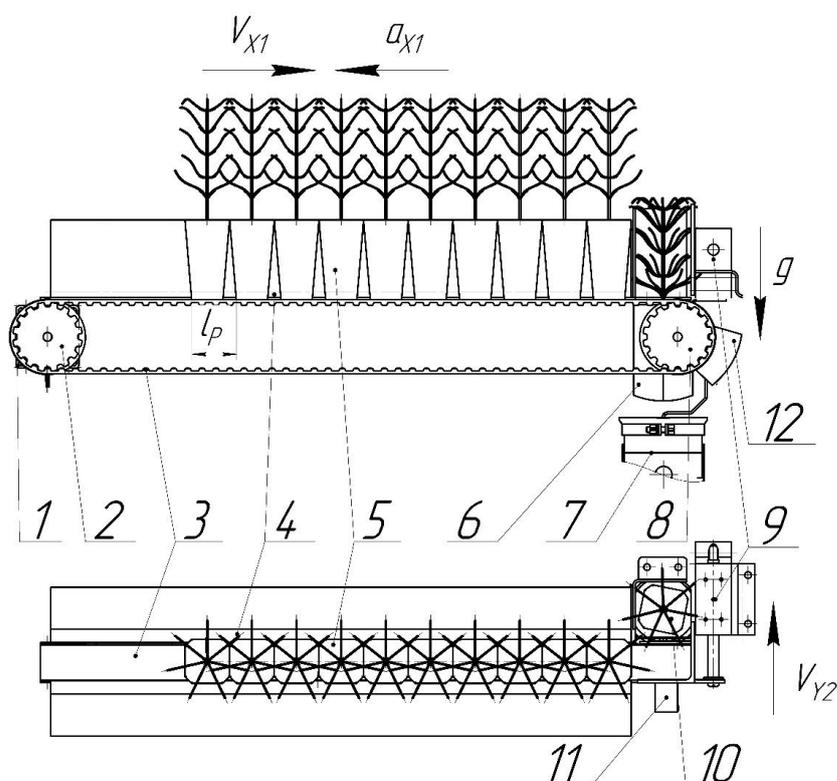


Рисунок 2.9 – Схема работы второй секции

Модель процесса перемещения семян по транспортеру накопителя аналогична модели процесса извлечения семян из ячеек кассеты и подачи в накопитель, и включает в себя следующие выражения: (2.21), (2.23), (2.24), (2.25), (2.26), (2.29), (2.32). При этом перемещение в каждом цикле первого этапа осуществляется на величину  $l_p$  при условии наличия всех семян в ячейках ряда. В случае отсутствия некоторых семян перемещение осуществляется на величину  $(n_o+1)l_p$ , где  $n_o$  – количество отсутствующих в ряду семян.

Во избежание проскальзывания семян на конвейерной ленте необходимо чтоб соблюдалось условие

$$F_{TPX1} \leq F_{X1}, \quad (2.33)$$

где  $F_{TPX1}$  – сила трения кома почвы семени о конвейерную ленту, Н;

$F_{X1}$  – сила инерции семени, Н.

S-образный профиль обеспечивает плавные ускорения и торможения движущихся по конвейерной ленте семян, а абразивное покрытие конвейерной ленты хорошее сцепление.

Для обеспечения устойчивости семени (рисунок 2.10) в продольном относительно оси накопителя направлении необходимо чтоб удерживающий момент семени был больше опрокидывающего. Удерживающий момент определяется выражением

$$M_{уд.} = F_{m.c.} \cdot l_{ц.с.} = m_c \cdot g \cdot \mu \cdot l_{ц.с.}, \quad (2.34)$$

где  $F_{m.c.}$  – сила тяжести семени, Н;

$l_{ц.с.}$  – кратчайшее расстояние от точки равновесия до центра тяжести семени, м.

Опрокидывающий момент определяется следующим выражением

$$M_{он.} = F_{X1} \cdot h_{ц.с.} = m_c \cdot a_{X1} \cdot h_{ц.с.}, \quad (2.35)$$

где  $h_{ц.с.}$  – высота центра тяжести сеянца, м.

Подставив формулы (2.34), (2.35) в условие (2.33) и выразив ускорение, получим выражение, позволяющее определить предельно допустимое ускорение линейного перемещения сеянца в транспортёре накопителя

$$a_{X1} < g \cdot \frac{l_{ц.с.} \cdot \mu}{h_{ц.с.}}, \quad (2.36)$$

На втором этапе осуществляется перемещение сеянца пластиной толкателя со скоростью  $V_{Y2}$  при этом время перемещения определяется по формуле

$$t_{Y2} = \frac{l_p}{V_{Y2}}. \quad (2.37)$$

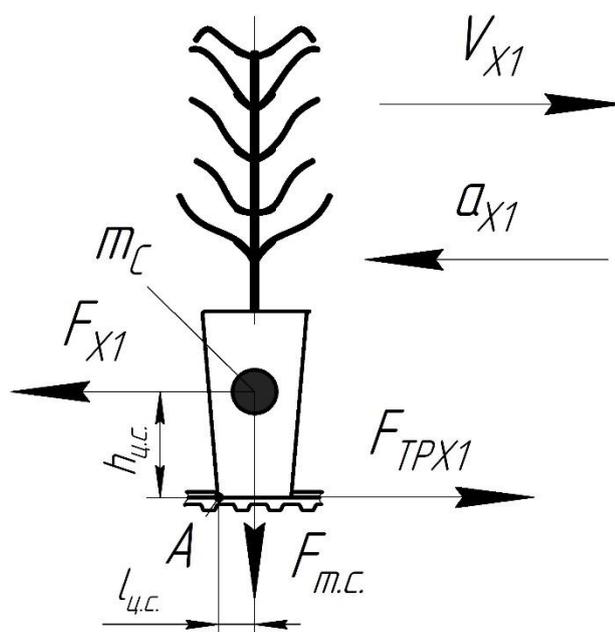


Рисунок 2.10 – Схема движения сеянца в накопителе

Время свободного падения сеянца в буферную емкость определяется выражением

$$t_{z2} = \sqrt{\frac{2l_{h.б.}}{g}}, \quad (2.38)$$

где  $l_{h.б.}$  – высота падения сеянца в буферную емкость, м.

Время свободного падения сеянца в посадочную чашу

$$t_{z3} = \sqrt{\frac{2l_{h.ч.}}{g}}, \quad (2.39)$$

где  $l_{h.ч.}$  – высота падения сеянца в посадочную чашу, м.

Суммарное время второго и третьего этапов является постоянной величиной и зависит от геометрических параметров сеянца, буферной ёмкости и посадочной чаши. Исходя из этого время на перемещение одного сеянца можно определить по формуле

$$t_{x1} = t_I - (t_{y2} + t_{z2}), \quad (2.40)$$

Таким образом полученные выражения (2.36), (2.37), (2.38), (2.39), (2.40) в совокупности являются дополнением к ранее разработанной математической модели, позволяющие определить выходные характеристики второй секции системы подачи сеянцев в лесопосадочную машину.

#### **2.4. Моделирование рабочих процессов системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат**

Для синхронизации работы лесопосадочной машины и

разрабатываемой системы подачи семян в посадочный аппарат лесопосадочной машины необходимо определить следующие характеристики системы: перемещение, скорость, ускорение, сила инерции. Данные характеристики имеют прямую зависимость от рабочей скорости движения лесопосадочной машины и шага посадки.

Моделирование системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины осуществлялось в математической программе Mathcad (рисунок 2.11). Полная версия модели представлена в приложении Б.

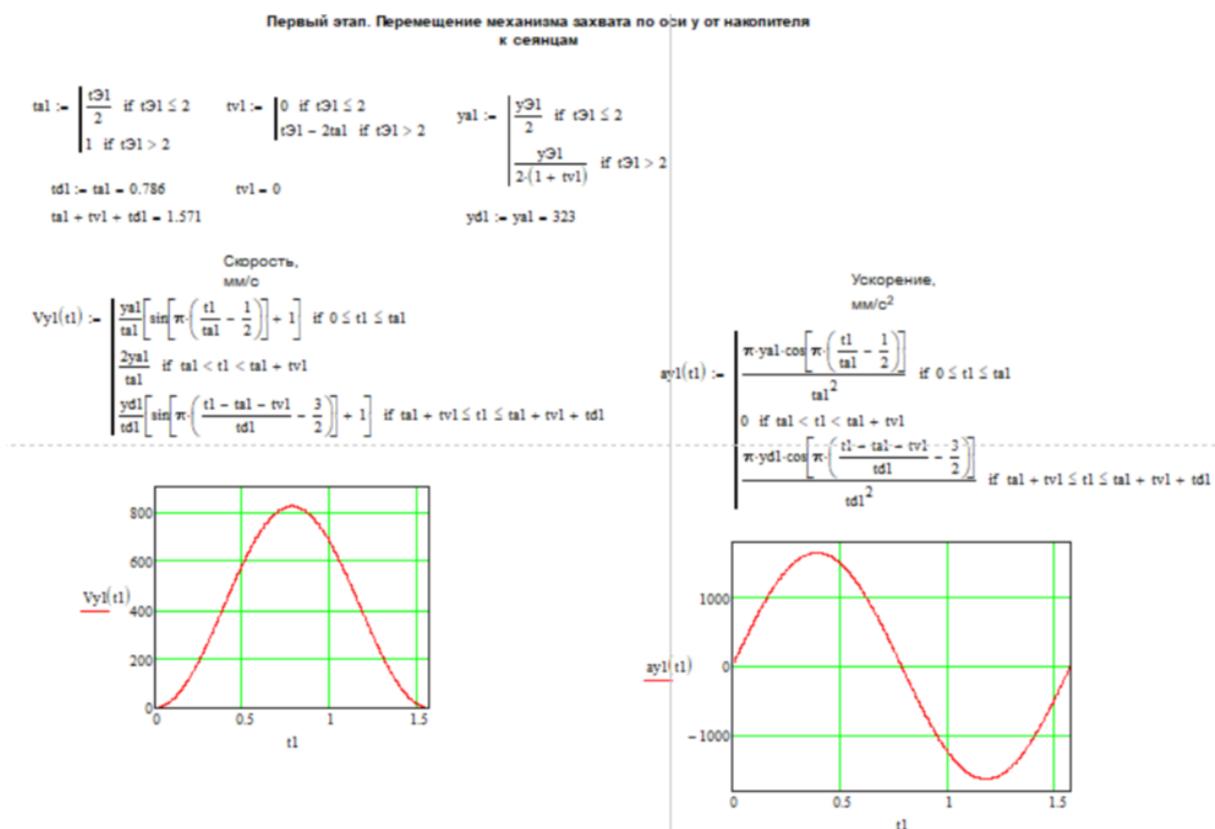


Рисунок 2.11 - Фрагмент имитационной модели работы системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат

### 2.4.1. Захватный механизм

На этапах 2 (захват и извлечение ряда семян из ячеек кассет) и 4 (размещение ряда семян в накопителе) механизм захвата по оси Z в каждом цикле проходит один и тот же путь ( $z_1, z_2$  соответственно), определим

максимальную скорость движения механизма захвата на данных этапах в зависимости от параметров шарико-винтовой передачи (ШВП) и сервомотора [64].

Для точности позиционирования был принят шаг ШВП равный 4 мм, как один из наиболее распространенных и применяемых при проектировании ЧПУ станков. В качестве двигателя принят сервомотор с номинальной частотой вращения вала 3000 об/мин, обеспечивающий высокий крутящий момент [64-66]. Предельную линейную скорость гайки ШВП определим по известной формуле, мм/с

$$V_{ШВП} = \frac{P_{ШВП} \cdot n_{ДВ}}{60}, \quad (2.41)$$

где  $P_{ШВП}$  – шаг ШВП, мм;

$n_{ДВ}$  – частота вращения вала двигателя, об/мин.

На этапах 1 (перемещение к ближайшему ряду семян) и 3 (перемещение с сеянцами к накопителю) скорость перемещения механизма захвата по оси Y ограничивается номинальной частотой вращения двигателя и диаметром ведущего шкива зубчатой ременной передачи.

Для обеспечения плавного ускорения и минимизации нагрузки на привод механизма было принято решение использовать ведущий шкив наименьшего диаметра (23 мм). Точность позиционирования обеспечит шаговый двигатель с двумя валами и максимально эффективной частотой оборотов, равной 600 об/мин. Предельную линейную скорость механизма при движении по оси Y определим по формуле, мм/с

$$V_{ПИ} = \frac{\pi \cdot D_{Ш} \cdot n_{ДВ}}{60}, \quad (2.42)$$

где  $D_{Ш}$  – диаметр шкива, мм.

Рабочая скорость лесопосадочного агрегата напрямую зависит от скорости движения базовой машины. Известно, что в настоящее время наиболее распространенным трактором подходящего класса является сельскохозяйственный трактор МТЗ-82, исходя из этого принимаем скоростные параметры для данного трактора.

Шаг посадки для семян сосны и ели с закрытой корневой системы в зависимости от целей и условий посадки может варьироваться от 0,6 до 1,98 м [67-74]. При этом согласно приказу министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 4 декабря 2020 года N 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений» при посадке лесных культур сеянцами и (или) саженцами с закрытой корневой системой количество высаживаемых растений должно быть не менее 2,0 тысяч штук на 1 гектаре, что приблизительно соответствует шагу посадки 2,2 метра при равномерном распределении сеянцев на площади.

В связи с конструктивной особенностью посадочного аппарата, рабочая скорость лесопосадочной машины не может превышать 3,6 км/ч (1 м/с). Превышение указанной скорости кратно увеличит износ посадочных чаш и повысит вероятность выхода из строя посадочного аппарата [1, 23].

Входные данные математической модели, необходимые для исследования процесса извлечения сеянцев из ячеек кассеты и подачи в накопитель приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Входные параметры математической модели

| № | Параметр                               | Обозначение | Размерность | Значение    |
|---|--|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 2                                      | 3           | 4           | 5           |
| 1 | Шаг посадки                            | $S$         | м           | 0,62...1,98 |
| 2 | Рабочая скорость лесопосадочной машины | $V_p$       | м/с         | 0,53...1,0  |
| 3 | Количество сеянцев в накопителе        | $n$         | шт.         | 10...14     |

| 1  | 2  | 3           | 4                 | 5                  |
|----|--|-------------|-------------------|--------------------|
| 4  | Расстояние от продольной оси механизма захвата до средней линии первого ряда кассеты   | $y_{1.1}$   | мм                | 150                |
| 5  | Расстояние между рядами (между сеянцами)   | $l_p$       | мм                | 40                 |
| 6  | Номер ряда сеянцев кассеты от накопителя   | $i_p$       | -                 | 1...9              |
| 7  | Расстояние между продольными осями накопителя и механизма захвата в исходном положении | $y_0$       | мм                | 41                 |
| 8  | Пройденное расстояние при извлечении сеянцев из кассеты                                | $z_1$       | мм                | 150                |
| 9  | Пройденное расстояние при размещении сеянцев в накопителе                              | $z_2$       | мм                | 140                |
| 10 | Средняя масса одного сеянца  | $m_c$       | кг                | $70 \cdot 10^{-3}$ |
| 11 | Количество сеянцев в ряду  | $i_c$       | шт.               | 9                  |
| 12 | Масса механизма захвата  | $m_{м.з.}$  | кг                | 20                 |
| 13 | Масса захвата (подвижной относительно оси z части механизма захвата)                   | $m_z$       | кг                | 4                  |
| 14 | Предельная скорость при движении механизма захвата по оси Y                            | $V_{np.Y}$  | мм/с              | 723                |
| 15 | Предельная скорость на втором этапе  | $V_{np.э2}$ | мм/с              | 100                |
| 16 | Предельная скорость на четвертом этапе   | $V_{np.э4}$ | мм/с              | 200                |
| 17 | Предельное ускорение для второй секции   | [a]         | мм/с <sup>2</sup> | 1839               |

Варьируемыми факторами, оказывающими влияние на продолжительность цикла работы первой секции, являются: рабочая скорость лесопосадочной машины ( $V_p$ ), шаг посадки ( $S$ ), количество сеянцев в накопителе ( $n$ ). Продолжительность цикла в свою очередь влияет на следующие характеристики механизма захвата: скорость, ускорение, силу инерции. При этом максимальные характеристики достигаются в процессе перемещении механизма от исходного положения до последнего ряда на

первом этапе и от последнего ряда до накопителя на третьем этапе. В связи с этим будут исследованы максимальные скорость, ускорение и сила инерции механизма захвата семян на 1 и 3 этапах как лимитирующие работу первой секции.

Графики изменения скорости, ускорения и силы инерции для 2 и 4 этапов отображены на рисунках 2.12, 2.13 и 2.14 соответственно.

Несмотря на то, что перемещения захвата по оси z при извлечении ряда семян из ячеек кассеты на втором этапе не велики, движение захвата на протяжении всего пути осуществляется с плавным нарастанием скорости до максимального значения, далее механизм движется с постоянной скоростью, после чего скорость убывает до полной остановки согласно функции S-образного профиля [75].

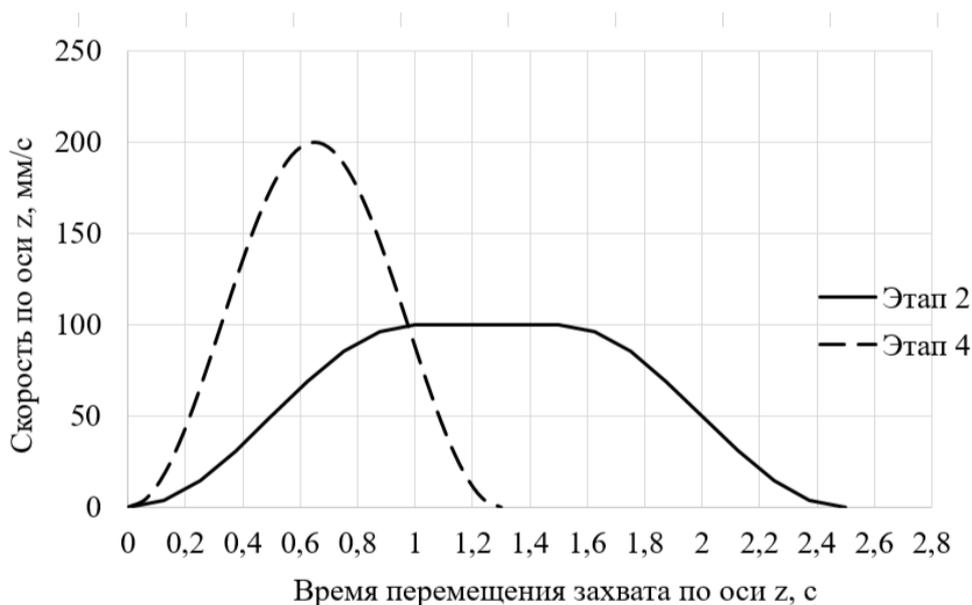


Рисунок 2.12 – График изменения скорости механизма захвата при перемещении по оси z на втором и четвертом этапах

Невысокая скорость (100 мм/с) обусловлена необходимостью сохранения корневой системы семянца при извлечении последнего из ячейки [75-78]. Загрузка семян в накопитель на четвертом этапе осуществляется со скоростью в два раза превышающей скорость второго этапа, в связи с чем механизм после достижения максимальной скорости продолжает перемещение с замедлением.



Рисунок 2.13 – График изменения ускорения механизма захвата при перемещении по оси z на втором и четвертом этапах

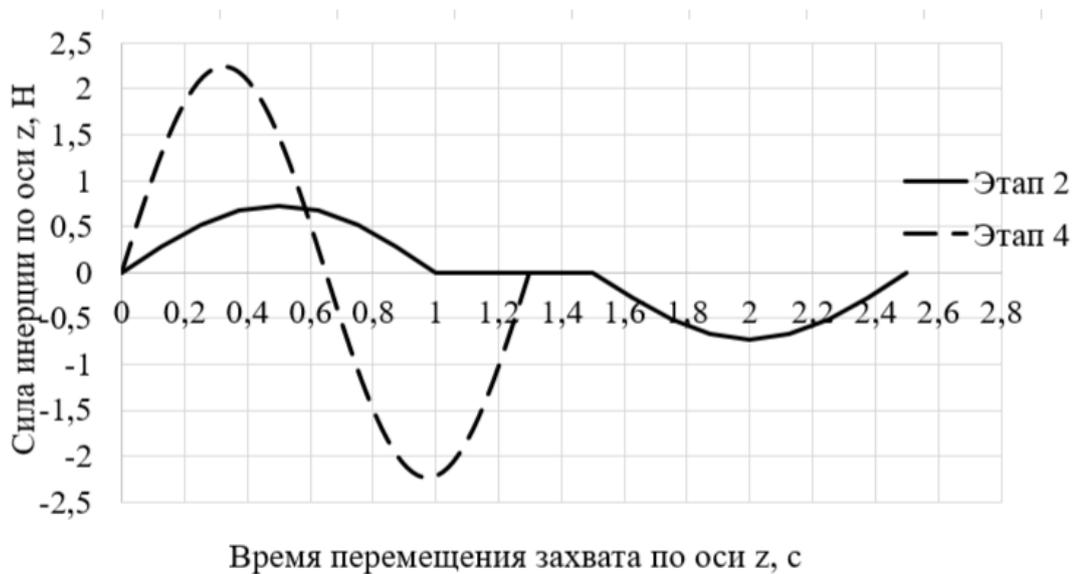


Рисунок 2.14 – График изменения ускорения механизма захвата при перемещении по оси z на втором и четвертом этапах

Исследования динамики шарико-винтовой системы подачи при высоких ускорениях показали, что по достижению винтовой передачи ускорения  $0,65g$  ( $6,38 \text{ м/с}^2$ ) механизм входит в критическую фазу, которая приводит к повышенному износу и последующему разрушению передачи [79, 80]. Если сравнивать вибрационное воздействие системы подачи при высоком ( $0,6g$ ) и низком ( $0,06g$ ) ускорениях подачи, то система намного

быстрее переходит в устойчивое состояние, так как возникающая сила трения существенно влияет на амплитуду вибрации ШВП [81, 82]. В нашем случае максимальное ускорение по оси  $z$  не превышает  $500 \text{ мм/с}^2$  ( $0,05g$ ), а сила инерции не превышает  $2,5 \text{ Н}$ , что обеспечивает стабильную и долговечную работу механизма на выбранных режимах.

Верхнее значение варьируемого фактора  $n$  (объем накопителя) ограничено конструктивными особенностями машины. Для увеличения объема накопителя необходимо переместить все исполнительные механизмы разрабатываемой системы подачи в заднюю часть лесопосадочной машины, где границей будет последний от посадочного аппарата сеянец (рисунок 2.1, б). При превышении объема накопителя более 14 сеянцев исполнительные механизмы системы подачи сместятся за пределы опорной рамы лесопосадочной машины, вследствие чего потребуются удлинение несущей части машины и внесения существенных конструктивных изменений.

Зависимости максимальной скорости перемещения механизма захвата по оси  $y$  от рабочей скорости лесопосадочной машины на первом и третьем этапах при максимальном объеме сеянцев в накопителе отображены на рисунках 2.15, 2.16 соответственно.

Зависимости максимального ускорения механизма захвата по оси  $y$  от рабочей скорости лесопосадочной машины на первом и третьем этапах при максимальном объеме сеянцев в накопителе отображены на рисунках 2.17, 2.18 соответственно.

Зависимости максимальной силы инерции механизма захвата по оси  $y$  от рабочей скорости лесопосадочной машины при максимальном объеме сеянцев в накопителе отображены на рисунках 2.19, 2.20 соответственно.

Зависимости максимальных скорости перемещения, ускорения, силы инерции механизма захвата по оси  $y$  от рабочей скорости лесопосадочной машины на первом и третьем этапах при объеме сеянцев в накопителе, равном 10 и 12 приведены в приложении В.

На представленных графиках показаны границы максимальной

скорости механизма захвата, при которых лесопосадочная машина, оснащенная разрабатываемой системой подачи, достигает: заявленной производительности лесопосадочной машины (2500 сеянцев в час), производительности 4500 сеянцев в час.

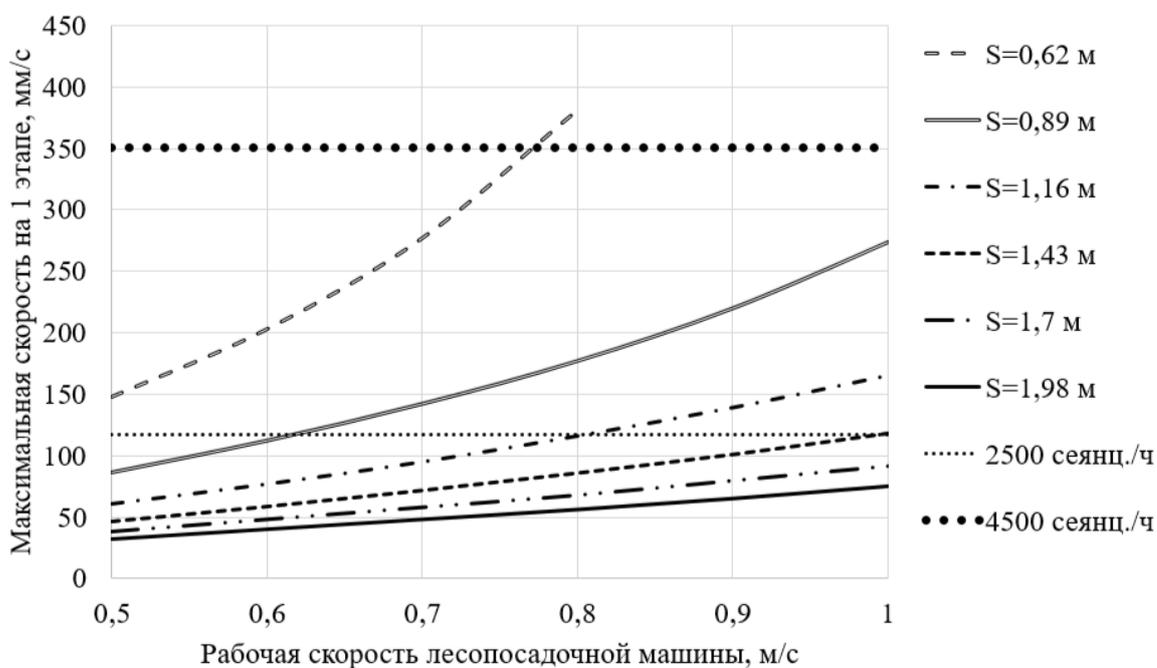


Рисунок 2.15 – Зависимость максимальной скорости перемещения захвата по оси y от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при  $n = 14$

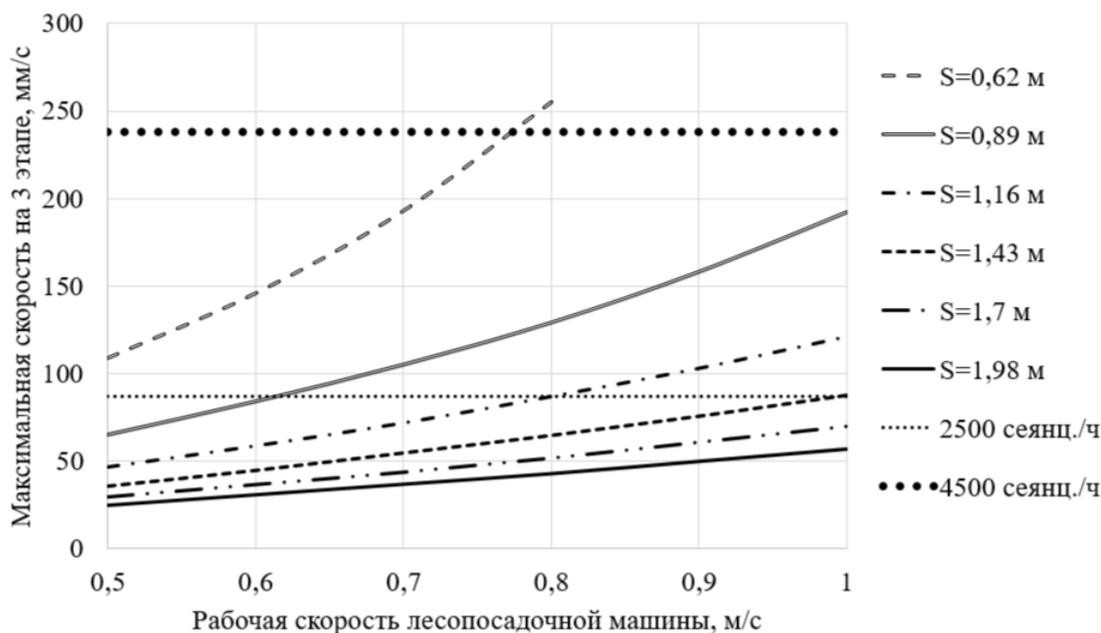


Рисунок 2.16 – Зависимость максимальной скорости перемещения захвата по оси y от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при  $n = 14$

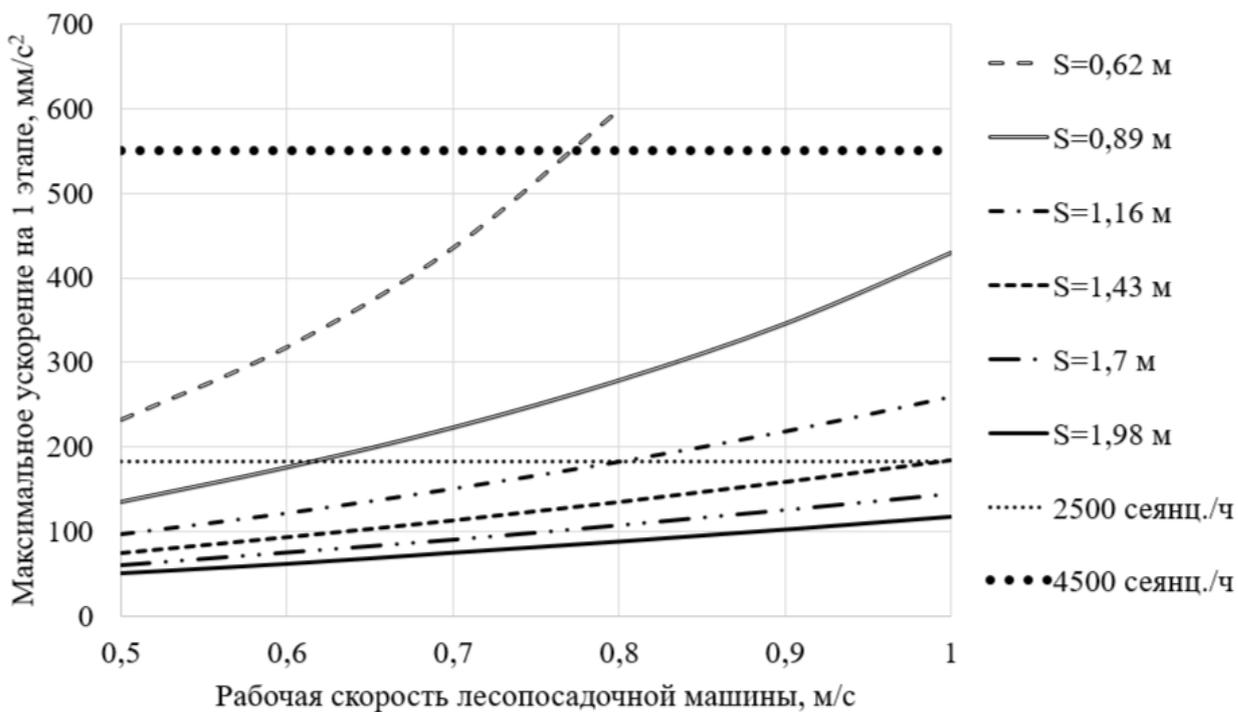


Рисунок 2.17 – Зависимость максимального ускорения движения захвата по оси у от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при  $n = 14$

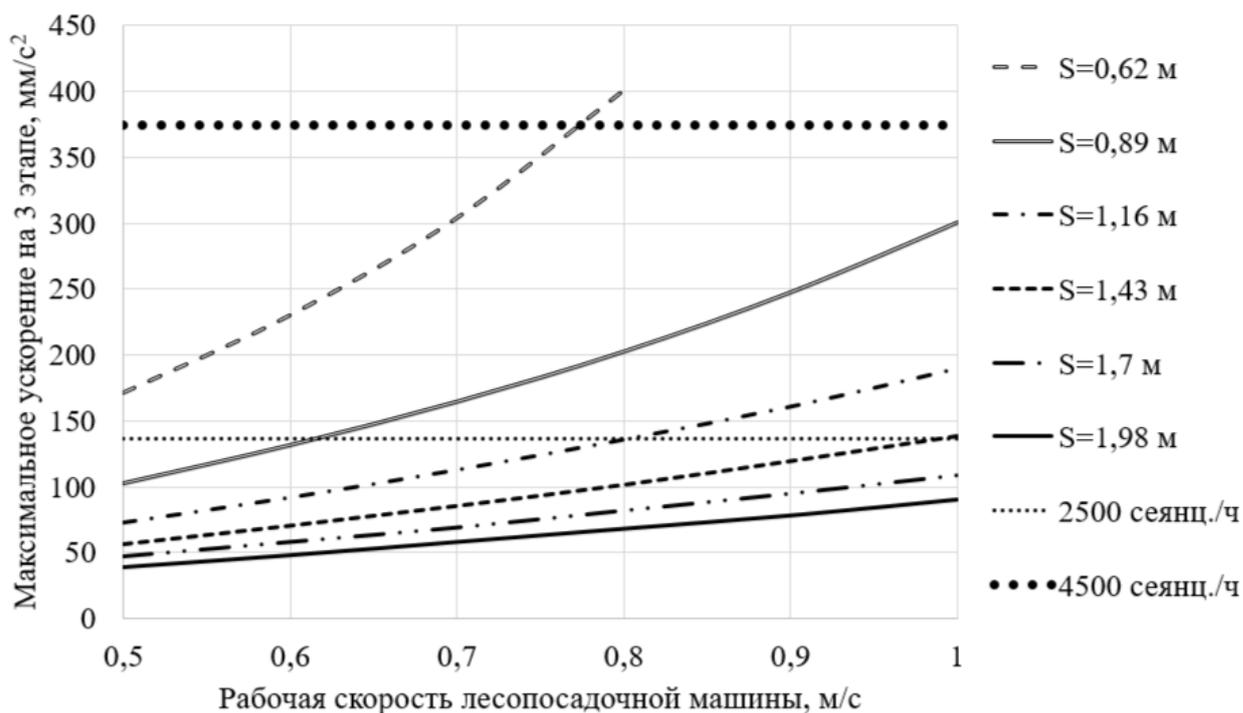


Рисунок 2.18 – Зависимость максимального ускорения движения захвата по оси у от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при  $n = 14$

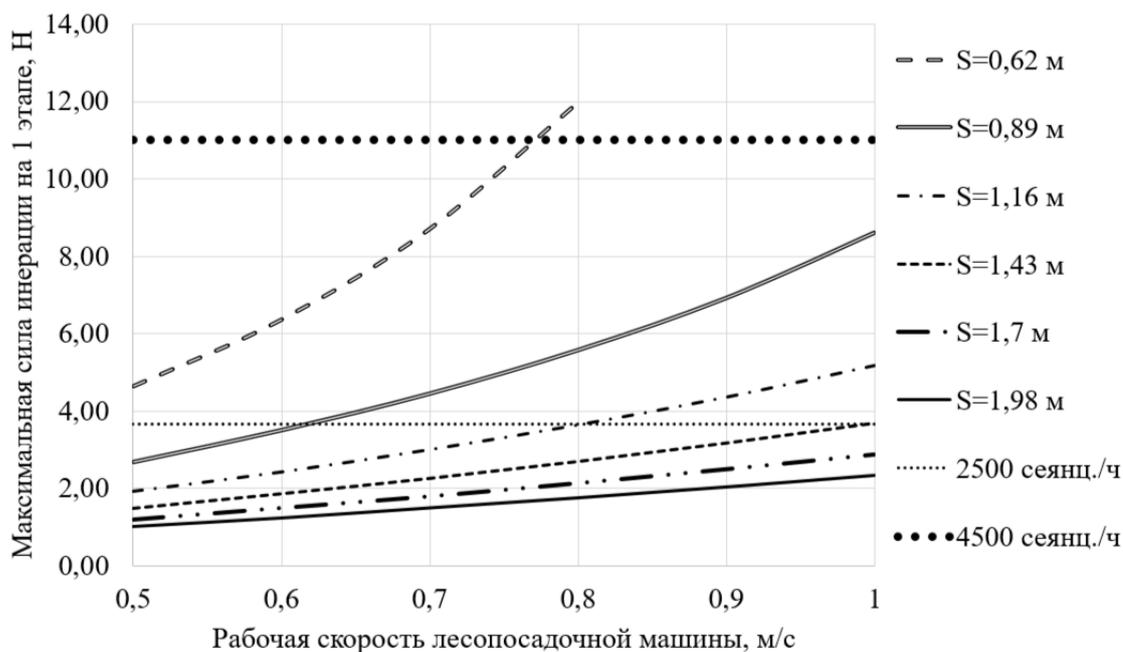


Рисунок 2.19 – Зависимость максимальной силы инерции захвата от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при  $n = 14$

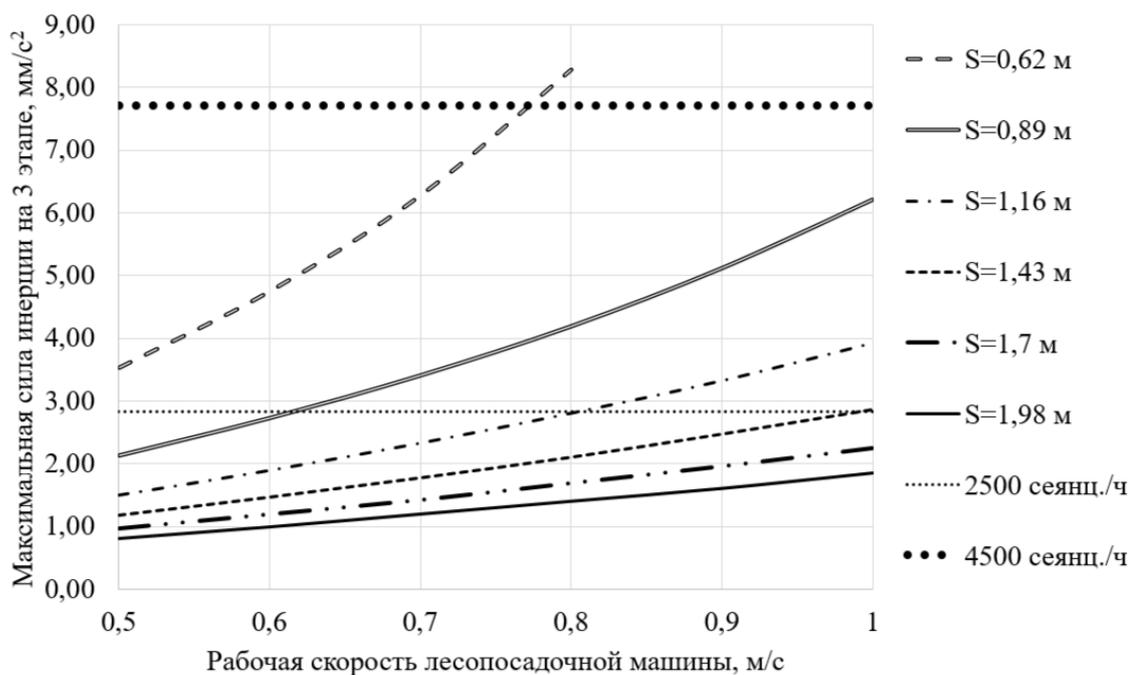


Рисунок 2.20 – Зависимость максимальной силы инерции захвата от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при  $n = 14$

Согласно полученным графикам с повышением объема накопителя увеличивается время работы первой секции, что в свою очередь способствует снижению скорости, ускорения и силы инерции механизма захвата. Так, при увеличении ёмкости накопителя с 10 до 12 сеянцев происходит снижение скорости, ускорения и силы инерции механизма захвата в 1,25-2,35 раз. При

увеличении ёмкости накопителя с 10 до 14 семян снижение вышеуказанных характеристик механизма захвата варьируется в пределах в 1,47-4,23 раз. Таким образом увеличение объема накопителя снижает требования к скоростным характеристикам исполнительных элементов.

Заявленная теоретическая производительность лесопосадочной машины ZKT WOLF PRO с объемом накопителя в 10 семян достигается при максимальной скорости механизма захвата 205 мм/с для первого этапа (Приложение В, рисунок В1) и 147 мм/с для третьего этапа (Приложение В, рисунок В2). Максимальное ускорение при данном количестве семян в накопителе составляет 321 мм/с<sup>2</sup> для первого этапа (Приложение В, рисунок В3) и 231 мм/с<sup>2</sup> для третьего этапа (Приложение В, рисунок В4). Максимальная сила инерции при количестве семян в накопителе, равном 10 составит 6,42 Н для первого этапа (Приложение В, рисунок В5) и 4,77 Н для третьего этапа (Приложение В, рисунок В6). Полученные данные графиков для  $n = 12$  и  $n = 14$  (рисунки 2.15-2.20 и Приложение В, рисунки В1-В12) сведем в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики работы первой секции на 1 и 3 этапах при производительности лесопосадочной машины 2500 семян в час

| Количество семян в накопителе, $n$  | 10   |        | 12     |        | 14     |        |
|---|--|--------|--------|--------|--------|--------|
|   | 1 этап   | 3 этап | 1 этап | 3 этап | 1 этап | 3 этап |
| Максимальная скорость, мм/с   | 205  | 147    | 149    | 110    | 117    | 87     |
| Максимальное ускорение, мм/с <sup>2</sup>                                   | 321  | 231    | 234    | 172    | 183    | 137    |
| Максимальная сила инерции, Н  | 6,42   | 4,77   | 4,68   | 3,55   | 3,66   | 2,83   |
| Режимы работы:<br>- шаг посадки, $S$ , м;<br>- скорость машины, $V_p$ , м/с | 1) $S=0,62$ ; $V_p<0,5$<br>2) $S=0,89$ ; $V_p=0,6$<br>3) $S=1,16$ ; $V_p=0,8$<br>4) $S=1,43$ $V_p=1,0$<br>5) $S=1,70$ ; $V_p>1,0$<br>6) $S=1,98$ ; $V_p>1,0$ |        |        |        |        |        |

Производительность лесопосадочной машины ZKT WOLFPRO величиной 4500 семян в час с объемом накопителя в 10 семян достигается при максимальной скорости механизма захвата 848 мм/с для первого этапа (Приложение В, рисунок В1) и 619 мм/с для третьего этапа (Приложение В, рисунок В2). Максимальное ускорение при данном количестве семян в накопителе составляет 1749 мм/с<sup>2</sup> для первого этапа (Приложение В, рисунок В3) и 972 мм/с<sup>2</sup> для третьего этапа (Приложение В, рисунок В4). Максимальная сила инерции при количестве семян в накопителе, равном 10 составит 34,98 Н для первого этапа (Приложение В, рисунок В5) и 20,05 Н для третьего этапа (Приложение В, рисунок В6). Полученные данные графиков для  $n = 12$  и  $n = 14$  (рисунки 2.15-2.20 и Приложение В, рисунки В1-В12) сведем в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики работы первой секции на 1 и 3 этапах при производительности лесопосадочной машины 4500 семян в час

| Количество семян в накопителе, $n$  | 10  |        | 12     |        | 14     |        |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
|   | 1 этап  | 3 этап | 1 этап | 3 этап | 1 этап | 3 этап |
| Максимальная скорость, мм/с   | 848   | 619    | 546    | 344    | 351    | 238    |
| Максимальное ускорение, мм/с <sup>2</sup>                                   | 1749  | 972    | 858    | 540    | 551    | 374    |
| Максимальная сила инерции, Н  | 34,98   | 20,05  | 17,16  | 11,14  | 11,02  | 7,72   |
| Режимы работы:<br>- шаг посадки, $S$ , м;<br>- скорость машины, $V_p$ , м/с | 1) $S=0,62; V_p=0,78$<br>2) $S=0,89; V_p>1,0$<br>3) $S=1,16; V_p>1,0$<br>4) $S=1,43; V_p>1,0$<br>5) $S=1,70; V_p>1,0$<br>6) $S=1,98; V_p>1,0$ |        |        |        |        |        |

Польскими учеными были проведены исследования по определению максимальных ускорений, которым могут подвергаться семена при

линейном перемещении. Установлено, что влияние силы инерции на сеянец при линейном перемещении с ускорением в интервале от 15 до 30 м/с<sup>2</sup> незначительное и потеря грунта ЗКС сеянца составляет не более 2% [26-29]. В связи с этим значение лимитирующего ускорения для механизма захвата на несколько порядков превышает полученные значения в результате математического моделирования и не требует дальнейшего рассмотрения.

В отличие от ШВП ременные передачи могут достигать линейной скорости 2 и более м/с, ускорения - 2,16 м/с<sup>2</sup> без потерь в точности [83,84]. Данные значения также не являются лимитирующими факторами и не требуют дальнейшего рассмотрения.

Таким образом 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).

Исходя из этого определим в зависимости от режимов работы предельную производительность лесопосадочной машины, которую может обеспечить механизм захвата сеянцев разрабатываемой системы подачи (Таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Предельная производительность механизма захвата сеянцев в зависимости от режимов работы лесопосадочной машины

| <b>Шаг посадки, м</b> | <b>Рабочая скорость лесопосадочной машина, м/с</b> | <b>Производительность, сеян./час</b> |
|-----------------------|--|--------------------------------------|
| 0,62                  | 1,0  | 5806                                 |
| 0,89                  | 1,0  | 4045                                 |
| 1,16                  | 1,0  | 3103                                 |
| 1,43                  | 1,0  | 2517                                 |
| 1,7                   | 1,0  | 2118                                 |
| 1,98                  | 1,0  | 1818                                 |

Согласно полученным данным, лимитируемая работой механизма



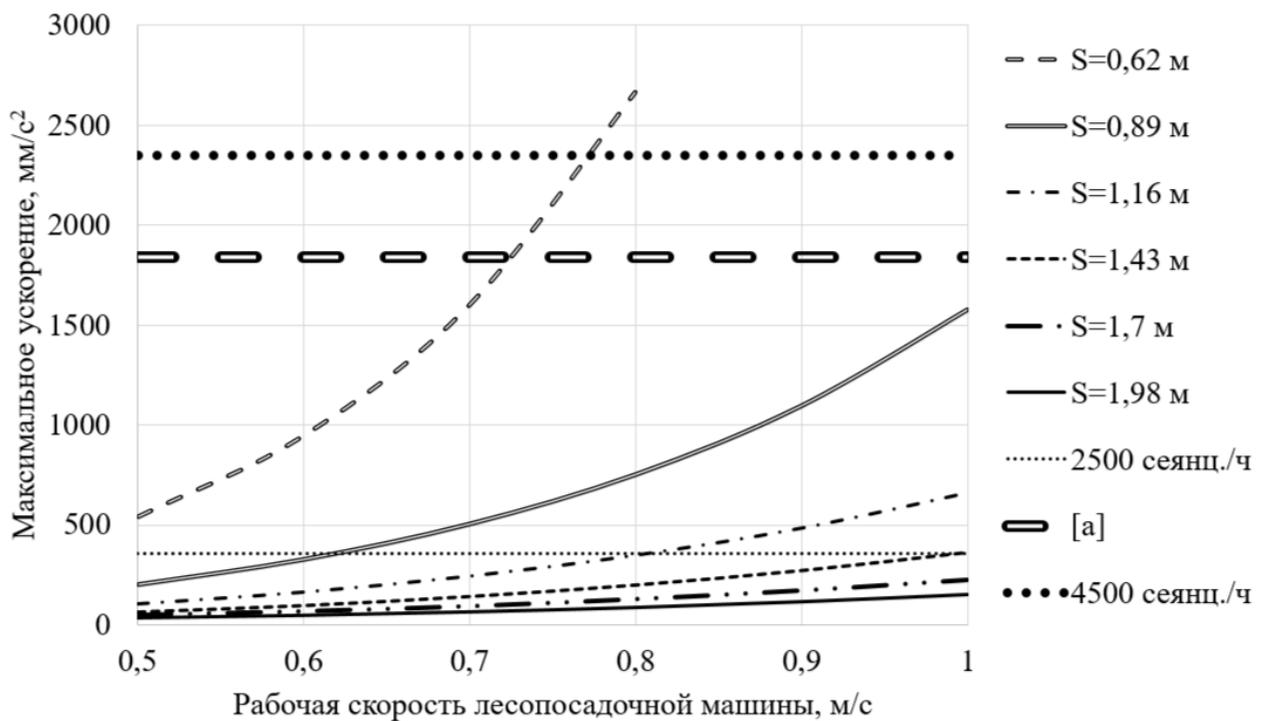


Рисунок 2.22 – Зависимость максимального ускорения сеянца, движущегося в накопителе, от рабочей скорости лесопосадочной машины

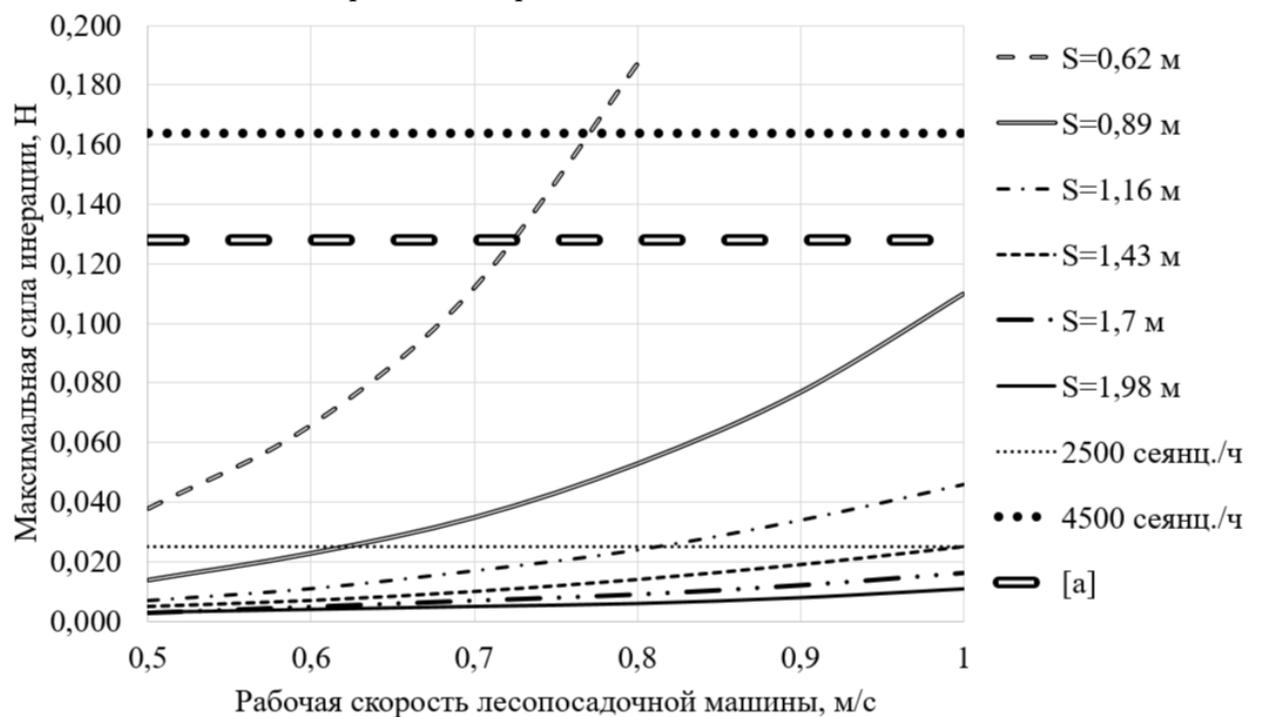


Рисунок 2.23 – Зависимость максимальной силы инерции сеянца, движущегося в накопителе, от рабочей скорости лесопосадочной машины

Главным фактором лимитирующим производительность второй секции является предельное ускорение, при котором происходит опрокидывание сеянца. Согласно приведённым графикам, были получены характеристики,

обеспечивающие работу конвейера с необходимой производительностью при каждом шаге посадки (таблица 2.5). При этом производительность 4500 семян в час выходит за пределы допустимого значения ускорения.

Таблица 2.5 – Характеристики работы второй секции на 1 этапе при производительности 2500 семян в час

| № | Режим работы                 | Максимальная скорость, мм/с | Максимальное ускорение, мм/с <sup>2</sup> | Максимальная сила инерции семени, Н·10 <sup>-3</sup> |
|---|------------------------------|-----------------------------|---|--|
| 1 | S=0,62; V <sub>p</sub> =0,43 | 118                         | 354                                       | 25   |
| 2 | S=0,89; V <sub>p</sub> =0,62 | 119                         | 358                                       | 25   |
| 3 | S=1,16; V <sub>p</sub> =0,81 | 119                         | 361                                       | 25   |
| 4 | S=1,43 V <sub>p</sub> =1,0   | 120                         | 362                                       | 25   |
| 5 | S=1,70; V <sub>p</sub> =1,2  | 121                         | 372                                       | 26   |
| 6 | S=1,98; V <sub>p</sub> =1,4  | 121                         | 373                                       | 26   |

Как видно из таблицы 2.5 максимальные ускорения меньше лимитирующего значения в 4,93 раз, что позволяет применять данные характеристики для работы второй секции механизированной системы подачи семян в лесопосадочный аппарат.

Таким образом ограничивающими производительность работы конвейерного механизма подачи семян факторами являются ускорение семени (1839 мм/с<sup>2</sup>) и максимальная рабочая скорость лесопосадочной машины (1,0 м/с).

Исходя из этого определим в зависимости от режимов работы предельную производительность лесопосадочной машины, которую может обеспечить конвейерный механизм подачи семян разрабатываемой системы подачи (Таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Предельная производительность конвейерного механизма подачи семян в зависимости от режимов работы лесопосадочной машины

| Шаг посадки, м | Рабочая скорость лесопосадочной машина, м/с | Производительность, сеян./час |
|----------------|---|-------------------------------|
| 0,62           | 0,72  | 4181                          |
| 0,89           | 1,0   | 4045                          |
| 1,16           | 1,0   | 3103                          |
| 1,43           | 1,0   | 2517                          |
| 1,7            | 1,0   | 2118                          |
| 1,98           | 1,0   | 1818                          |

Согласно полученным данным, лимитируемая работой конвейерного механизма подачи семян и рабочей скоростью производительность лесопосадочной машины, оснащенной системой подачи семян в посадочный аппарат, варьируется в зависимости от шага посадки от 1818 до 4181, что превышает заявленную производительность до 67,2% при минимальном шаге посадки.

В результате анализа данных, приведенных в таблицах 2.2 и 2.5, были получены характеристики работы первой и второй секции механизированной системы подачи семян в посадочный аппарат лесопосадочной машины ZKT WOLF PRO при заявленной производительности 2500 семян в час (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Характеристики работы первой и второй при производительности 2500 семян в час

| Секция   | $V_{max}$ , мм/с | $a_{max}$ , мм/с <sup>2</sup> | $F_{max}$ , Н      | n, шт |
|----------|------------------|-------------------------------|--------------------|-------|
| 1, ось y | 117              | 183                           | 3,66               | 14    |
| 1, ось z | 200              | 483                           | 2,24               |       |
| 2        | 118              | 355                           | $25 \cdot 10^{-3}$ |       |

Производительность лесопосадочной машины, оснащенной системой подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат в зависимости от режимов работы приведена в таблице 2.8. Количество семян на гектар приведено

при условии, что шаг посадки равен расстоянию между рядами высаживаемых семян.

Таблица 2.8 – Производительность лесопосадочной машины в зависимости от режимов работы

| <b>Шаг посадки, м</b> | <b>Рабочая скорость лесопосадочной машина, м/с</b> | <b>Производительность, сеян./час</b> | <b>Кол-во сеянцев на гектар, шт.</b> |
|-----------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0,62                  | 0,5-0,72   | 2903-4181                            | 26 015                               |
| 0,89                  | 0,5-1,0  | 2022-4045                            | 12 625                               |
| 1,16                  | 0,5-1,0  | 1552-3103                            | 7 432                                |
| 1,43                  | 0,5-1,0  | 1259-2517                            | 4 890                                |
| 1,7                   | 0,5-1,0  | 1059-2118                            | 3 460                                |
| 1,98                  | 0,5-1,0  | 952-1818                             | 2 551                                |

Производительность лесопосадочной машины, оснащенной механизированной системой подачи семян в посадочный аппарат, варьируется в зависимости от шага посадки и рабочей скорости от 952 до 4181 семян в час. При этом максимальная производительность превышает заявленную до 67,2%.

### **Выводы по второй главе**

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Установлена необходимость в проведении экспериментального исследования для определения усилия, необходимого для извлечения семян из ячеек кассеты.

2. В результате моделирования получены характеристики работы первой секции при заданной производительности лесопосадочной машины. При производительности 4500 семян в час и количестве семян в накопителе, равном 14, максимальные скорость и ускорение перемещения

механизма захвата на первом этапе (при перемещении к сеянцам) достигает 351 мм/с и 551 мм/с<sup>2</sup> соответственно, на третьем этапе (при перемещении с сеянцами) – 238 мм/с и 374 мм/с<sup>2</sup> соответственно. При производительности 2500 сеянцев в час и количестве сеянцев в накопителе, равном 14, максимальные скорость и ускорение перемещения механизма захвата на первом этапе (при перемещении к сеянцам) достигает 117 мм/с и 183 мм/с<sup>2</sup> соответственно, на третьем этапе (при перемещении с сеянцами) – 87 мм/с и 137 мм/с<sup>2</sup> соответственно.

3. Установлено, что с повышением объема накопителя увеличивается время работы первой секции, что в свою очередь способствует снижению скорости, ускорения и силы инерции механизма захвата. Так, при увеличении емкости накопителя с 10 до 12 сеянцев происходит снижение скорости, ускорения и силы инерции механизма захвата в 1,25-2,35 раз. При увеличении ёмкости накопителя с 10 до 14 сеянцев снижение вышеуказанных характеристик механизма захвата варьируется в пределах в 1,47-4,23 раз.

4. 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).

5. Ограничивающими производительность работы конвейерного механизма подачи сеянцев факторами являются ускорение сеянца (1839 мм/с<sup>2</sup>) и максимальная рабочая скорость лесопосадочной машины (1,0 м/с).

6. 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 сеянцев в час. При этом максимальная производительность превышает заявленную до 67,2%.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ СЕЯНЦЕВ С ЗКС В ПОСАДОЧНЫЙ АППАРАТ**

Наиболее сложным этапом рабочих процессов подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат является процесс извлечения семян из ячеек кассеты, поскольку одним из важных факторов является усилие, возникающее при извлечении семени из ячейки кассеты, величина которого зависит от множества факторов и требует дополнительного исследования. Исходя из этого было принято решение провести натурный эксперимент процесса извлечения семян из ячеек кассеты [75].

Натурный эксперимент по исследованию рабочих процессов других этапов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат трудоёмок и требует ресурсов на изготовление системы, приобретение и доставку базовой машины, монтаж системы подачи на базовую машину, приобретение и монтаж специализированных систем измерения. В связи с этим было принято решение провести машинный эксперимент, что позволяет получить числовые результаты в любом диапазоне изменения входных значений.

В качестве среды для проведения машинного эксперимента был выбран SolidWorks Motion - модуль для кинематического и динамического анализа механизмов внутри САПР SolidWorks. Данные SolidWorks Motion базируются на численных методах решения уравнений движения и учитывают реальные характеристики деталей: массу, инерцию, силы трения, нагрузки. Модуль широко используется в машиностроении, робототехнике и испытании различных механизмов, что подтверждает его практическую полезность и доверие со стороны инженеров [85-89].

### **3.1. Цель и задачи исследования**

Целью исследований является определение оптимальных характеристик рабочих процессов системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия.

Для достижения цели экспериментальных исследований необходимо решить следующие задачи:

- исследование влияния основных факторов процесса подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат из ячеек кассеты на скорости и ускорения перемещения механизма захвата;
- определение оптимальных режимов работы системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины;
- оценка влияния основных факторов на величину усилия извлечения семян с ЗКС из кассет захватным механизмом.

### **3.2. Методика проведения эксперимента**

#### **3.2.1. Описание твердотельной модели системы подачи семян в лесопосадочный аппарат**

В программном комплексе SolidWorks была разработана твердотельная модель системы подачи семян в лесопосадочный аппарат, включающая в себя (рисунок 3.1): 1 – портал с направляющими, 2 – механизм, обеспечивающий перемещение захватного устройства вдоль горизонтальной оси (ось  $y$ ), 3 – механизм, обеспечивающий перемещение захватного устройства вдоль вертикальной оси (ось  $z$ ), 4 – механизм захвата семян, 5 – накопитель, 6 – кассета с сеянцами.

Исследование рабочих процессов системы подачи проводилось с помощью специализированного модуля SolidWorks Motion, который обеспечивает точное моделирование движения в сборке.

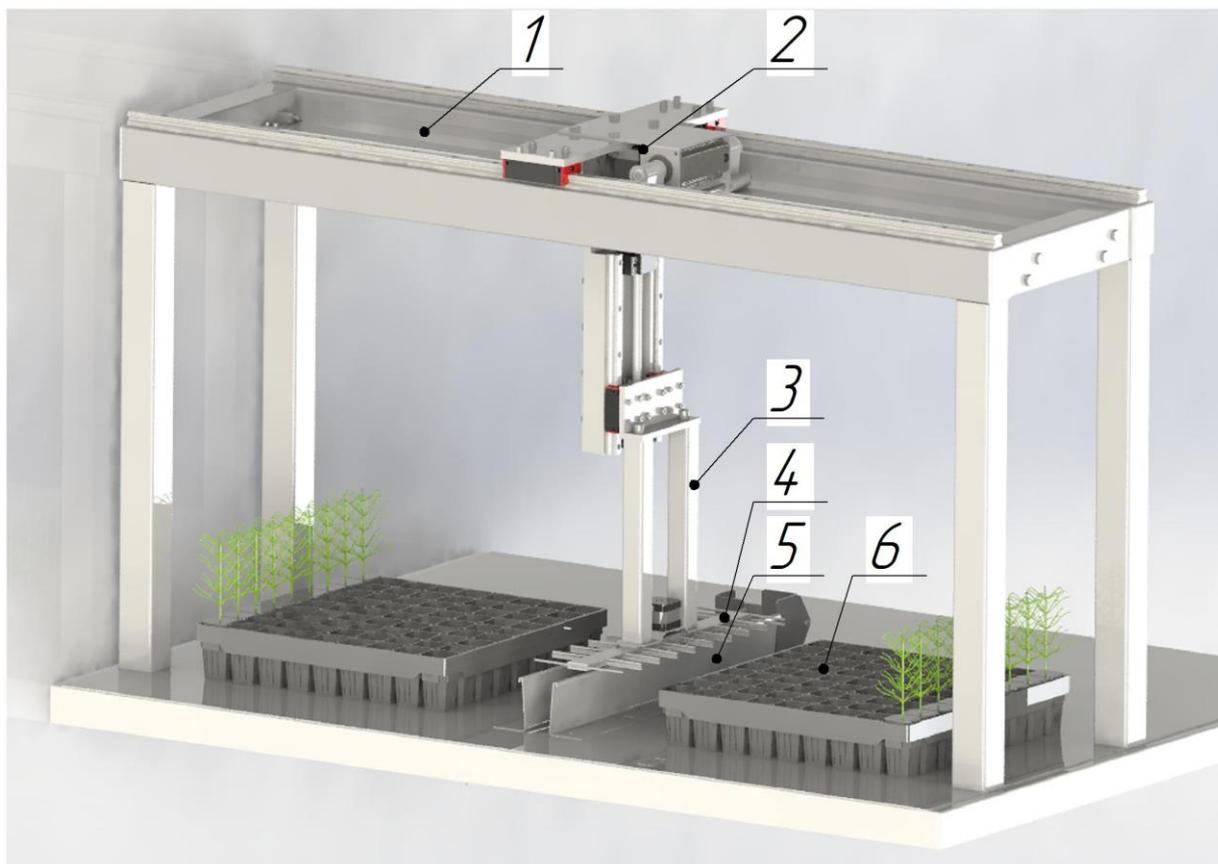
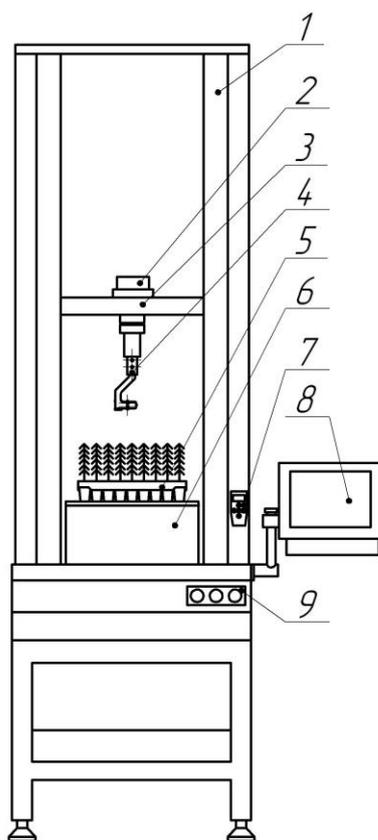


Рисунок 3.1 – 3D модель системы подачи семян в посадочный аппарат лесопосадочной машины

### 3.2.2. Описание экспериментальной установки для извлечения семян из ячеек кассет

Исследование процесса извлечения семян из ячеек кассет проводилось на экспериментальной установке, основой которой является испытательная машина Testsystems UTC-110MH-30-0Y (рисунок 3.2). Конструкция экспериментальной установки включает в себя: две силовые колонны 1 с винтовыми колоннами внутри для перемещения подвижной траверсы, силоизмерительный датчик 2 для измерения усилия извлечения семени с ЗКС из кассеты, траверса верхняя подвижная 3, на которой установлено захватное устройство 4 для семян с ЗКС, кассета с сеянцами 5, стол 6 для установки кассет с сеянцами, дистанционный пульт управления установкой 7, цветной сенсорный дисплей 8 для ввода и вывода данных,

панель ручного управления 9.



1 – силовая и винтовая колонны; 2 – силоизмерительный датчик; 3 - траверса верхняя подвижная; 4 – захватное устройство для семян с ЗКС; 5 – кассета с сеянцами; 6 – стол для кассеты; 7 – пульт оператора дистанционный; 8 – цветной сенсорный дисплей; 9 – панель ручного управления

Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка для извлечения сеянцев

Некоторые технические характеристики установки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики экспериментальной установки для извлечения сеянцев

| Параметр  | Значение    |
|---|-------------|
| Наибольшая предельная нагрузка, кН                  | 30          |
| Диапазон измерений нагрузки, кН                     | 0,3 – 30    |
| Относительная погрешность измерений нагрузки, %     | 0,5         |
| Диапазон рабочих скоростей, мм/мин                  | 0,005 – 500 |
| Полный рабочий ход подвижной траверсы, мм, не менее | 1000        |
| Расстояние между колоннами, мм, не менее            | 420         |

| Параметр   | Значение   |
|--|------------|
| Габаритные размеры кассеты для семян с ЗКС, мм                                 | 380*380*72 |
| Высота стола для кассеты, мм   | 275        |
| Абсолютная погрешность измерений перемещения подвижной траверсы, мм, не более: |            |
| - от 0,1 до 50 включительно;   | 0,01       |
| - свыше 50 до 300 включительно;  | 0,1        |
| - свыше 300.   | 0,5        |

### 3.2.3. Описание захватного устройства для семян с ЗКС

Для захвата корневой шейки семян с ЗКС в программе КОМПАС 3D было разработано захватное устройство, неметаллические элементы которого были напечатаны на 3D принтере (рисунок 3.3). Конструкция устройства спроектирована таким образом, чтоб продольная ось стебля семени совпадала с осью крепления захватного устройства, что необходимо для исключения возникновения изгибающих моментов и уменьшения погрешности измерения [90-94].

Площадь рабочей поверхности пластин захвата была подобрана таким образом, чтобы обеспечить достаточное трение без критических повреждений корневой шейки при извлечении семени [75].

Регулировка усилия удержания семени в захвате осуществлялась с помощью перемещения вдоль направляющих 6 регулировочной пластины 5, которая в свою очередь изменяла длину пружины 4 и, соответственно, прижимную силу пластины 3. На удерживающие семя пластины были установлены резиновые прокладки. Диапазон регулировки усилия удержания семени в захвате варьировался от 9,7 до 35 Н в зависимости от степени сжатия пружины.

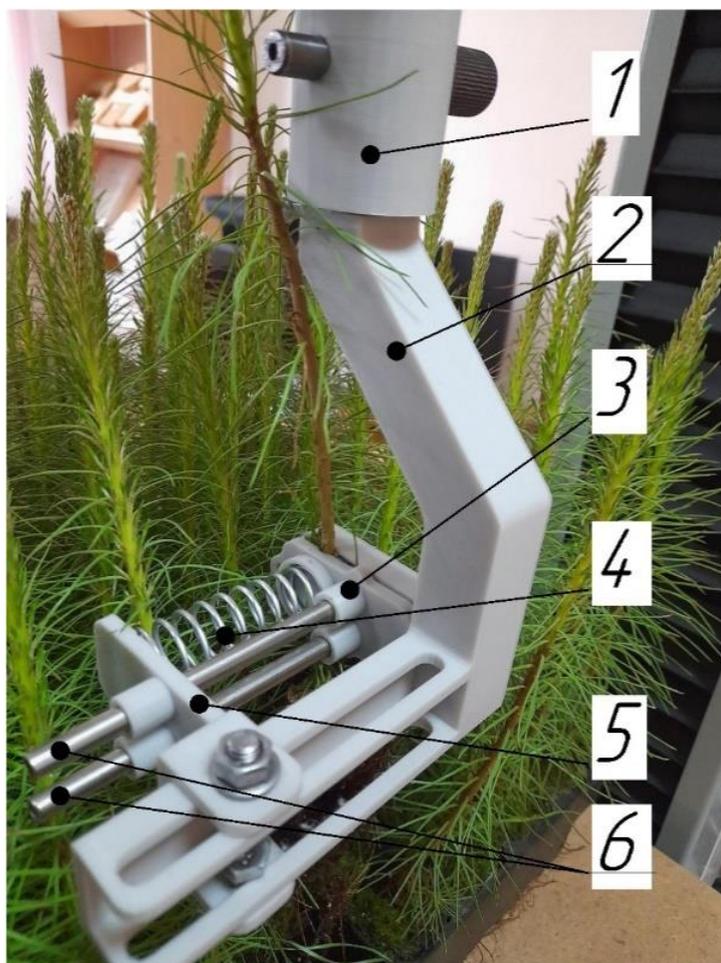


Рисунок 3.3 – Захватное устройство для сеянцев с ЗКС:  
 1 – втулка-крепление; 2 – основание захвата; 3 – прижимная пластина; 4 – пружина; 5 – регулировочная пластина; 6 – направляющие

### 3.2.4. Характеристики сеянцев с ЗКС и высота толкателей

В качестве объекта исследования использовались сеянцы 1 - летней сосны обыкновенной с ЗКС, выращенные в специальных кассетах для хвойных деревьев с ЗКС в красноярском лесничестве. Семена сеянцев были посеяны 18.05.2023 г. На момент испытания сеянцы имели высоту от 15 до 25 см, диаметр корневой шейки варьировался в пределах от 2,1 до 2,9 мм. Некоторые характеристики сеянцев приведены в таблице 3.2. Кассета для сеянцев с ЗКС изготовлена из полипропилена. Основные характеристики кассеты: Д×В×Ш (мм) кассеты: 385×385×73, размер ячейки (мм): 41×41×73, объем ячейки (см<sup>3</sup>): 85, количество ячеек: 81, вес кассеты 970 г (рисунок 3.4).

Таблица 3.2 – Характеристики сеянцев сосны с ЗКС

| Значение     | Высота стебля, мм | Высота кома почвы, мм | Общая высота сеянца, мм | Диаметр стебля, мм | Масса сеянца, г |
|--------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|
| Минимальное  | 85                | 65                    | 150                     | 2,1                | 70,7            |
| Максимальное | 180               | 70                    | 250                     | 2,9                | 79,3            |



Рисунок 3.4 – Кассета с сеянцами

В целях минимизации влияния силы трения покоя на величину усилия извлечения сеянца из ячейки использовались напечатанные на 3D принтере толкатели высотой 5, 10 и 15 мм, позволяющие предварительно частично извлечь сеянец из ячейки (рисунок 3.5). Предварительно было установлено, что использование толкателей более 15 мм вызывает значительный наклон стебля сеянца относительно продольной оси захватного устройства, что не допустимо в случае механизированного извлечения сеянцев.

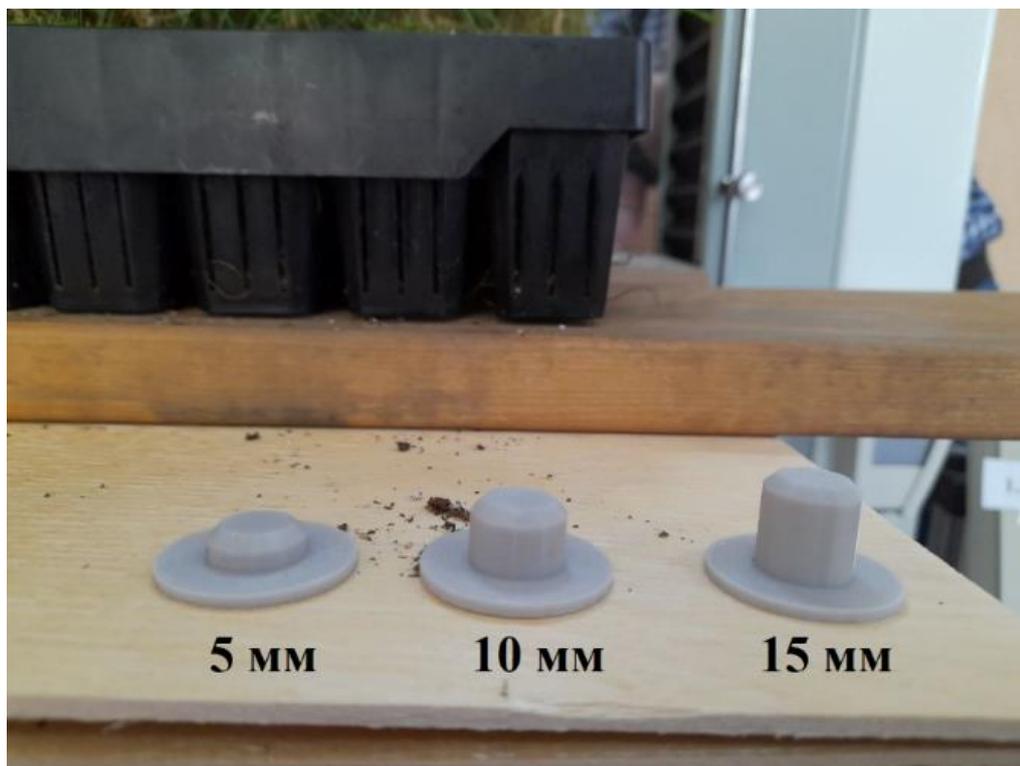


Рисунок 3.5 – Толкатели для частичного извлечения сеянцев из ячейки

### 3.2.5. Порядок проведения эксперимента

Подготовка экспериментальной установки к испытаниям проводилась следующим образом: захватное устройство для сеянцев с ЗКС устанавливалось с помощью втулки-крепления на подвижную траверсу универсальной испытательной машины, кассета с сеянцами помещалась на специальный столик, который закреплялся на неподвижной траверсе таким образом, чтобы захват находился над крайним рядом ячеек кассет. Захват устанавливался у основания корневой шейки, усилие удержания сеянца было отрегулировано таким образом, чтоб стержень не проскальзывал между удерживающими пластинами при извлечении и составляло 24 Н.

С помощью цифрового дисплея универсальной испытательной машины устанавливались требуемые характеристики для проведения испытаний. Вид испытания – растяжение. Захват, закрепленный на траверсе испытательной машины, поднимал сеянцы на высоту 100 мм с постоянной скоростью равной 500 мм/мин. В процессе извлечения сеянцев из кассеты испытательная

машина строила график зависимости усилия ( $F$ , Н) от перемещения ( $L$ , мм).

После извлечения захватом первого крайнего ряда семян, производилось перемещение столика с кассетой на величину равную одному ряду для извлечения следующего ряда семян. Полученные данные выводились на цифровой дисплей в виде графиков и таблицы с массивом данных, и сохранялись для дальнейшего анализа, в названии файла указывался номер опыта.

При проведении опыта с использованием толкателей высотой от 5 до 15 мм, производилась установка толкателя необходимой высоты до упора в круглое центральное отверстие, расположенное на дне ячейки испытуемого семени, далее кассета устанавливалась таким образом, чтоб семя с толкателем располагался под захватным устройством испытательной установки. После извлечения семени, толкатель устанавливался в следующую ячейку для дальнейших испытаний.

Обрезка корней осуществлялась следующим образом: корни, вышедшие за пределы дна ячейки, аккуратно обрезались секатором таким образом, чтоб длина корней не превышала одну треть высоты ячейки кассеты.

В конце каждого испытания производилась запись. Для записи результатов испытаний использовалось стандартное программное обеспечение, используемое при работе испытательной машины УТС-110МН-30-0У и USB флэш-накопитель (рисунок 3.6). Машина работала в режиме Испытание «Растяжение» с постоянной скоростью перемещения подвижной траверсы.

Эмпирическим путем было установлено, что диаметр корней, вышедших за пределы ячейки, варьируется в пределах от 0,40 до 0,85 мм (рисунок 3.7).

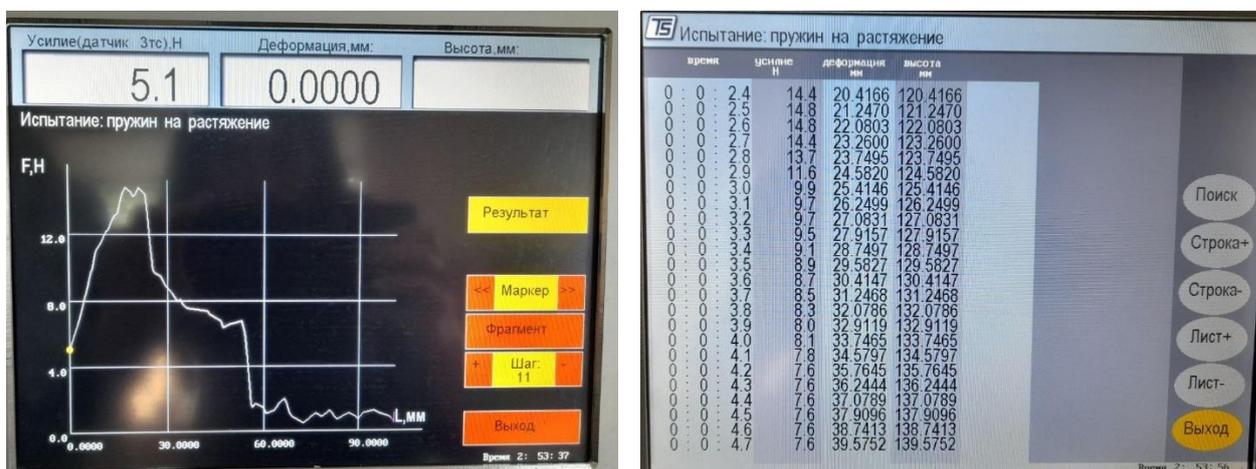


Рисунок 3.6 – Проведение испытаний на УТС-110МН-30-0У



Рисунок 3.7 – Корни, вышедшие за пределы ячейки кассеты

Для определения предельных напряжений, возникающих при растяжении корней применялась следующая методика [95]. На точные весы устанавливалась с помощью специальных скоб металлическая пластина весом 1,5 кг для обеспечения запаса датчика весов при «отрицательном» взвешивании. Один конец корня длиной 10 см закреплялся на цилиндрический стержень диаметром 2 мм, который фиксировался к точным весам с помощью канцелярского скотча, а за другой конец тянули вверх перпендикулярно плоскости рабочей поверхности весов, предварительно обнулив показания весов, при этом велась видеозапись показаний на экране

весов (Рисунок 3.8). В процессе натяжения корня при определенном усилии происходит разрыв. По видеозаписи определялась максимальная масса в момент разрыва корня. По полученной массе определялось усилие. Предельные напряжения определялись по формуле (2.6). После проведения ряда испытаний было получено среднее значение предельных напряжений.

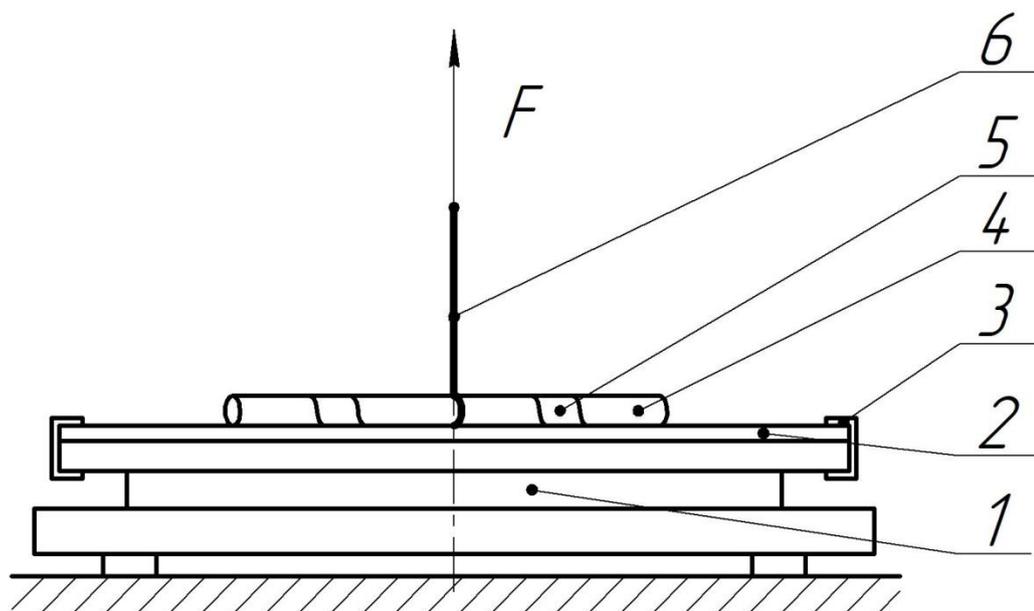


Рисунок 3.8 – Схема определения предельных напряжений, возникающих при растяжении корней: 1 – весы; 2 – металлическая пластина; 3 – крепежные скобы; 4 – цилиндрический стержень; 5 – канцелярский скотч, 6 – корень

Машинный эксперимент на твердотельной модели проводился следующим образом. В программе SolidWorks с открытой твердотельной моделью системы подачи семян в посадочный аппарат запускалось дополнение SolidWorks Motion и создавалось новое исследование движения. В качестве источников энергии для перемещения механизма захвата по осям  $Y$  и  $Z$  был выбран линейный тип двигателя и установлены: элементы конструкции, к которым приложено силовое воздействие, направление силового воздействия, закон движения (рисунки 3.9, 3.10). S-образный закон движения механизмов перемещения захватного устройства устанавливался с помощью конструктора функций (рисунок 3.11). В конструкторе функций задавалось значение суммарного времени перемещения механизма на  $j$ -ом

этапе согласно матрице планирования.

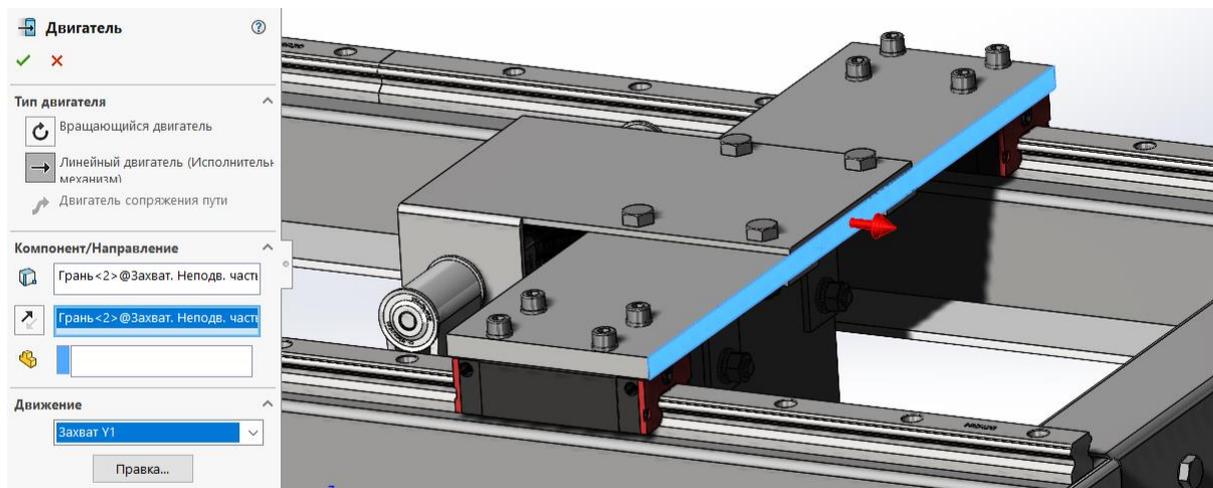


Рисунок 3.9 – Установка характеристик двигателя механизма перемещения захватного устройства вдоль горизонтальной оси

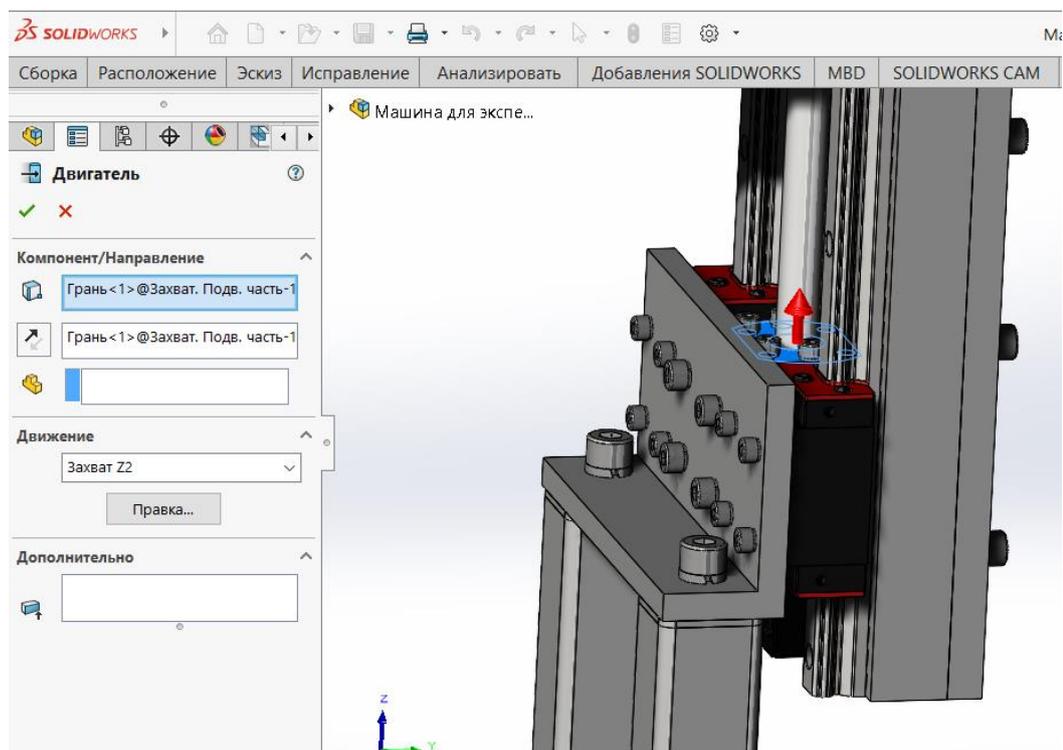


Рисунок 3.10 – Установка характеристик двигателя механизма перемещения захватного устройства вдоль вертикальной оси

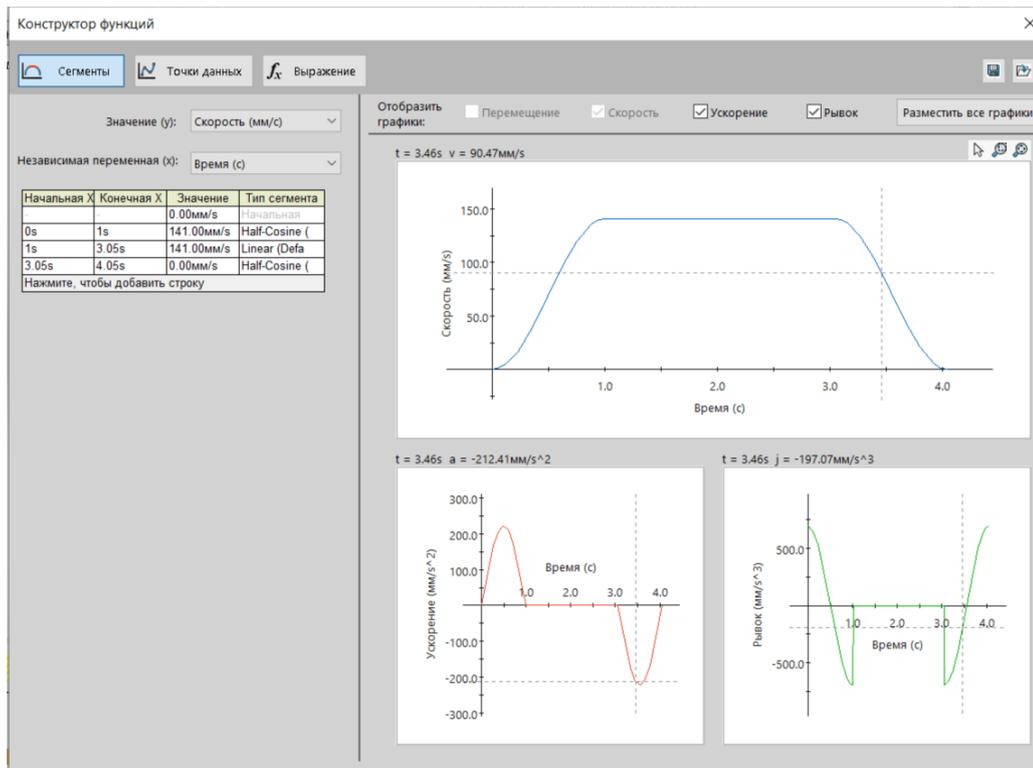


Рисунок 3.11 – Конструктор функций

Результаты исследования отображались на графиках (эпюрах) после выполнения программой соответствующих расчетов.

Измерения величин в SolidWorks Motion производилось следующим образом: строились графики (эпюры) измеряемых величин (рисунок 3.12), выполнялся экспорт массива данных в программу Microsoft Excel (рисунок 3.13).

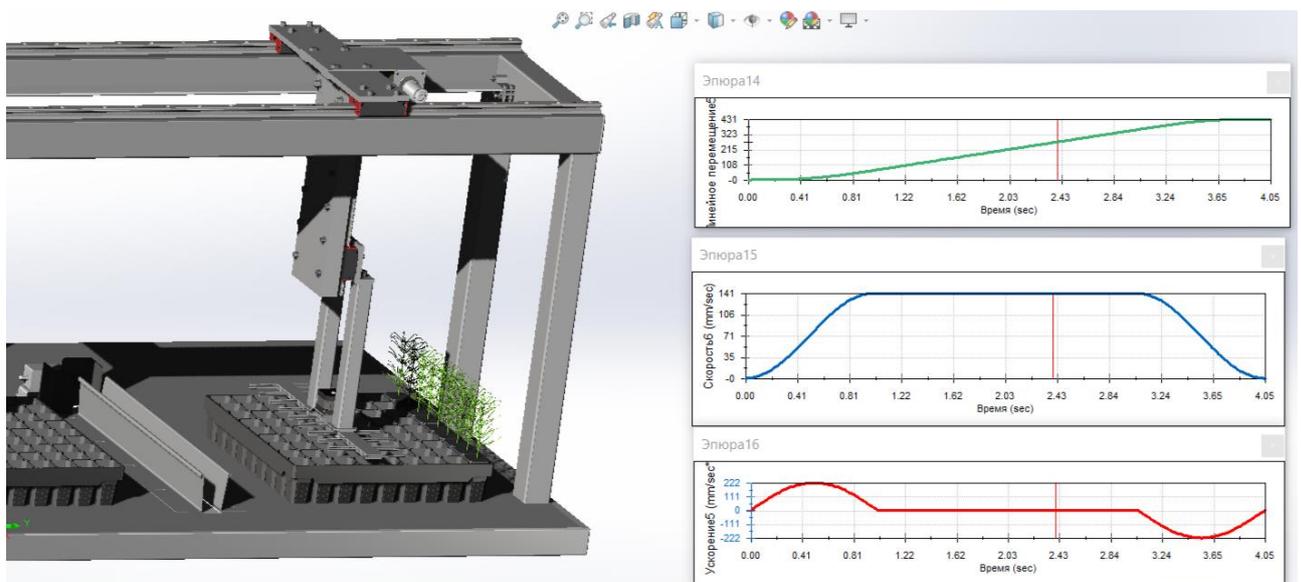


Рисунок 3.12 – Графики перемещения, скорости, ускорения механизма захвата на первом

этапе

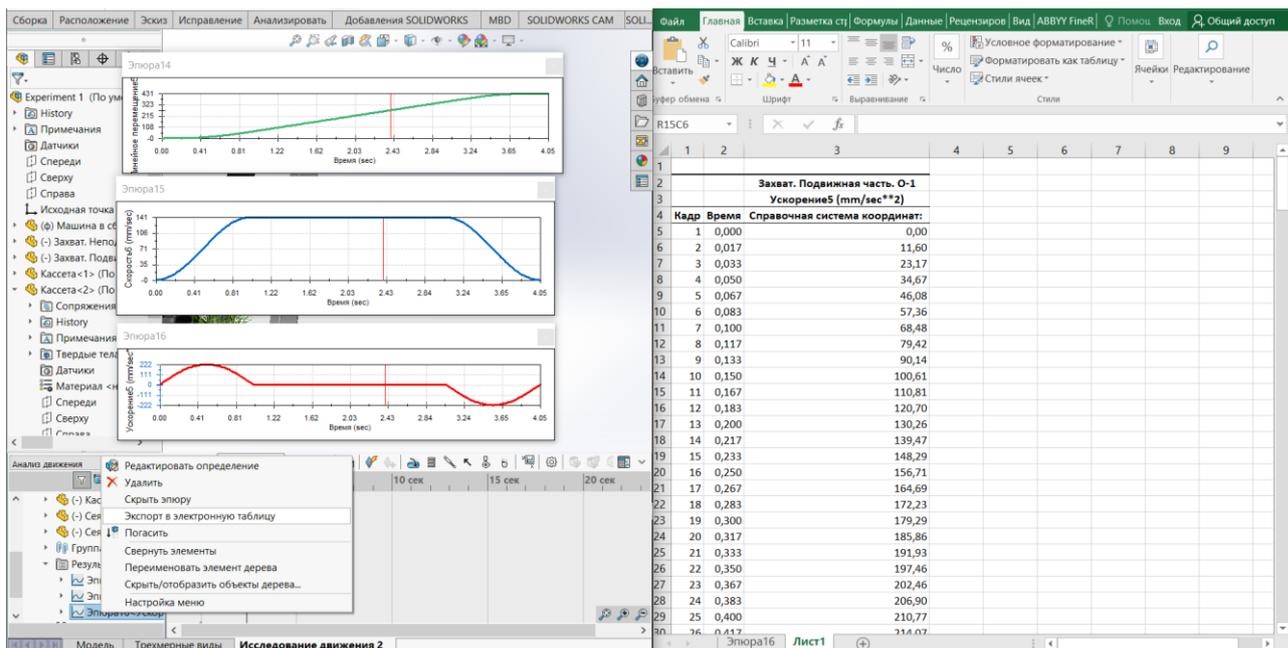


Рисунок 3.13 – Выгрузка массива данных в программу Microsoft Excel

### 3.3. Планирование проведения эксперимента

Для вывода математических уравнений, описывающих процесс подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат, был использован метод активного эксперимента. Полученные таким образом математические зависимости позволяют определить количественные связи между входными и выходными параметрами процесса.

Наиболее эффективным методом математического моделирования для анализа влияния ключевых факторов процесса подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат на скорости и ускорения перемещения механизма захвата является многофакторный эксперимент. Этот подход предоставляет возможность одновременно изменять практически все факторы при переходе к каждому новому опыту, что обеспечивает более точное и комплексное изучение влияния переменных.

В данной работе эксперимент был проведён в два этапа для построения математической модели процесса, проверки её адекватности и оценки влияния каждого учитываемого технологического фактора.

1. Исследование влияния основных факторов процесса подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат из ячеек кассеты на скорости и ускорения перемещения механизма захвата.

2. Определение оптимальных режимов работы системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины.

Первый этап заключается в планировании и реализации многофакторного эксперимента. Для построения математической модели процесса извлечения семян из ячеек использовался регрессионный анализ. Зависимости выходных параметров  $Y$  от независимой переменной  $X$  аппроксимированы уравнениями регрессии.

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 3.3.

Матрица планирования эксперимента построена с использованием пакета программы *STATGRAPHICS® Centurion* [96] (приложение Г, таблица Г1)

Таблица 3.3 – 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               | $V_{э1}$    | $Y_1$           |
| Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян, мм/с <sup>2</sup> | $a_{э1}$    | $Y_2$           |
| Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к   | $V_{э3}$    | $Y_3$           |

|   |          |       |
|---|----------|-------|
| накопителю от последнего ряда сеянцев, мм/с   |          |       |
| Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда сеянцев, мм/с <sup>2</sup> | $a_{эз}$ | $Y_4$ |
| Вторая секция   |          |       |
| Максимальная скорость перемещения сеянцев в накопителе, мм/с  | $V_{x1}$ | $Y_5$ |
| Максимальное ускорение сеянцев при перемещении в накопителе, мм/с <sup>2</sup>                                      | $a_{x1}$ | $Y_6$ |
| Общий параметр  |          |       |
| Производительность, сеянц./час  | $P$      | $Y_7$ |

По результатам многочисленных поисковых экспериментов установлены уровни и шаги изменения входных параметров, приведённые в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Уровни и шаги варьирования исследуемых факторов

| Фактор                                      | Обозначение | Шаг варьирования фактора | Уровень варьирования фактора |           |           |
|---|-------------|--------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
|   | Натуральное |                          | $X^{(-1)}$                   | $X^{(0)}$ | $X^{(1)}$ |
| Шаг посадки, м                              | $S$         | 0,68                     | 0,62                         | 1,3       | 1,98      |
| Рабочая скорость лесопосадочной машины, м/с | $V_p$       | 0,235                    | 0,53                         | 0,765     | 1,00      |
| Количество сеянцев в накопителе             | $n_n$       | 2                        | 10                           | 12        | 14        |

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

$$\begin{aligned}
Y = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{22} X_2^2 + \\
& + b_{23} X_2 X_3 + b_{33} X_3^2 + b_{112} X_1^2 X_2 + b_{113} X_1^2 X_3 + b_{122} X_1 X_2^2 + b_{123} X_1 X_2 X_3 + \\
& + b_{133} X_1 X_3^2 + b_{223} X_2^2 X_3 + b_{233} X_2 X_3^2
\end{aligned} \quad (3.1)$$

Коэффициенты уравнений регрессии для каждого выходного параметра приведены в приложении Д.

В целях получения экспериментальных значений усилия, необходимого

для извлечения сеянца из кассеты под воздействием управляемых факторов была разработана матрица планирования эксперимента [97, 98], основными факторами в которой выступили: обрезка корней на дне кассеты и высота толкателя (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Матрица планирования эксперимента

| № опыта | Факторы                     |                         | Показатель цели                                       |
|---------|-----------------------------|-------------------------|---|
|         | Обрезка корней<br>(да, нет) | Высота<br>толкателя, мм | Максимальное усилие извлечения<br>сеянца из ячейки, Н |
| 1.n     | да                          | 0                       | F <sub>1</sub>  |
| 2.n     | нет                         | 0                       | F <sub>2</sub>  |
| 3.n     | да                          | 5                       | F <sub>3</sub>  |
| 4.n     | нет                         | 5                       | F <sub>4</sub>  |
| 5.n     | да                          | 10                      | F <sub>5</sub>  |
| 6.n     | нет                         | 10                      | F <sub>6</sub>  |
| 7.n     | да                          | 15                      | F <sub>7</sub>  |
| 8.n     | нет                         | 15                      | F <sub>8</sub>  |

### 3.4. Результаты экспериментальных исследований

На данном этапе был проведен регрессионный анализ для оценки влияния величины шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества сеянцев в накопителе на характеристики системы подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины. Значения результатов проведенных экспериментов представлены в приложении Е, таблица Е1.

#### Первая секция

Наибольшие скорости и ускорения при перемещении механизма захвата по горизонтальной оси возникают при движении к последнему ряду сеянцев от накопителя. Это обусловлено тем, что в установленное время цикла механизм захвата должен преодолеть максимально возможное

расстояние.

Рисунки 3.14-3.17 показывают, как изменяются выходные параметры первой секции в зависимости от входных параметров: шага посадки  $S$ , рабочей скорости лесопосадочной машины  $V_p$ , количества семян в накопителе  $n$ .

Согласно представленным графикам, 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.

*Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян*

Известно, что при высокой скорости механизма массы движущихся частей сопротивляются изменениям своего движения с большей силой. Это приводит к значительным пиковым нагрузкам на узлы и детали, что требует более прочной конструкции и надежных креплений. Кроме того, рост

скорости увеличивает трение и тепловыделение, что дополнительно способствует ухудшению рабочих характеристик устройства и ускоренному старению материалов.

При шаге посадки 1,98 м и количестве семян в накопителе, равном 12, увеличение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с приводит к увеличению максимальной скорости механизма при перемещении к последнему ряду семян от 41 до 92 мм/с. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту максимальной скорости механизма захвата от 215 до 999 мм/с.

При шаге посадки 0,62 м и рабочей скорости лесопосадочной машины 1 м/с максимальная скорость механизма захвата составляет 1651 мм/с при  $n=10$  и 716 мм/с при  $n=14$ .

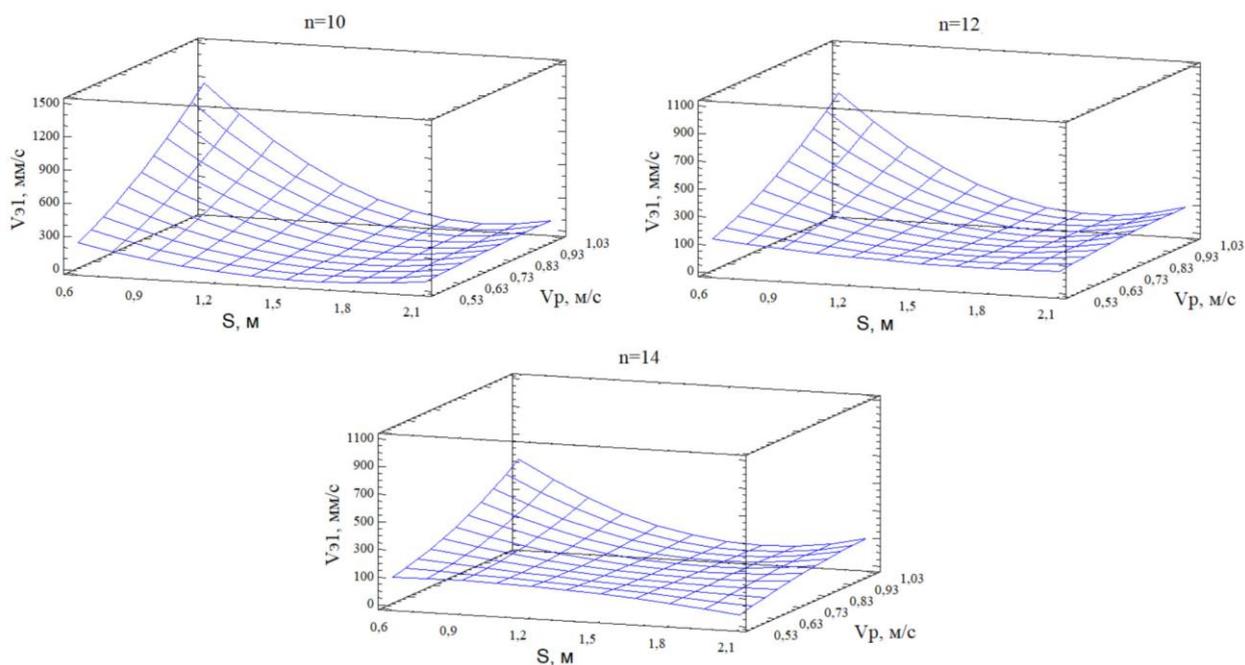


Рисунок 3.14 – Зависимость максимальной скорости механизма захвата (при перемещении к последнему ряду семян) от шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества семян в накопителе

*Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян*

Известно, что при увеличении ускорения движения рабочих органов

значительно возрастают силы инерции. Это связано с тем, что силы инерции пропорциональны массе и ускорению.

При шаге посадки 1,98 м и количестве семян в накопителе, равном 12, увеличение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с приводит к увеличению максимального ускорения механизма при перемещении к последнему ряду семян от 65 до 145 мм/с<sup>2</sup>. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту максимального ускорения механизма захвата от 337 до 2428 мм/с<sup>2</sup>.

При шаге посадки 0,62 м и рабочей скорости лесопосадочной машины 1 м/с максимальное ускорение механизма захвата составляет 6631 мм/с<sup>2</sup> при n=10 и 1248 мм/с<sup>2</sup> при n=14.

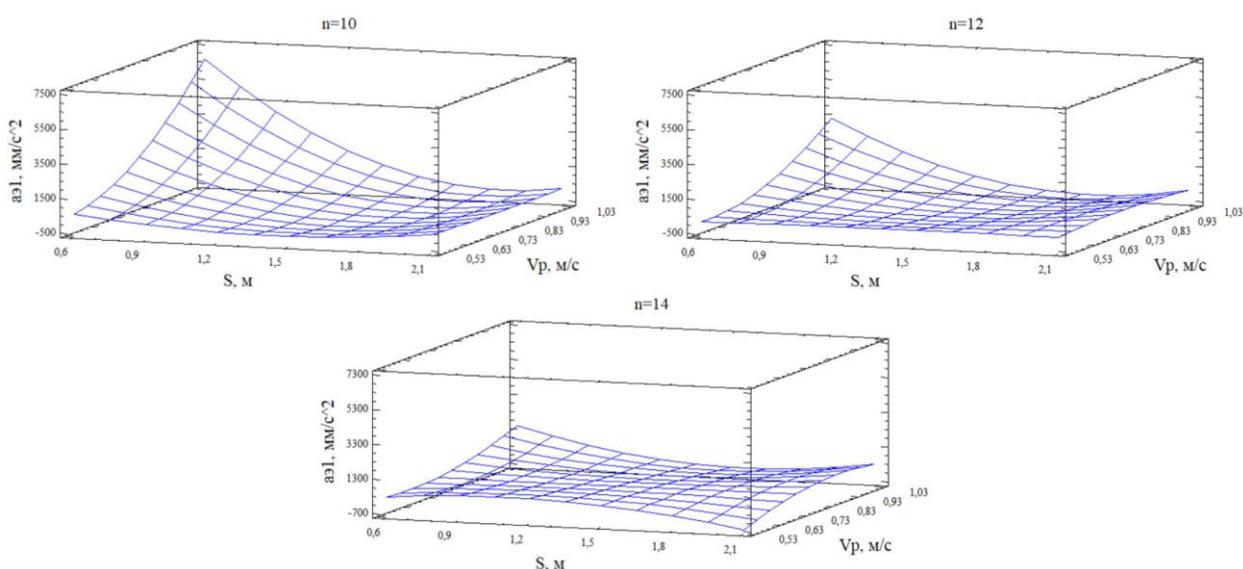


Рисунок 3.15 – Зависимость максимального ускорения механизма захвата (при перемещении к последнему ряду семян) от шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества семян в накопителе

*Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян*

При шаге посадки 1,98 м и количестве семян в накопителе, равном 12, увеличение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с приводит к увеличению максимальной скорости механизма при перемещении к накопителю от

последнего ряда сеянцев от 32 до 70 мм/с. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту максимальной скорости механизма захвата от 154 до 788 мм/с.

При шаге посадки 0,62 м и рабочей скорости лесопосадочной машины 1 м/с максимальная скорость механизма захвата составляет 1303 мм/с при  $n=10$  и 462 мм/с при  $n=14$ .

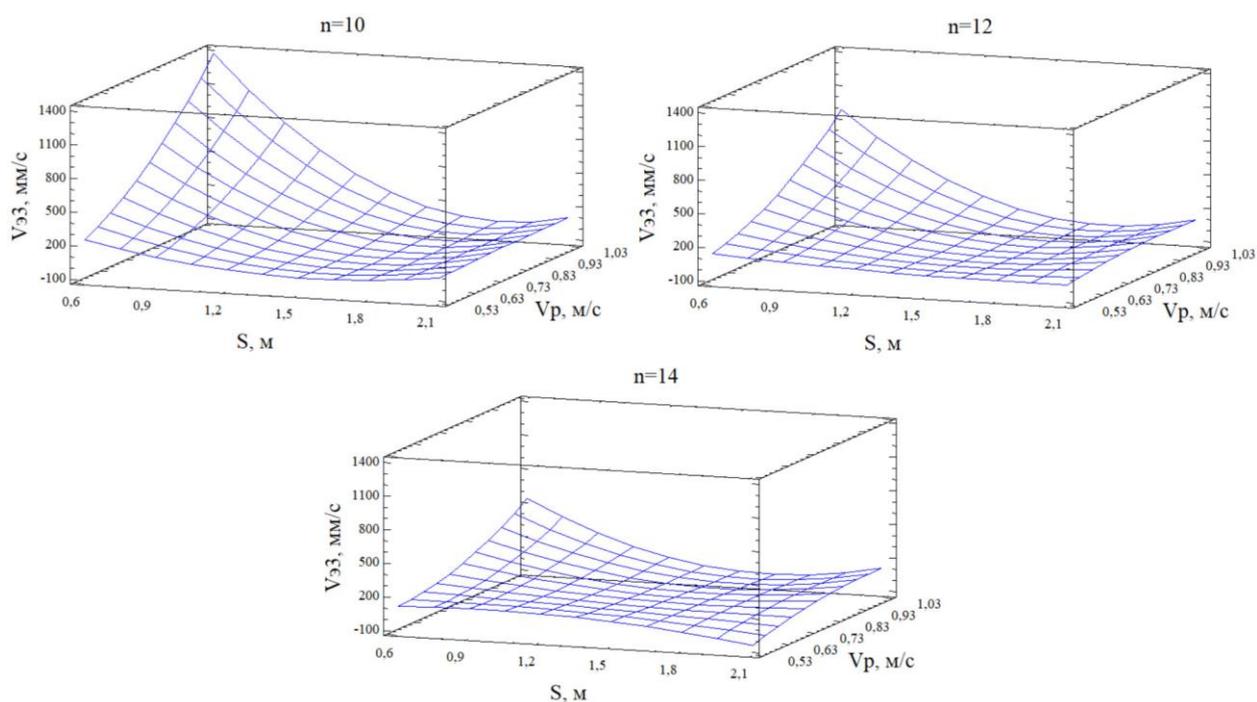


Рисунок 3.16 – Зависимость максимальной скорости механизма захвата (при перемещении к накопителю от последнего ряда сеянцев) шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества сеянцев в накопителе

*Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда сеянцев*

При шаге посадки 1,98 м и количестве сеянцев в накопителе, равном 12, увеличение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с приводит к увеличению максимального ускорения механизма при перемещении к накопителю от 50 до 109 мм/с<sup>2</sup>. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту максимального ускорения механизма захвата от 242 до 1341 мм/с<sup>2</sup>.

При шаге посадки 0,62 м и рабочей скорости лесопосадочной машины 1 м/с максимальное ускорение механизма захвата составляет 3662 мм/с<sup>2</sup> при n=10 и 725 мм/с<sup>2</sup> при n=14.

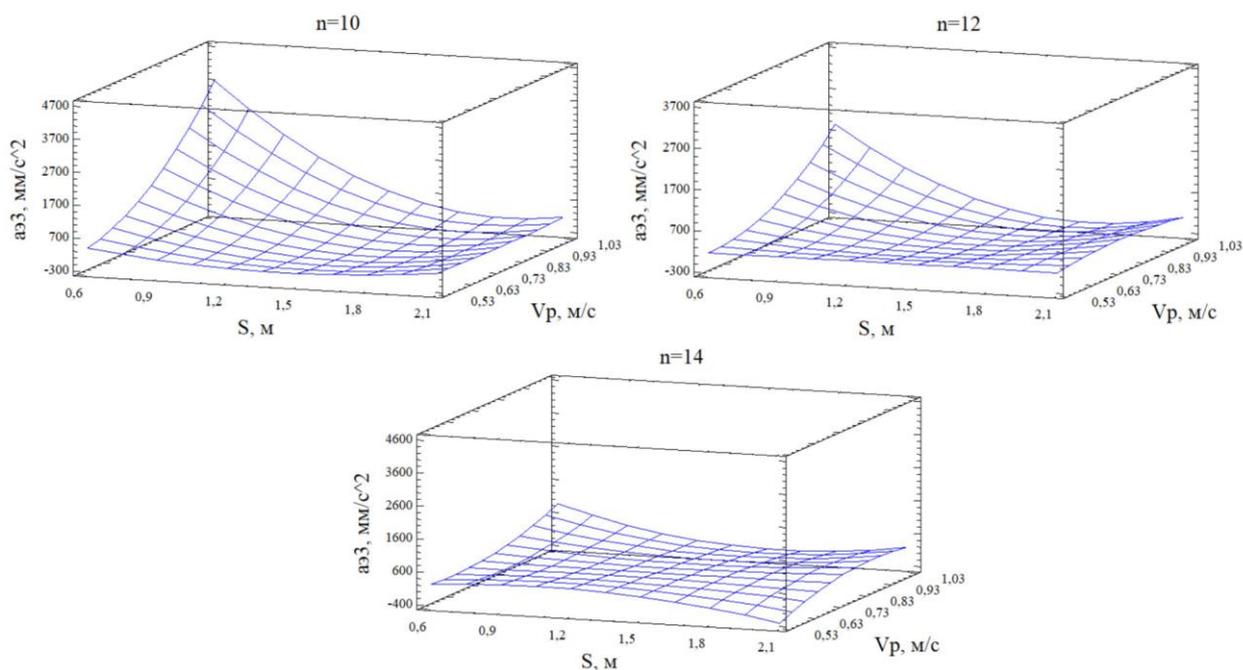


Рисунок 3.17 – Зависимость максимальной скорости механизма захвата (при перемещении к накопителю от последнего ряда семян) шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества семян в накопителе

## Вторая секция

Рисунки 3.18-3.19 показывают, 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 характер. Как и в первой секции 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. 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.

*Максимальная скорость перемещения семян в накопителе*

При шаге посадки 1,98 м повышение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с приводит к увеличению максимальной скорости перемещения семян в накопителе от 26 до 78 мм/с. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту максимальной скорости семян от 160 до 546 мм/с.

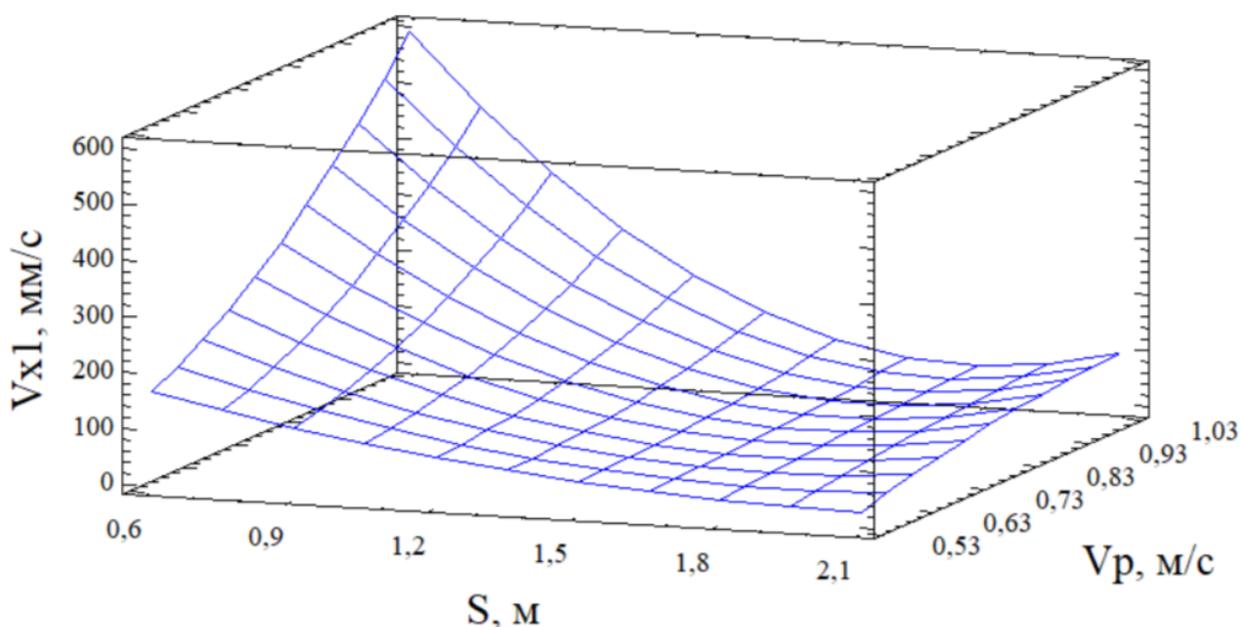


Рисунок 3.18 – Зависимость максимальной скорости перемещения семян в накопителе от шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества семян в накопителе

*Максимальное ускорение семян при перемещении в накопителе*

При шаге посадки 1,98 м повышение рабочей скорости с 0,53 до 1 м/с

приводит к увеличению максимального ускорения семян при перемещении в накопителе от 42 до 155 мм/с<sup>2</sup>. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту максимального ускорения семян от 645 до 7546 мм/с.

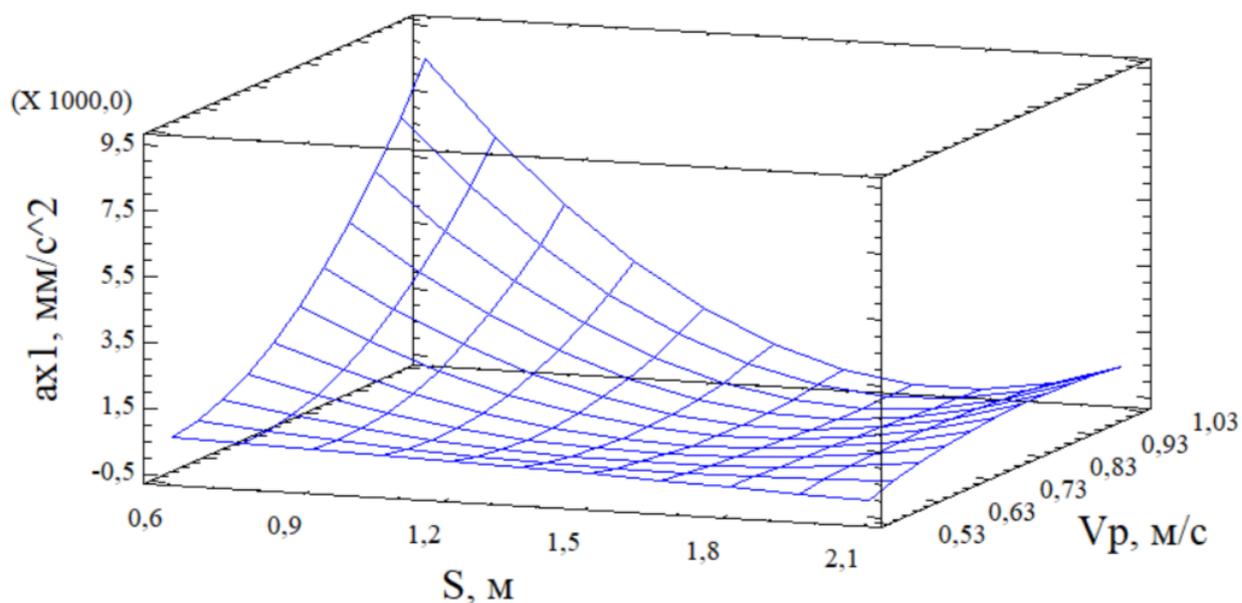


Рисунок 3.19 – Зависимость максимального ускорения семян при перемещении в накопителе от шага посадки, рабочей скорости лесопосадочной машины и количества семян в накопителе

### Производительность лесопосадочной машины

Рисунок 3.20 показывает, как изменяется производительность лесопосадочной машины в зависимости от входных параметров: шага посадки  $S$ , рабочей скорости лесопосадочной машины  $V_p$ .

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./час. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение

скорости машины способствует росту производительности от 3077 до 5806 сеянц./час.

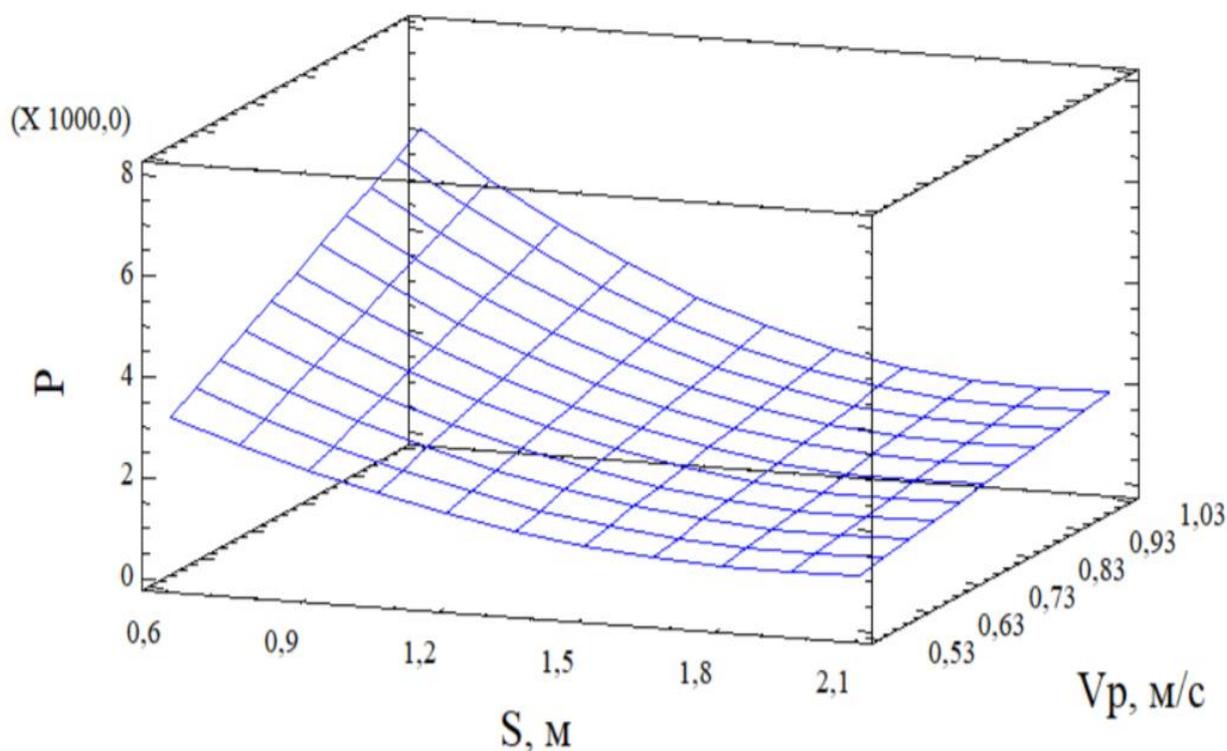


Рисунок 3.20 – Зависимость производительности лесопосадочной машины от шага посадки и рабочей скорости

### **Процесс извлечения сеянцев из ячеек кассеты**

В ходе исследования процесса извлечения сеянцев из ячеек кассет был проведен предварительный эксперимент для определения необходимого числа повторностей опытов. Определение величины усилия по извлечению сеянца из кассеты осуществлялось в соответствии с ранее описанной методикой с использованием универсальной испытательной машины УТС-110МН-30-0У. Результаты обработки эксперимента представлены в таблице 3.6. Значение критерия Стьюдента (t-критерия) определялось по табличным значениям, при доверительной вероятности 0,95 и числу степеней свободы, равному 7 [97].

Таблица 3.6 – Результаты обработки предварительного эксперимента

| Характеристика   | Значение    |
|--|-------------|
| Среднее арифметическое значение выборки, $\bar{y}$                           | 19,9        |
| Количество опытов, $n$   | 8           |
| Выборочная дисперсия, $s^2$  | 2,28        |
| Среднее квадратичное отклонение, $s$   | 1,51        |
| Вариационный коэффициент, $\nu$  | 7,57        |
| Значение критерия Стьюдента при $P=0,95$ ; $f=7$                             | 2,3         |
| Ошибка среднего арифметического, $m$   | $\pm 1,265$ |
| Расчетный критерий Стьюдента при крайнем верхнем отклонении, $t_{py_{\max}}$ | 1,364       |
| Расчетный критерий Стьюдента при крайнем нижнем отклонении, $t_{py_{\min}}$  | 1,748       |

В результате анализа предварительного эксперимента расчетные критерии Стьюдента при крайних положениях оказались ниже табличного значения, то есть  $t_{py_i} < t$ , следовательно, количество повторностей для проведения эксперимента выбрано достаточное.

С учетом полученных предварительных данных была проведена серия экспериментов по извлечению семян из ячеек кассет в соответствии с описанной методикой и матрицей планирования эксперимента, представленной в таблице 3.5. По результатам проведенных исследований были получены зависимости усилия извлечения семени из ячейки от перемещения последнего для каждого опыта (Рисунок 3.21) и максимальные значения усилия при извлечении семян (Таблица 3.7, рисунок 3.22).

Анализ данных показал, что при обрезке корней (F1, F3, F5, F7) пиковое значение усилия извлечения семени смещается к началу координат абсцисс и находится в пределах от 8,8 до 13,8 мм, а без обрезки корней (F2, F4, F6, F8) пиковые значения смещаются ближе к середине координаты перемещения захвата в пределах от 16,7 до 23,0 мм. Это объясняется тем, что часть необрезанных корней, застревают в технологических отверстиях, помимо растягивания проскальзывают и исходя из этого общее пиковое

сопротивление возникает несколько позже, чем у обрезанных корней. При этом характер у всех кривых примерно одинаковый.

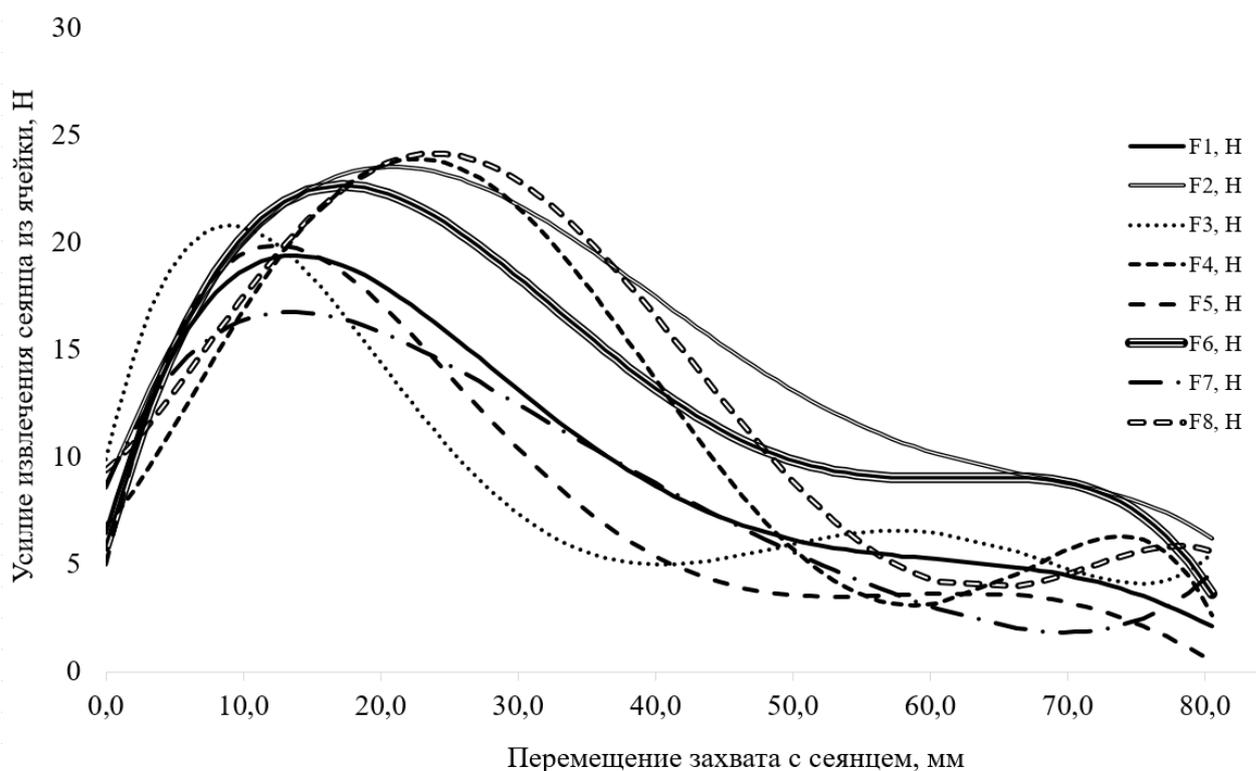


Рисунок 3.21– Изменение усилия извлечения сеянца из ячейки в зависимости от предварительной подготовки

В серии опытов с применением толкателей, но без обрезки корней значимого влияния высоты толкателя зафиксировано не было. Данное наблюдение подтверждает, что сила трения, возникающая в начальный момент времени при движении сеянца ничтожно мала в сравнение с сопротивлением корней сеянцев.

Согласно данным представленным в таблице 3.7 и на рисунке 3.21 наибольшие значения усилия, необходимого для извлечения сеянцев из ячеек, приходятся 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 сеянцев – 16,56 Н, что меньше наибольшего значения на 31%. Применение 5 мм толкателя с обрезкой корней обеспечивает снижение

усилия извлечения на 8,5% с 20,48 до 18,73 Н, а использование 10 мм толкателя снижает усилие почти на 13% до 17,83 Н. В тоже время как применение толкателей без обрезки корней, оказалось неэффективным. Усилие извлечения семян в этом случае не только не уменьшалось, но и имело тенденцию к увеличению. При применении толкателя 15 мм в среднем усилие увеличивалось с 22,6 Н до 24,1, Н. А применение 5 и 10 мм толкателей 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 семянца из ячейки. При этом использование толкателей высотой более 15 мм приводило к значительному наклону стебля семянца от его начального положения, что усложняет позиционирование захватного устройства при извлечении семянца и может привести к его повреждению.

Таблица 3.7 - Результаты обработки эксперимента с обрезкой корней, без толкателя

| № опыта | Среднее пиковое значение с доверительным интервалом, Н | Количество повторностей, n | Выборочная дисперсия | Средне-квадратическое отклонение | Коэффициент вариации | Точность опыта, % |
|---------|--|----------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1.n     | 20,48±1,217  | 8                          | 1,48                 | 1,217                            | 5,94                 | 4,98              |
| 2.n     | 22,60±1,053  | 8                          | 1,58                 | 1,257                            | 5,69                 | 4,77              |
| 3.n     | 18,73±0,936  | 8                          | 1,32                 | 1,149                            | 6,13                 | 4,997             |
| 4.n     | 23,90±1,019  | 8                          | 1,48                 | 1,217                            | 5,09                 | 4,27              |
| 5.n     | 17,83±0,881  | 8                          | 1,23                 | 1,109                            | 6,22                 | 4,94              |
| 6.n     | 22,57±1,096  | 8                          | 1,71                 | 1,308                            | 5,79                 | 4,86              |
| 7.n     | 16,56±0,814  | 8                          | 1,19                 | 1,09                             | 6,59                 | 4,92              |
| 8.n     | 24,10±1,115  | 8                          | 1,77                 | 1,330                            | 5,52                 | 4,63              |

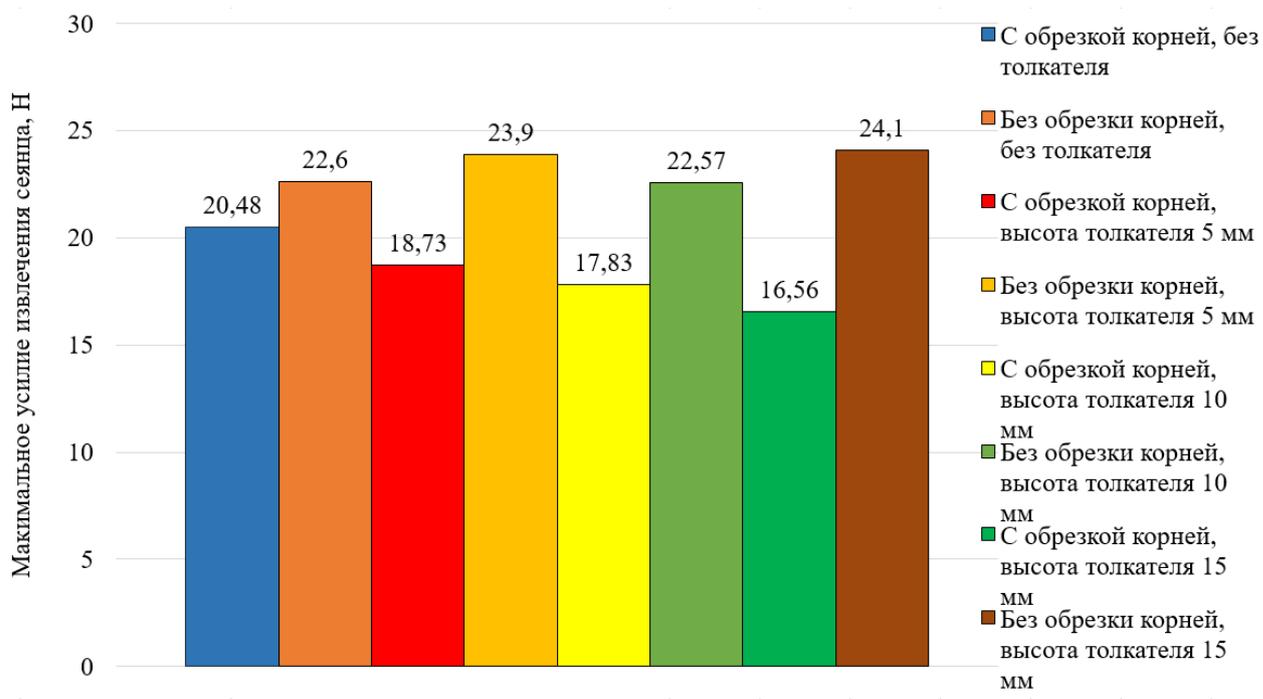


Рисунок 3.22 – Максимальные значения усилий извлечения сеянцев из ячеек

Помимо определения максимального усилия при извлечении сеянцев из кассет оценивалось и их состояние. После каждого испытания производился визуальный осмотр стволиков сеянцев в месте их фиксации зажимом на предмет повреждения. По итогам серии испытаний, повреждения стволиков сеянцев и разрушения кома сеянцев после извлечения зафиксированы не были. В дальнейшем сеянцы были высажены на территории университета и показали практически 100% приживаемость.

### 3.5. 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 семян ( $Y_3$ ), максимальное ускорение семян при перемещении в накопителе ( $Y_6$ ), производительность системы подачи ( $Y_7$ ).

Среднегеометрический обобщенный параметр отличается большой гибкостью. Особенностью данного параметра является то, что  $W_g = 0$ , если хотя бы одной из частных функций полезности  $d_j$  равно нулю. Так как некоторые выходные параметры превышают предельно-допустимые значения, при которых система подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат не способна выполнить поставленную задачу, используем данный параметр.

Среднегеометрический обобщенный параметр оптимизации определялся по формуле [96],

$$W_g = \exp \frac{\sum_{j=1}^p \delta_j \cdot d_j}{\sum_{j=1}^p \delta_j}, \quad (3.2)$$

где  $\delta_i$  – веса выходных параметров;

$d_j$  – частная функция полезности, которая может быть определена по уравнению

$$d_j = \frac{\varphi_0(x) - y_j^{(-)}}{y_j^{(+)} - y_j^{(-)}}, \quad (3.3)$$

где  $\varphi_0(x)$  – отклик выходного параметра  $y_j$  в точке  $x$ ;

$y_j^{(+)}$  и  $y_j^{(-)}$  - лучшие и худшие значения выходного параметра в пределах изученной области.

В приложении Ж представлен среднегеометрический обобщенный параметр для всех наблюдаемых выходных параметров.

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

Уравнение регрессии имеет следующие вид:

$$W_g = 8,131 - 6,765X_1 - 18,311X_2 - 0,035X_3 + 1,06X_1^2 + 15,173X_1X_2 + 8,616X_2^2 - 2,12X_1^2X_2 - 5,264X_1X_2^2 \quad (3.4)$$

Аксонметрические изображения поверхностей откликов представлены на рисунках 3.23-3.24.

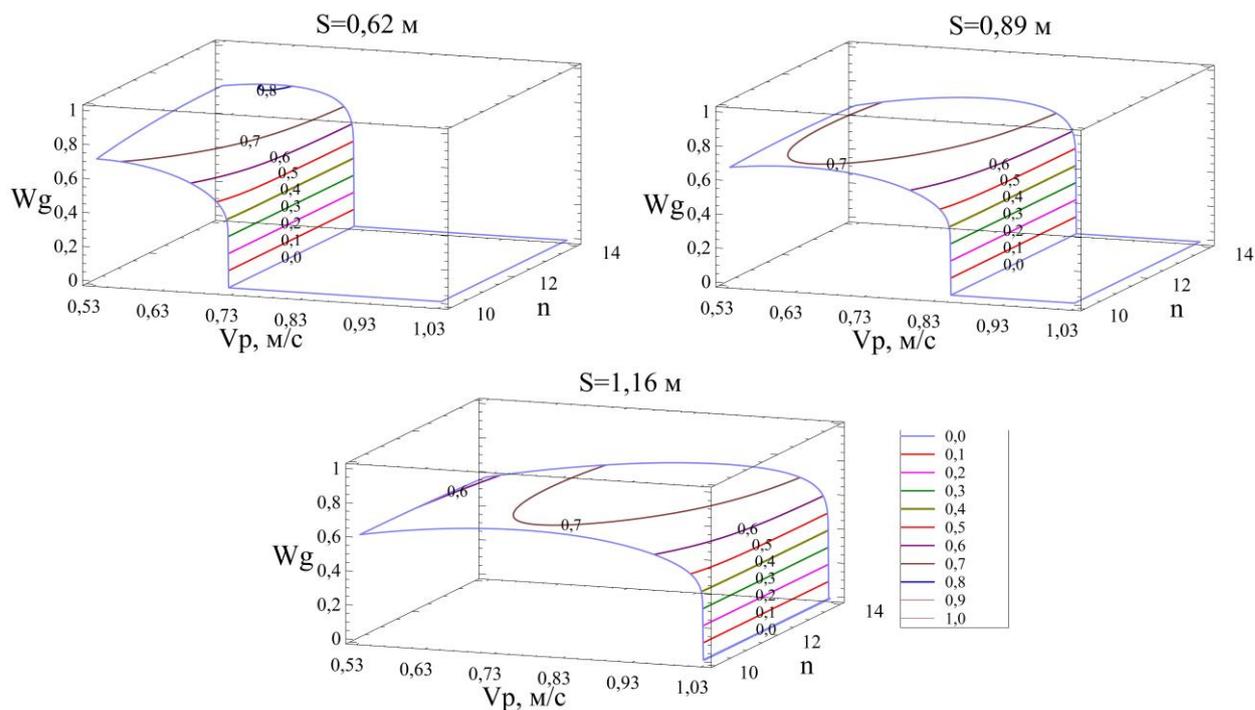


Рисунок 3.23 – Зависимость обобщенного параметра оптимизации  $W_g$  от шага посадки (0,62; 0,89; 1,16), рабочей скорости лесопосадочной машины и количества сеянцев в накопителе

Режимы работы лесопосадочной машины, оснащенной системой подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат, соответствующие максимальным значениям обобщенного параметра представлены в таблице 3.8.

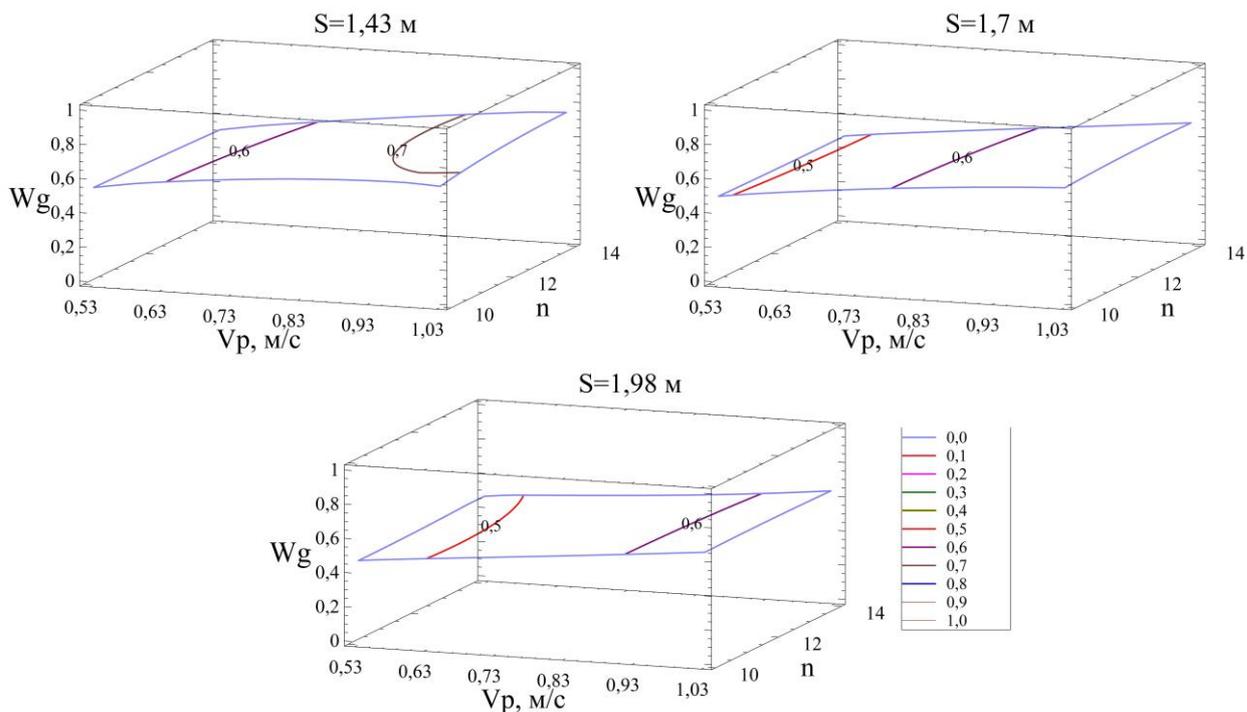


Рисунок 3.24 – Зависимость обобщенного параметра оптимизации  $W_g$  от шага посадки (1,43; 1,7; 1,98), рабочей скорости лесопосадочной машины и количества семян в накопителе

Таблица 3.8 – 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, $V_{з3}$ , мм/с | Максимальное ускорение семян при перемещении в накопителе, $a_{x1}$ , мм/с <sup>2</sup> | Производительность лесопосадочной машины, $P$ , сеянц./час |
|----------------------|---|-------------------------------|--|---|--|
| 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   |

## Выводы по третьей главе

1. В ходе регрессивного анализа экспериментальных данных были установлены следующие изменения характеристик системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины:

- с увеличением ёмкости накопителя с 10 до 14 наблюдается снижение характеристик первой секции от 2,31 до 5,31 раз;

- 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, 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;

- 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, 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;

- количество семян в накопителе не оказывает влияние на выходные параметры второй секции и 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./час. В то же время при минимальном шаге посадки 0,62 м аналогичное увеличение скорости машины способствует росту производительности от 3077 до 5806 семян./час.

2. В качестве параметров оптимизации были выбраны такие характеристики системы подачи семян с ЗКС как максимальная скорость механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян, максимальное ускорение семян при перемещении в накопителе,

производительность системы подачи. Установлены следующие оптимальные режимы работы лесопосадочной машины, оснащенной системой подачи:

- количество семян 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.

3. Наибольшее влияние на величину усилия извлечения семени из ячейки оказывает продольная сила корней. В то время, как сила трения и тяжести семени суммарно составляют не более 4,3% от общего усилия.

4. Обрезка корней и использование толкателей обеспечивают снижение максимального усилия при извлечении семени не более чем на 31%, что является незначительным изменением для исполнительных органов механизма извлечения семян системы подачи.

5. Использование толкателей без обрезки корней нецелесообразно, поскольку не обеспечивается снижение усилия на извлечение семени.

6. Исходя из полученных результатов, для механизированного извлечения семян из кассет нет необходимости усложнять технологический процесс дополнительными операциями, такими как обрезка и предварительное выталкивание кома из ячеек, поскольку семена не получают повреждений при извлечении и без подготовительных операций.

## ГЛАВА 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ СЕЯНЦЕВ С ЗКС

### 4.1 Определение затрат на изготовление системы подачи семян с ЗКС

Затраты на изготовление разрабатываемой системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат определим по формуле

$$C_{II} = K + I + M, \quad (4.1)$$

где  $K$  – стоимость материалов и комплектующих разрабатываемой системы подачи, руб.;

$I$  – стоимость изготовления конструкции, руб.;

$M$  – стоимость монтажа и наладки, руб.

Расчет стоимости материалов и комплектующих разрабатываемой системы подачи семян приведен в таблице 4.1.

Стоимость изготовления конструкции как правило включает в себя затраты на рабочую силу, амортизацию оборудования и прочие накладные расходы [99, 100]. В зависимости от изделия стоимость изготовления может варьироваться от 25 до 50% от стоимости материалов и комплектующих изделия. Монтаж и наладка (установка, программирование, испытания, запуск в эксплуатацию) по процентному соотношению к стоимости материалов и комплектующих составляют 15-30%.

Таблица 4.1 – Стоимость материалов и комплектующих, необходимых для изготовления разрабатываемой системы подачи

| №  | Изделие   | Кол-во | Ед. имз. | Общая масса, кг | Цена за ед. изм, руб. | Общая стоимость, руб. |
|----|---|--------|----------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| 1  | 2   | 3      | 4        | 5               | 6                     | 7                     |
| 1  | Профиль стальной, 40*40*2   | 0,746  | м        | 1,74            | 360,00                | 268,56                |
| 2  | Профиль стальной, 50*50*2   | 15,152 | м        | 40,76           | 402,60                | 6100,20               |
| 3  | Лист стальной, 2 мм   | 1,35   | м2       | 19,34           | 1163,95               | 1571,33               |
| 4  | Лист алюминиевый, 1,5 мм  | 0,13   | м2       | 0,54            | 6150,00               | 799,50                |
| 5  | Уголок стальной, 20*20*2  | 3,84   | м        | 2,30            | 28,00                 | 107,52                |
| 6  | Труба стальная, 24*3  | 0,824  | м        | 1,28            | 788,00                | 649,31                |
| 7  | Пруток металлический, 12 мм   | 0,24   | м        | 0,21            | 282,00                | 67,68                 |
| 8  | Лист алюминиевый, 10 мм   | 0,12   | м        | 3,22            | 44892,00              | 5387,04               |
| 9  | Полоса стальная, 40*3   | 1,14   | м        | 1,07            | 100,00                | 114,00                |
| 10 | Серводвигатель с энкодером, ном. Скорость 3000 об/мин, крут. Момент 3,81 Нм | 1      | шт.      | 1,4             | 18580,00              | 18580,00              |
| 11 | Серводрайвер к сервомотору  | 1      | шт.      | 0,31            | 14250,00              | 14250,00              |
| 12 | Комплект шариковинтовой передачи, ном. диаметр 12мм, шаг резьбы 4 мм        | 1      | шт.      | 1,54            | 6600,00               | 6600,00               |
| 13 | Клапан электромагнитный, ход 35мм   | 1      | шт.      | 0,05            | 973,00                | 973,00                |
| 14 | Шаговый двигатель, фланец 42 мм, момент удержания 7 кг*см                   | 1      | шт.      | 0,55            | 2030,00               | 2030,00               |
| 15 | Многоканальный драйвер шаговых двигателей на 4 оси                          | 2      | шт.      | 0,2             | 7400,00               | 14800,00              |
| 16 | Шаговый двигатель с двумя валами, фланец 57мм, момент удержания 28 кг*см    | 1      | шт.      | 1,7             | 4960,00               | 4960,00               |
| 17 | Шкиф алюминиевый, шаг 5мм, ширина ремня 40мм                                | 4      | шт.      | 0,1             | 1640,00               | 6560,00               |
| 18 | Ремень зубчатый, шаг 5мм, ширина 40 мм.                                     | 3,6    | м        | 0,108           | 3000,00               | 10800,00              |

продолжение таблицы 4.1

|              |  |      |     |        |          |            |
|--------------|--|------|-----|--------|----------|------------|
| 19           | Профильная направляющая,<br>типоразмер 15  | 0,52 | м   | 0,754  | 2600,00  | 1352,00    |
| 20           | Каретка профильных рельсов,<br>типоразмер 15                                     | 2    | шт. | 0,36   | 920,00   | 1840,00    |
| 21           | Профильная направляющая,<br>типоразмер 20  | 2,63 | м   | 5,81   | 3250,00  | 8547,50    |
| 22           | Каретка профильных рельсов,<br>типоразмер 20                                     | 2    | шт. | 0,716  | 970,00   | 1940,00    |
| 23           | Шаговый двигатель, фланец<br>34 мм, момент удержания 12,6<br>кг*см               | 1    | шт. | 1,5    | 3960,00  | 3960,00    |
| 24           | Шаговый двигатель с двумя<br>валами, фланец 34 мм, момент<br>удержания 100 кг*см | 2    | шт. | 4,2    | 11240,00 | 22480,00   |
| 25           | Цепь конвейерная, шаг 12,7<br>мм   | 6,4  | м   | 5,568  | 810,00   | 5184,00    |
| 26           | Звезда z 12 шаг 12,7   | 8    | шт. | 2,4    | 1200,00  | 9600,00    |
| 27           | Гидроцилиндр ЦС-<br>50.30.400.635  | 2    | шт. | 11,7   | 4174,00  | 8348,00    |
| 28           | Датчик оптический  | 1    | шт. | 0,01   | 1491,00  | 1491,00    |
| 29           | Датчик Холла (магнитный)   | 5    | шт. | 0,05   | 390,00   | 1950,00    |
| 30           | Блок питания   | 3    | шт. | 5,7    | 3440,00  | 10320,00   |
| 31           | Контроллер промышленный  | 1    | шт. | 1,2    | 64620,00 | 64620,00   |
| 32           | Крепеж   | 10   | кг  | 10     | 450,00   | 4500,00    |
| 33           | Соединительные провода   | 15   | м   | 0,15   | 55,00    | 825,00     |
| <b>ИТОГО</b> |  |      |     | 126,54 |          | 241 575,64 |

Принимая верхние границы указанных выше диапазонов процентных соотношений и подставляя в формулу (4.1) определим затраты на изготовление разрабатываемой системой подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины

$$C_{II} = 241575,64 + 120787,82 + 72472,69 = 434836,15 \text{ руб.}$$

Затраты на изготовление разрабатываемой системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат составили 434 836,15 рублей, что в 3,45 раз меньше стоимости лесопосадочной машины ZKT WOLF PRO.

#### **4.2. Экономическая эффективность внедрения разработанной системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины непрерывного действия**

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

Затраты на извлечение семян из кассет и упаковку в коробки за смену определим по формуле

$$Z_{u.y.} = \frac{T_{u.y.} \cdot P_{II}}{P_{u.y.}}, \quad (4.2)$$

где  $T_{u.y.}$  – тариф на работу по извлечению семян из кассет и упаковку, руб/час;

$P_{II}$  – сменная производительность посадки, сеянц./смену;

$P_{u.y.}$  – производительность работы по извлечению и упаковке семян одного человека, сеянц./час;

Затраты на оплату труда оператору лесопосадочной машины ZKT WOLFPRO за смену определим по формуле

$$Z_{o.cm.} = \frac{Z_o}{21}, \quad (4.3)$$

где  $Z_0$  – месячная зарплата оператора, руб.

Затраты на оплату труда работнику за смену, выполняющему ручную посадку семян, определим по выражению

$$Z_{p.см.} = T_p \cdot P_p, \quad (4.4)$$

где  $T_p$  – тариф на работу по посадки семян ручным способом, руб/час;

$P_p$  – производительность ручной посадки одного человека, семян./час;

Все необходимые данные для расчёта были предоставлены красноярским лесничеством. Выполненные расчеты по формулам (4.2), (4.3), (4.4) сведены в таблицу 4.2.

Согласно проведенным расчетам наибольшие затраты на ручные операции приходится на посадку семян с ЗКС ручным способом и составляет 7,88 рублей 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 посадки машинами дискретного действия составляет 5,18 рублей 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 подачи семян в лесопосадочный аппарат ZKT WOLF PRO составил 2,74 рублей за один сеянец, а за высадку одного гектара - 5486 рублей. При максимально интенсивной работе лесопосадочной машины с производительностью 13 216 семян за смену в течение весеннего и осеннего периодов годовые затраты на ручной труд могут достигать 1 574 482 рублей, что позволит окупить систему подачи семян в посадочный аппарат за 1,23 года (менее, чем за 3 периода) или за 542 гектара высаженных семян.

Таблица 4.2 – Экономические характеристики технологий посадки сеянцев с ЗКС

| Характеристика  | Лесопосадочная машина непрерывного действия с ручной подачей сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат | Ручная посадка сеянцев с ЗКС | Лесопосадочная машина непрерывного действия с механизированной системой подачи сеянцев с ЗКС в посадочный аппарат | Лесопосадочная машина дискретного действия |
|---|---|------------------------------|---|--|
| Стоимость основных средств, руб.  | 1 500 000   | 15 000                       | 1 934 836   | 100 000 000                                |
| Оплата на извлечение и упаковку, руб./смену   | 11200,0   | 1280,0                       | 0,0   | 3200,0                                     |
| Оплата за посадочные работы, руб./смену   | 3570,0  | 3568,0                       | 0,0   | 4762,0                                     |
| Отчисления на социальные нужды, руб./смену  | 4431,0  | 1454,4                       | 0,0   | 2388,6                                     |
| Итого за смену, руб.  | 19201,0   | 6302,4                       | 0,0   | 10350,6                                    |
| Итого в год   | 1 574 482   | 516 797                      | 0,0   | 848 749                                    |
| Производительность посадки с учетом подготовительно-заключительных работ, сеянцев/смену | 7000  | 800                          | 13 216  | 2 000                                      |
| Итого затрат на один сеянец, руб.   | 2,74  | 7,88                         | 0,00  | 5,18                                       |
| Итого затрат на один гектар (при плотности посадки 2000 шт./га), руб.                   | 5486  | 15756                        | 0,00  | 10350,6                                    |

По результатам выполненной работы была разработана 3D модель конструкции системы подачи сеянцев с закрытой корневой системой в посадочный аппарат лесопосадочной машины ZKT WOLF PRO (рисунок 4.1).

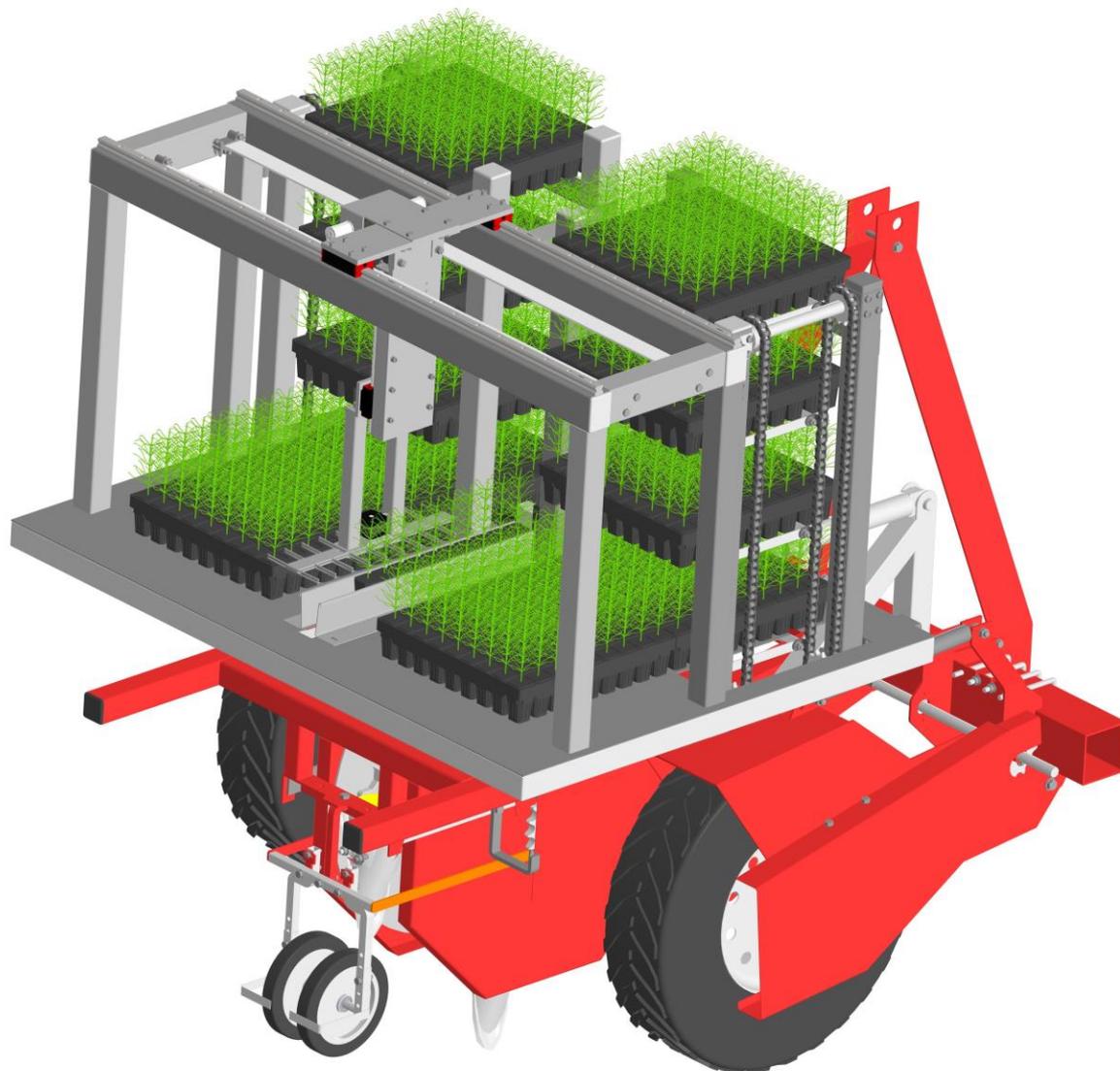


Рисунок 4.1 - 3D модель системы подачи сеянцев с закрытой корневой системой в лесопосадочный аппарат

## **Выводы по четвертой главе**

1. Затраты на изготовление разрабатываемой системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат составили 434 836,15 рублей, что в 3,45 раз меньше стоимости лесопосадочной машины ZKT WOLF PRO.
2. Наибольшие затраты на ручные операции приходятся на посадку семян с ЗКС ручным способом и составляет 7,88 рублей 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.
3. Оплата ручного труда при посадки машинами дискретного действия составляет 5,18 рублей за сеянец, что соответствует 10350,6 руб. за гектар. При этом производительность составляет 2000 семян в час, что в 2,5 раза превышает производительность ручного труда.
4. Стоимость затрат на ручной труд по извлечению, упаковке и подачи семян в лесопосадочный аппарат ZKT WOLF PRO составил 2,74 рублей за один сеянец, а за высадку одного гектара - 5486 рублей.
5. При максимально интенсивной работе лесопосадочной машины с производительностью 13 216 семян за смену в течение весеннего и осеннего периодов годовые затраты на ручной труд могут достигать 1 574 482 рублей, что позволит окупить систему подачи семян в посадочный аппарат за 1,23 года (менее, чем за 3 периода) или за 542 гектара 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 до 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 семени суммарно составляют не более 4,3% от общего усилия;

- использование толкателей без обрезки корней нецелесообразно, поскольку не обеспечивается снижение усилия на извлечение семени.

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

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

- количество семян 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 подачи в посадочный аппарат, срок окупаемости механизированной системы подачи сеянцев в посадочный аппарат составляет 1,23 года (менее, чем за 3 периода) или за 542 гектара высаженных сеянцев.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бартнев, И. М. Лесопосадочные машины. Теория. Исследование. Конструкции / И. М. Бартнев. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2015. – 219 с.
2. Цепляев, А. Н. Научное обоснование технологии выращивания посадочного материала "Контейнер в контейнере" в Центральной лесостепи : специальность 06.03.01 "Лесные культуры, селекция, семеноводство" : диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Цепляев Алексей Николаевич. – Воронеж, 2022. – 374 с.
3. Шавков, М. В. Обоснование параметров комбинированного сошника лесопосадочной машины : специальность 05.21.01 "Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шавков Михаил Викторович. – Воронеж, 2013. – 212 с.
4. Heidi Hallongren, Tiina Laine, Juho Rantala, Veli-Matti Saarinen, Markus Strandström, Jarmo Hämäläinen & Asko Poikela , Scandinavian Journal of Forest Research (2014): Competitiveness of mechanized tree planting in Finland, Scandinavian Journal of Forest Research.
5. Tiina Laine & Juho Rantala (2013) Mechanized tree planting with an excavator-mounted M-Planter planting device, International Journal of Forest Engineering, 24:3, 183-193.
6. Rantala, J., T. Laine, 2010. Productivity of the M-Planter tree-planting device in practice. – Silva Fennica, 44(5), 859–869.
7. Laine, T., J. Rantala. 2013. Mechanized tree planting with an excavator-mounted M-Planter planting device. – International Journal of Forest Engineering, 24(3),183–193.
8. Laine, T. 2017. Mechanized tree planting in Finland and improving its productivity. PhD thesis, University of Helsinki, 48 pp.
9. Ramantswana, M., Saulo Philipe Sebastiro Guerra, S.P.S., B.T. Ersson.

2020. Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review. – Current Forestry Reports, 6, 143–158.

10. Ghaffariyan, M. R. (2021) A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting, *Silva Balcanica* 22(2): 25-32.

11. Laine, T. 2017. Mechanized tree planting in Finland and improving its productivity. PhD thesis, University of Helsinki, 48 pp

12. Errson, B.T. 2014. Concepts for mechanized tree planting in Southern Sweden. PhD Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. 78 pp.

13. Lideskog, H. 2018. A methodology for automation of mechanized forest regeneration. Phd Thesis. Lulee University of Technology, 73 pp.

14. Черник, К. Н. Анализ производительности машин дискретного действия, применяемых для механизированной посадки семян с закрытой корневой системой / К. Н. Черник, В. А. Лозовой // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 1. – С. 136-144. – DOI 10.28983/asj.y2024i1pp136-144.

15. Герц Э. Ф., Мехренцев А. В., Побединский В. В. Повышение эффективности мультифункциональных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 1 (379). – С. 138-149. DOI 10.37482/0536-1036-2021-1-138-149

16. Hallongren H., Laine T., Rantala J., Saarinen V.-M., Strandström M., Hämäläinen J., Poikela A. Competitiveness of Mechanized Tree Planting in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, iss. 2, pp. 144–151. DOI 10.1080/02827581.2014.881542

17. Драпалюк, М. В. Новые конструкции универсальных лесопосадочных машин для посадки семян с открытой и закрытой корневой системой / М. В. Драпалюк, В. В. Стасюк, В. А. Зеликов // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4(44). – С. 112-123. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10.

18. Бартнев, И. М. Автоматизация процесса посадки растений / И. М. Бартнев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 75. – С.

384-396.

19. Бартнев, И. М. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления : / И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк, В. И. Казаков. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "ФЛИНТА", 2013. – 208 с.

20. Динамика приживаемости и роста культур сосны обыкновенной на горельнике в лесостепной зоне / Н. Е. Проказин, И. М. Бартнев, С. А. Родин [и др.] // Современная лесная наука: проблемы и перспективы : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 20–22 декабря 2017 года. – Воронеж: Истоки, 2017. – С. 335-338.

21. Шабанов, М. Л. Обоснование параметров сошника и рациональной компоновки рабочих органов лесопосадочной машины : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шабанов Михаил Леонидович. – Воронеж, 2002. – 152 с.

22. Бартнев, И. М. Техника для лесовосстановления / И. М. Бартнев, В. И. Игутов, О. Г. Климов // Лесное хозяйство. – 1991. – № 9. – С. 45-48.

23. Мун, В. Ф. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы посадочных аппаратов рассадопосадочных машин : специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мун Виктор Федорович. – Алма-Ата, 1984. – 186 с.

24. Бобушкина, С. В. Интенсивность роста и развития сеянцев сосны с закрытой корневой системой при разных режимах выращивания для лесовосстановления в Архангельской области : специальность 06.03.01 «Лесные культуры, селекция, семеноводство» диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Бобушкина Светлана Валентиновна. – Архангельск, 2014. – 196 с.

25. Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Pietrzykowski M., Szewczyk G., Szychta M., Kiełbasa P., Sobocki S., Danielak M., Juliszewski T. RoboFoR—

Automat do sadzenia drzew. Podstawowe moduły i właściwości funkcjonalne. *Nauka Tech. Technol.*, 2022; 6: 119–136. DOI 10.7494/978-83-67427-15-9\_7

26. Hansson L., Sten G., Rossander M., Lideskog H., Manner J., van Westendorp R., Li S., Eriksson A., Wallner A., Rönnqvist M. Autoplant—Autonomous Site Preparation and Tree Planting for a Sustainable Bioeconomy. *Forests*, 2024; 15(2): 263. DOI 10.3390/f15020263

27. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration / P. Tylek, P. Kiełbasa, T. Szulc [et al.] // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2023. – Vol. 44, No. 1. – P. 203-215. – DOI 10.5552/crojfe.2023.1722.

28. Oliveira, L.F.P.; Moreira, A.P.; Silva, M.F. Advances in Forest Robotics: A State-of-the-Art Survey. *Robotics* 2021, 10, 53. DOI 10.3390/robotics10020053

29. Sobocki, S., Adamczyk, F., Tylek, P., Szaroleta, M., Zurowski, K., Kormanek, M., Szewczyk, G., Tabor, S., Zwierzyński, M., Kaźmierczak, M. A Seedling Collection Unit of a Mobile Automatic Device for Forest Tree Planting—An Extended Operating Concept. *Forests*, 2023; 14(12): 2420. DOI 10.3390/f14122420

30. Sobocki, S., Wojciechowski, J., Legutko, S., Mac, J., Zawada, M., Szymczyk, S. Field robots development in the aspect of achieving the goals of sustainable agriculture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, The 25th Edition of IManEE 2021 International Conference (IMANEE 2021), Online, 21–22 October 2021; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; 1235. DOI 10.1088/1757-899X/1235/1/012044

31. Angelstam, P., Bush, T., Manton, M. Challenges and Solutions for Forest Biodiversity Conservation in Sweden: Assessment of Policy, Implementation Outputs, and Consequences. *Land*, 2023; 12: 1098. DOI 10.3390/land12051098

32. Manner, J., Ersson, B.T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *J. For. Sci.*, 2021; 67: 242–246. DOI 10.17221/203/2020-JFS

33. Soler, R.R., Guerra, S.P.S., Oguri, G., Rodrigues, S.A. Economic Evaluation and Performance of a Tree Planting Machine Performing in Two Different Slope Classes and Conditions of Harvesting Slash. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2024; 45(1). DOI 10.5552/crojfe.2024.2209

9. Spinelli, M., R., Magagnotti, N. Enhancing Silvicultural Practices: A Productivity and Quality Comparison of Manual and Semi-Mechanized Planting Methods in KwaZulu-Natal, South Africa. *Forests*, 2024; 15: 2045. DOI 10.3390/f15112045

34. Liang, J., Sawut, M., Cui, J., Hu, X., Xue, Z., Zhao, M., Zhang, X., Rouzi, A., Ye, X., Xilike, A. Object-oriented multi-scale segmentation and multi-feature fusion-based method for identifying typical fruit trees in arid regions using Sentinel-1/2 satellite images. *Scientific Reports*, 2024; 14(1): 18230. DOI 10.1038/s41598-024-68991-7

35. Zhu, B., Liu, J., Yang, C., Qu, W., Ding, P. Power Compensation Strategy and Experiment of Large Seedling Tree Planter Based on Energy Storage Flywheel. *Forests*, 2023; 14: 1039. DOI 10.3390/f14051039

36. Wu, X., Jiang, Z., Zhang, L., Hu, X., Li, W. Optimization Design and Experimentation of a Soil Covering Device for a Tree Planting Machine. *Agriculture*, 2024; 14(3): 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030346>

39. S.S. Ku, G. Larsen, S. Cetinkunt, Fast tool servo control for ultra-precision machining at extremely low feed rates, *Mechatronics* 8 (1998) 381–393.

37. H. Yajima, H. Wakiwaka, Design of linear DC motor for high-speed positioning, *Sensors and Actuators* 81 (1-3) (2000) 281–284.

38. L. Wang, T. Emura, A high-precision positioning servo-controller using non-sinusoidal two-phase type PLL, *Mechatronics* 9 (7) (1999) 785–801.

39. Xin-Gui Guo, De-Cai Wang, Cong-Xin Li, Ya-Dong Liu. A rapid and accurate positioning method with linear deceleration in servo system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (7) (2002) 851-861, DOI 10.1016/S0890-6955(02)00010-X.

40. A. Steven, High-speed machining goes mainstream, *Mechanical*

Engineering 5 (1995) 56–61.

41. M. Mark, High performance at high speeds, Cutting Tool Engineering 9 (1996) 24–31.

42. R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, A review of ultra high speed milling of hardened steels, Journal of Materials Processing Technology 69 (1997) 1–17.

43. Y.M. Wu, F.M. Zhao, A method of improving the positioning accuracy for servo system, Manufacturing Technology & Machine Tools (Chinese) 12 (1999) 46–48.

44. K. Erkorkmaz, Y. Altintas, High speed CNC system design. Part 1: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 1323–1345.

45. M.Y. Yang, W.P. Hong, A PC-NC milling machine with new simultaneous 3-axis control algorithm, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 555–566.

46. M.J. Kelly, D.J. Toncich, Overcoming encoder quantisation noise in an adaptive position controller, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000) 2031–2046.

47. Y. Koren, Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-Hill, 1983.

48. Y. Koren, O. Masory, Reference-pulse circular interpolators for CNC systems, ASME Journal of Engineering for Industry 103 (1981) 131–136.

49. J. Butler, B. Haack, M. Tomizuka, Reference generation for high speed coordinated motion of a two axis system, Symposium on Robotics, Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers—1988, Chicago, IL, DSC, 1988, pp. 457–470

50. S. Bedi I, Ali and N. Quan, Advanced interpolation techniques for NC machines, Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry 115 (8) (1993) 329–336.

51. Rongli Gai, Yitong Guo, Research on acceleration and deceleration control algorithm of S-curve, 2021 IEEE 23rd Int Conf on High Performance

Computing & Communications; 7th Int Conf on Data Science & Systems; 19th Int Conf on Smart City; 7th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys), 10.1109/HPCC-DSS-SmartCity-DependSys53884.2021.00313, (2104-2110), (2021).

52. Z Li, L Cai and Z. Liu, "Efficient Planning and Solving Algorithm of S - Shape Acceleration and Deceleration[J]", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, no. 4, pp. 1-14, 2020.

53. Frank M. White. *Fluid Mechanics*. — New York: McGraw-Hill, 2016.

54. Jae Wook Jeon, & Young Youl Ha. (2000). A generalized approach for the acceleration and deceleration of industrial robots and CNC machine tools. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(1), 133–139. DOI:10.1109/41.824135

55. 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. – DOI 10.53374/1993-0135-2025-1-85-91.

56. Усеня, В. В. Влияние вида посадочного материала на рост лесных культур основных лесобразующих пород в лесорастительных и экологических условиях Беларуси / В. В. Усеня, К. М. Старожишина, Г. М. Помаз // *Инновации и технологии в лесном хозяйстве : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 95-летию Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, Санкт-Петербург, 16–17 мая 2024 года*. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, 2024. – С. 350-355. – DOI 10.21178/160524.350.

57. Бартнев, И. М. К вопросу создания лесных культур посадкой ПМЗК / И. М. Бартнев // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 2(10). – С. 123-130.

58. Асмоловский, М. К. Состояние и перспективы механизации посадки лесных культур / М. К. Асмоловский // *Труды БГТУ. №1. Лесное хозяйство*. –

2015. – № 1(174). – С. 119-123.

59. Rautio, P., Lideskog, H., Bergsten, U., Karlberg, M. Lean forestry — A paradigm shift from economies of scale to precise and sustainable use of ecosystem services in forests. *Forest Ecology and Management*, 2023; 530: 120766. DOI:10.1016/j.foreco.2022.120766

60. Sikstrom, U., Hjelm, K., Holt, H.K., Saksa, T., Wallertz, K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fennica*, 2020; 54(2): 10172. DOI: 10.14214/sf.10172.

61. Huuskonen, S., Domisch, T., Finér, L., Hantula, J., Hynynen, J., Matala, J., Miina, J., Neuvonen, S., Nevalainen, S., Niemisto, P., Nikula, A., Piri, T., Siitonen, J., Smolander, A., Tonteri, T., Uotila, K., Viiri, H. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? *Forest Ecology and Management*, 2021; 479: 118558. DOI 10.1016/j.foreco.2020.118558

62. ООО «Завод коммунальной техники». URL: <https://zkt.by/catalog/tekhnika-dlya-lesa/lesoposadka/rassadoposadochnaya-mashina-zkt-wolf-pro> (дата обращения 08.10.2024).

63. Теоретическая и прикладная механика : Международный научно-технический сборник. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2018. – 450 с.

64. Кузнецов, А. В. Моделирование многокомпонентных динамических систем на примере шарико-винтовой передачи / А. В. Кузнецов // Технические науки - от теории к практике. – 2012. – № 14. – С. 25-29.

65. Сервопривод с шарико-винтовой передачей / К. Д. Хвостов, М. Д. Клинов, М. М. Ахатов [и др.] // *Advances in Science and Technology* : Сборник статей XLVI международной научно-практической конференции, Москва, 31 июля 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2022. – С. 114-115.

66. Карпенко Б. К. Шаговые электродвигатели / Б. К. Карпенко, В. И.

Ларченко, Ю. А. Прокофьев - Киев : «Техшка», 1972. -2 1 6 с.

67. Zhang, J., Zhang, H., Du, C., & Zhao, W. (2016). Research on the dynamics of ball screw feed system with high acceleration. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 111, 9–16.

68. Wang, W., Shen, G., Zhang, Y., Zhu, Z., Li, C., & Lu, H. (2021). Dynamic reliability analysis of mechanical system with wear and vibration failure modes. *Mechanism and Machine Theory*, 163, 104385. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104385

69. Zhang, H., Zhao, W., Zhang, J., & Liu, H. (2013). Research on the modeling of dynamics for vertical axis ball screw feed system. 2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). DOI 10.1109/isam.2013.6643529

70. Wen, C., Meng, X., Fang, C., Gu, J., Xiao, L., & Jiang, S. (2021). Dynamic behaviors of angular contact ball bearing with a localized surface defect considering the influence of cage and oil lubrication. *Mechanism and Machine Theory*, 162, 104352.

71. Zhou, C.-G., Zhou, H.-X., & Feng, H.-T. (2020). Experimental analysis of the wear coefficient of double-nut ball screws. *Wear*, 446-447, 203201. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203201

72. Verl, A., Frey, S., & Heinze, T. (2014). Double nut ball screw with improved operating characteristics. *CIRP Annals*, 63(1), 361–364. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.128

73. Zhao, J., Lin, M., Song, X., & Guo, Q. (2019). Investigation of load distribution and deformations for ball screws with the effects of turning torque and geometric errors. *Mechanism and Machine Theory*, 141, 95–116.

74. Сравнительный анализ использования шагового двигателя и сервомотора в станках с числовым программным управлением / И. И. Нурмиев, А. А. Хуснуллин, И. М. Сафаров, М. А. Сафин // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : Материалы VIII Национальной

научно-практической конференции, Казань, 08–09 декабря 2022 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 850-851.

75. Черник, К. Н. Экспериментальные исследования по определению максимального усилия по извлечению семян с закрытой корневой системой из ячейки кассеты / К. Н. Черник, С. Г. Елисеев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15, № 1(57). – С. 138-153.

76. Laine T., Saarinen V.-M. (2014). Comparative study of the Risutec Automatic Plant Container (APC) and Bracke planting devices. *Silva Fennica* vol. 48 no. 3 article id 1161. 16 p. DOI:10.14214/sf.1161

77. Sobocki, S.; Wojciechowski, J.; Legutko, S.; Mac, J.; Zawada, M.; Szymczyk, S. Field robots development in the aspect of achieving the goals of sustainable agriculture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 25th Edition of IManEE 2021 International Conference (IMANEE 2021)*, Online, 21–22 October 2021; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; Volume 1235. DOI 10.1088/1757-899X/1235/1/012044

78. Chirici, G.; Giannetti, F.; D’Amico, G.; Vangi, E.; Francini, S.; Borghi, C.; Corona, P.; Travaglini, D. Robotics in Forest Inventories: SPOT’s First Steps. *Forests* 2023, 14, 2170. DOI 10.3390/f14112170

79. Shamshiri, R.R.; Weltzien, C.; Hameed, I.A.; Yule, I.J.; Grift, T.E.; Balasundram, S.K.; Pitonakova, L.; Ahmad, D.; Chowdhary, G. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2018, 11, 1–1. DOI 10.3390/f14112170

80. Okuda, M.; Kawamoto, Y.; Tado, H.; Fujita, Y.; Inomata, Y. Energy Expenditure Estimation for Forestry Workers Moving on Flat and Inclined Ground. *Forests* 2023, 14, 1038. DOI 10.3390/f14051038

81. H. Makino, T. Ohde, Motion control of the direct drive actuator, *Annals of CIRP* 40 (1991) 375–378.

82. Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Cambridge University Press,

Cambridge, 2000.

83. Коновалов А. Б., Гребенникова В. М. Ременные передачи: учебное пособие. СПб.: СПбГТУРП, 2011

84. Устиновский Е. П., Вайчулис Е. В., Ковнацкий А. В. Проектирование ременных передач с применением ЭВМ: учебное пособие. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018 – 132 с.

85. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

86. Воронцов, Д. С. Использование модуля SolidWorks Motion при изучении дисциплины "Теория механизмов и машин" / Д. С. Воронцов // Инновационные технологии в инженерной графике : проблемы и перспективы : Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Новосибирск, Брест, 19 апреля 2019 года / Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин); Брестский государственный технический университет). – Новосибирск, Брест, 2019. – С. 57-63.

87. Лысыч, М. Н. Исследование влияния методов интегрирования при имитационном моделировании процесса преодоления препятствий почвообрабатывающими рабочими органами в CAE SOLIDWORKS Motion / М. Н. Лысыч // Воронежский научно-технический Вестник. – 2018. – Т. 4, № 4(26). – С. 70-76.

88. Bratovanov, N. SOLIDWORKS add-in for motion simulation, layout analysis and collision detection of substrate handling robots / N. Bratovanov // Proceedings of the Technical University of Sofia. – 2020. – Vol. 70, No. 1. – DOI 10.47978/tus.2020.70.01.004.

89. Карячкин, Я. Г. Динамический анализ деталей двухступенчатого редуктора в SOLIDWORKS / Я. Г. Карячкин, С. А. Ефанов, Е. И. Дуданов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 407-411. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-9-407-411.

90. Тольга А. В. Развитие информационных технологий. Трехмерная

печать объектов / А. В. Тольга, А. Д. Воронина // Перспективы развития науки и образования : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. - Тамбов, 2014. - С. 150-151.

91. Большаков В. Основы 3D-моделирования / В. Большаков, А. Бочков и другие. - Санкт-Петербург, 2012. - 304 с.

92. Aaron Council 3D Printing: Rise of the Third Industrial Revolution / Aaron Council, Michael Petch. - 2014. - 116 p.

93. Canessa E. Low-cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development / E. Canessa, C. Fonda, M. Zennaro. - ICTP - The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013. - 119 p.

94. Jacobs P. F. Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography / P. F. Jacobs. - Society of Manufacturing Engineers, 1992. - 434 p.

95. Байдаев, Д. М., Егорова Е.М., Фисун М.Н. Прочность на разрыв и якорность корневых систем древесно-кустарниковых растений в условиях высокогорий. Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2006. – № 13. – С. 134-136.

96. Пен, Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion / Р. З. Пен. Красноярск : СибГТУ , 2014. – 292 с.

97. Афанасьев, В. Н. Статистическая методология в научных исследованиях : учебное пособие / В. Н. Афанасьев, Н. С. Еремеева, Т. В. Лебедева. — Оренбург : ОГУ, 2017. — 245 с.

98. Ушаков Л.С. Активный факторный эксперимент. Математическое планирование, организация и статистический анализ результатов: учебное пособие / С.А. Рябчук, Ю.Е. Котылев, Л.С. Ушаков. - Орел: Орел ГТУ, 2002.

99. Проскурина, И. Ю. Экономические вопросы в дипломном проектировании: учеб. пособие / И. Ю. Проскурина, И. А. Авдеева; ВГЛТА. – Воронеж, 2005. – 90 с.

100. Пуряев А.С. Теория и методология оценки эффективности инвестиционных проектов в машиностроении / А.С.Пуряев; ГОУ ВПО «Камская госуд.инж.-экон. акад.» - Набережные Челны: Изд-во Камской госуд. инж.-экон. акад., 2007 — 180 с.

















| 1                    | 2          | 3      | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |  |  |  |
|----------------------|------------|--------|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|--|--|--|
| Продолжительность, с | Кассета №4 | Ряд №1 |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |
|                      |            |        |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |  |  |  |

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## СЕКЦИЯ I

$S = 0.62$  шаг посадки, м  
 $V_p = 0.6$  рабочая скорость посадочного агрегата, м/с  
 $n = 10$  количество семян в накопителе, шт  
 $y_{11} = 150$  расстояние от продольной оси механизма захвата до средней линии первого ряда кассеты, мм  
 $l_p = 40$  расстояние между рядами, мм  
 $i = 9$  номер ряда семян кассеты от наполнителя  
 Интервал времени прохождения рабочих органов (час),  
 $c$   
 $t_1 = \frac{S}{V_p} = 1.03$   
 Время полного цикла работы первой секции,  
 $c$   
 $t_{C1} = n \cdot t_1 = 10.333$   
 Продолжительность этапов, с  
 $t_{Э2} = 2.5$   $t_{Э4} = 1.3$   
 $t_{Э3} = \frac{t_{C1} - (t_{Э2} + t_{Э4} + t_{Э2s})}{1.7} = 3.549$   
 $t_{Э1} = t_{C1} - (t_{Э2} + t_{Э3} + t_{Э4} + t_{Э2s}) = 2.484$   
 $t_{Э1} + t_{Э2} + t_{Э3} + t_{Э4} + t_{Э2s} = 10.333$

$y_0 = 41$  расстояние между продольной осью накопителя и продольной осью механизма захвата в исходном положении, мм  
 $z_{Э2} = 150$  высота поднятия семян при извлечении из кассеты, мм  
 $z_{Э4} = 130$  высота опускания семян в накопитель, мм  
 $t_{Э2s} = 0.5$  время захвата семян на втором этапе, с  
 $m_{M3} = 20$  масса подвижной части механизма захвата, кг  
 $m_3 = 4$  масса механизма захвата с приводом, кг  
 $m_c = 70 \cdot 10^{-3}$  средняя масса одного семени, кг

Перемещение механизма захвата по оси у на первом этапе, мм

$$y_{Э1} = y_{11} + (i - 1) \cdot l_p = 470$$

Перемещение механизма захвата по оси у на первом этапе, мм

$$y_{Э3} = 2 \cdot y_0 + y_{11} + (i - 1) \cdot l_p = 552$$

Масса ряда семян, кг

$$m_{pc} = 9 \cdot m_c = 0.63$$

### Первый этап. Перемещение механизма захвата по оси у от накопителя к сеянцам

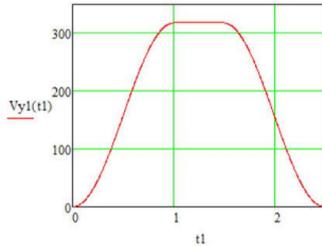
$$t_{a1} = \begin{cases} \frac{t_{Э1}}{2} & \text{if } t_{Э1} \leq 2 \\ 1 & \text{if } t_{Э1} > 2 \end{cases} \quad t_{v1} = \begin{cases} 0 & \text{if } t_{Э1} \leq 2 \\ t_{Э1} - 2t_{a1} & \text{if } t_{Э1} > 2 \end{cases} \quad y_{a1} = \begin{cases} \frac{y_{Э1}}{2} & \text{if } t_{Э1} \leq 2 \\ \frac{y_{Э1}}{2 \cdot (1 + t_{v1})} & \text{if } t_{Э1} > 2 \end{cases}$$

$$t_{d1} = t_{a1} = 1 \quad t_{v1} = 0.484$$

$$t_{a1} + t_{v1} + t_{d1} = 2.484 \quad y_{d1} = y_{a1} = 158.322$$

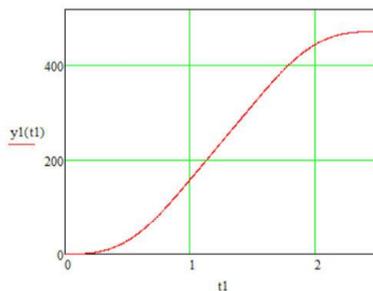
Скорость, мм/с

$$v_{y1}(t_1) = \begin{cases} \frac{y_{a1}}{t_{a1}} \left[ \sin \left[ \pi \cdot \left( \frac{t_1}{t_{a1}} - \frac{1}{2} \right) \right] + 1 \right] & \text{if } 0 \leq t_1 \leq t_{a1} \\ \frac{2y_{a1}}{t_{a1}} & \text{if } t_{a1} < t_1 < t_{a1} + t_{v1} \\ \frac{y_{d1}}{t_{d1}} \left[ \sin \left[ \pi \cdot \left( \frac{t_1 - t_{a1} - t_{v1}}{t_{d1}} - \frac{3}{2} \right) \right] + 1 \right] & \text{if } t_{a1} + t_{v1} \leq t_1 \leq t_{a1} + t_{v1} + t_{d1} \end{cases}$$



Перемещение, мм

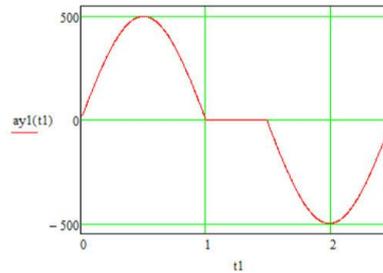
$$y_1(t_1) = \begin{cases} \frac{y_{a1} \cdot \sin \left( \frac{\pi \cdot t_1}{t_{a1}} \right) - \frac{\pi \cdot y_{a1} \cdot t_1}{t_{a1}}}{\pi} & \text{if } 0 \leq t_1 \leq t_{a1} \\ \frac{y_{a1} \cdot \sin(\pi) - \pi \cdot y_{a1}}{\pi} + 2y_{a1} \cdot (t_1 - t_{a1}) & \text{if } t_{a1} < t_1 < t_{a1} + t_{v1} \\ \frac{y_{a1} \cdot \sin(\pi) - \pi \cdot y_{a1}}{\pi} + 2y_{a1} \cdot (t_{v1}) + \frac{y_{d1} \cdot \sin \left[ \pi \cdot \left( \frac{t_1 - t_{a1} - t_{v1}}{t_{d1}} \right) \right]}{\pi} + \frac{y_{d1} \cdot (t_1 - t_{a1} - t_{v1})}{t_{d1}} & \text{if } t_{a1} + t_{v1} \leq t_1 \leq t_{a1} + t_{v1} + t_{d1} \end{cases}$$



$$\begin{aligned}
 v_{y1}(t_{a1}) &= 317 \\
 v_{y1max} &= \frac{2 \cdot y_{a1}}{t_{a1}} = 317 \\
 a_{y1max} &= a_{y1} \left( \frac{t_{a1}}{2} \right) = 497 \\
 y_{1max} &= y_1(t_{Э1}) = 470 \\
 F_{y1max} &= \frac{m_{M3} \cdot a_{y1} \left( \frac{t_{a1}}{2} \right)}{1000} = 9.948
 \end{aligned}$$

Ускорение, мм/с<sup>2</sup>

$$a_{y1}(t_1) = \begin{cases} \frac{\pi \cdot y_{a1} \cdot \cos \left[ \pi \cdot \left( \frac{t_1}{t_{a1}} - \frac{1}{2} \right) \right]}{t_{a1}^2} & \text{if } 0 \leq t_1 \leq t_{a1} \\ 0 & \text{if } t_{a1} < t_1 < t_{a1} + t_{v1} \\ \frac{\pi \cdot y_{d1} \cdot \cos \left[ \pi \cdot \left( \frac{t_1 - t_{a1} - t_{v1}}{t_{d1}} - \frac{3}{2} \right) \right]}{t_{d1}^2} & \text{if } t_{a1} + t_{v1} \leq t_1 \leq t_{a1} + t_{v1} + t_{d1} \end{cases}$$



Сила инерции, Н

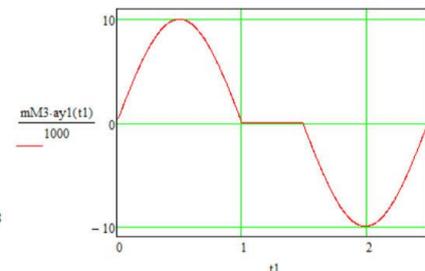


Рисунок Б1 – Математическая модель процессов системы подачи семян в посадочный аппарат

**Второй этап. Перемещение механизма захвата по оси z  
(извлечение семян из ячеек)**

$$ta2 := \begin{cases} \frac{t\Theta2}{2} & \text{if } t\Theta2 \leq 2 \\ 1 & \text{if } t\Theta2 > 2 \end{cases} \quad tv2 := \begin{cases} 0 & \text{if } t\Theta2 \leq 2 \\ t\Theta2 - 2ta2 & \text{if } t\Theta2 > 2 \end{cases} \quad za2 := \begin{cases} \frac{z\Theta2}{2} & \text{if } t\Theta2 \leq 2 \\ \frac{z\Theta2}{2 \cdot (1 + tv2)} & \text{if } t\Theta2 > 2 \end{cases}$$

$$td2 := ta2 = 1 \quad tv2 = 0.5 \quad zd2 := za2 = 50$$

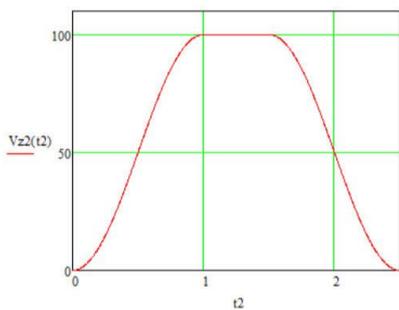
$$ta2 + tv2 + td2 = 2.5$$

Скорость, мм/с

$$Vz2(t2) := \begin{cases} \frac{za2}{ta2} \left[ \sin \left[ \pi \cdot \left( \frac{t2}{ta2} - \frac{1}{2} \right) \right] + 1 \right] & \text{if } 0 \leq t2 \leq ta2 \\ \frac{2za2}{ta2} & \text{if } ta2 < t2 < ta2 + tv2 \\ \frac{zd2}{td2} \left[ \sin \left[ \pi \cdot \left( \frac{t2 - ta2 - tv2}{td2} - \frac{3}{2} \right) \right] + 1 \right] & \text{if } ta2 + tv2 \leq t2 \leq ta2 + tv2 + td2 \end{cases}$$

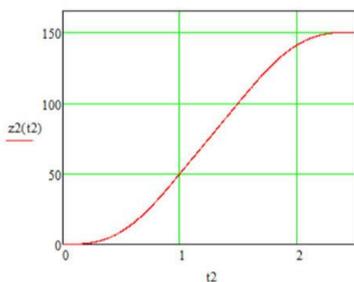
Ускорение, мм/с<sup>2</sup>

$$az2(t2) := \begin{cases} \frac{\pi \cdot za2 \cdot \cos \left[ \pi \cdot \left( \frac{t2}{ta2} - \frac{1}{2} \right) \right]}{ta2^2} & \text{if } 0 \leq t2 \leq ta2 \\ 0 & \text{if } ta2 < t2 < ta2 + tv2 \\ \frac{\pi \cdot zd2 \cdot \cos \left[ \pi \cdot \left( \frac{t2 - ta2 - tv2}{td2} - \frac{3}{2} \right) \right]}{td2^2} & \text{if } ta2 + tv2 \leq t2 \leq ta2 + tv2 + td2 \end{cases}$$



Перемещение, мм

$$z2(t2) := \begin{cases} \frac{za2 \cdot \sin \left( \frac{\pi \cdot t2}{ta2} \right) - \frac{\pi \cdot za2 \cdot t2}{ta2}}{\pi} & \text{if } 0 \leq t2 \leq ta2 \\ \frac{za2 \cdot \sin(\pi) - \pi \cdot za2}{\pi} + 2za2 \cdot (t2 - ta2) & \text{if } ta2 < t2 < ta2 + tv2 \\ \frac{za2 \cdot \sin(\pi) - \pi \cdot za2}{\pi} + 2za2 \cdot (tv2) + \frac{zd2 \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (t2 - ta2 - tv2)}{td2} \right]}{\pi} + \frac{zd2 \cdot (t2 - ta2 - tv2)}{td2} & \text{if } ta2 + tv2 \leq t2 \leq ta2 + tv2 + td2 \end{cases}$$



$$Vz2(ta2) = 100$$

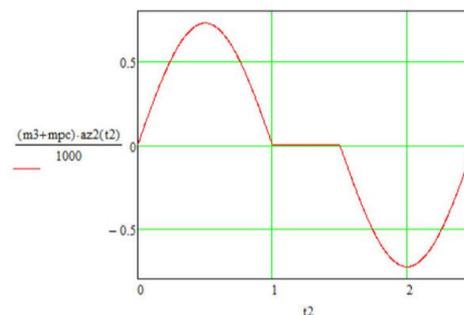
$$Vz2max := \frac{2 \cdot za2}{ta2} = 100$$

$$az2max := az2 \left( \frac{ta2}{2} \right) = 157$$

$$z2max := z2(t\Theta2) = 150$$

$$Fz2inmax := \frac{(m3 + mpc) \cdot az2 \left( \frac{ta2}{2} \right)}{1000} = 0.727$$

Сила инерции, Н



**Третий этап. Перемещение механизма захвата по оси у к накопителю с сеянцами**

$$ta3 := \begin{cases} \frac{t\Theta3}{2} & \text{if } t\Theta3 \leq 2 \\ 1 & \text{if } t\Theta3 > 2 \end{cases} \quad tv3 := \begin{cases} 0 & \text{if } t\Theta3 \leq 2 \\ t\Theta3 - 2ta3 & \text{if } t\Theta3 > 2 \end{cases} \quad ya3 := \begin{cases} \frac{y\Theta3}{2} & \text{if } t\Theta3 \leq 2 \\ \frac{y\Theta3}{2 \cdot (1 + tv3)} & \text{if } t\Theta3 > 2 \end{cases}$$

$$td3 := ta3 = 1 \quad tv3 = 1.549 \quad yd3 := ya3 = 108.277$$

$$ta3 + tv3 + td3 = 3.549$$

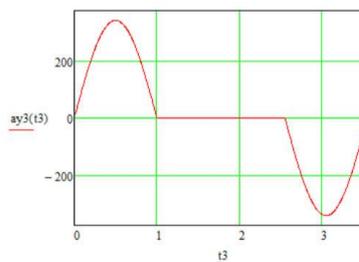
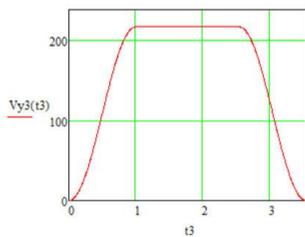
Скорость, мм/с

$$Vy3(t3) := \begin{cases} \frac{ya3}{ta3} \left[ \sin \left[ \pi \cdot \left( \frac{t3}{ta3} - \frac{1}{2} \right) \right] + 1 \right] & \text{if } 0 \leq t3 \leq ta3 \\ \frac{2ya3}{ta3} & \text{if } ta3 < t3 < ta3 + tv3 \\ \frac{yd3}{td3} \left[ \sin \left[ \pi \cdot \left( \frac{t3 - ta3 - tv3}{td3} - \frac{3}{2} \right) \right] + 1 \right] & \text{if } ta3 + tv3 \leq t3 \leq ta3 + tv3 + td3 \end{cases}$$

Ускорение, мм/с<sup>2</sup>

$$ay3(t3) := \begin{cases} \frac{\pi \cdot ya3 \cdot \cos \left[ \pi \cdot \left( \frac{t3}{ta3} - \frac{1}{2} \right) \right]}{ta3^2} & \text{if } 0 \leq t3 \leq ta3 \\ 0 & \text{if } ta3 < t3 < ta3 + tv3 \\ \frac{\pi \cdot yd3 \cdot \cos \left[ \pi \cdot \left( \frac{t3 - ta3 - tv3}{td3} - \frac{3}{2} \right) \right]}{td3^2} & \text{if } ta3 + tv3 \leq t3 \leq ta3 + tv3 + td3 \end{cases}$$

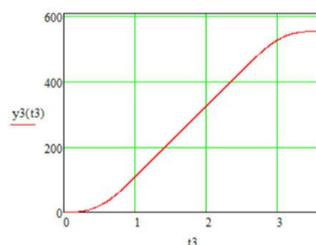
Рисунок Б2 – Математическая модель процессов системы подачи семян в посадочный аппарат (продолжение)



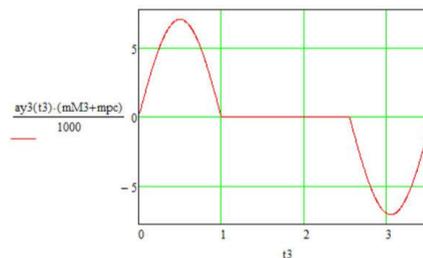
Перемещение, мм

$$y_3(t_3) := \begin{cases} \frac{ya_3 \sin\left(\frac{\pi t_3}{ta_3}\right) - \frac{\pi ya_3 t_3}{ta_3}}{\pi} & \text{if } 0 \leq t_3 \leq ta_3 \\ \frac{ya_3 \sin(\pi) - \pi ya_3}{\pi} + 2ya_3(t_3 - ta_3) & \text{if } ta_3 < t_3 < ta_3 + tv_3 \\ \frac{ya_3 \sin(\pi) - \pi ya_3}{\pi} + 2ya_3(tv_3) + \frac{yd_3 \sin\left[\frac{\pi(t_3 - ta_3 - tv_3)}{td_3}\right]}{\pi} + \frac{yd_3(t_3 - ta_3 - tv_3)}{td_3} & \text{if } ta_3 + tv_3 \leq t_3 \leq ta_3 + tv_3 + td_3 \end{cases}$$

Сила инерции, Н



$$\begin{aligned} Vy_3(ta_3) &= 217 \\ Vy_{3max} &= \frac{2 ya_3}{ta_3} = 217 \\ ay_{3max} &:= ay_3\left(\frac{ta_3}{2}\right) = 340 \\ y_{3max} &:= y_3(t_{\text{Э3}}) = 552 \\ Fy_{3инmax} &:= \frac{ay_3\left(\frac{ta_3}{2}\right) (mM_3 + mpc)}{1000} = 7.018 \end{aligned}$$



Четвертый этап. Перемещение механизма захвата по оси z (размещение семян в накопителе)

$$ta_4 := \begin{cases} \frac{t_{\text{Э4}}}{2} & \text{if } t_{\text{Э4}} \leq 2 \\ 1 & \text{if } t_{\text{Э4}} > 2 \end{cases} \quad tv_4 := \begin{cases} 0 & \text{if } t_{\text{Э4}} \leq 2 \\ t_{\text{Э4}} - 2ta_4 & \text{if } t_{\text{Э4}} > 2 \end{cases} \quad za_4 := \begin{cases} \frac{z_{\text{Э4}}}{2} & \text{if } t_{\text{Э4}} \leq 2 \\ \frac{z_{\text{Э4}}}{2(1 + tv_4)} & \text{if } t_{\text{Э4}} > 2 \end{cases}$$

$$td_4 := ta_4 = 0.65 \quad tv_4 = 0 \quad zd_4 := za_4 = 65$$

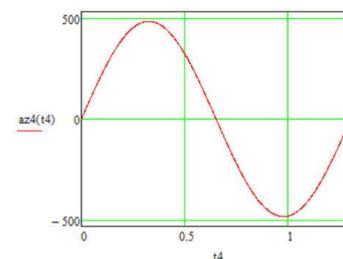
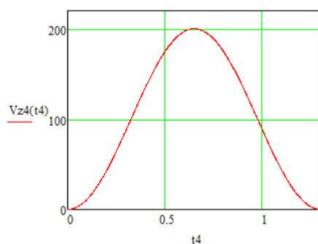
$$ta_4 + tv_4 + td_4 = 1.3$$

Ускорение, мм/с²

Скорость, мм/с

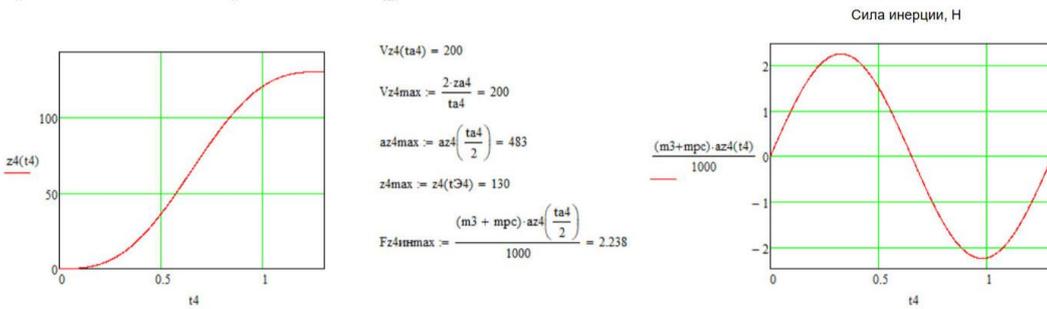
$$Vz_4(t_4) := \begin{cases} \frac{za_4}{ta_4} \left[ \sin\left[\pi \left(\frac{t_4}{ta_4} - \frac{1}{2}\right)\right] + 1 \right] & \text{if } 0 \leq t_4 \leq ta_4 \\ \frac{2za_4}{ta_4} & \text{if } ta_4 < t_4 < ta_4 + tv_4 \\ \left[ \frac{zd_4}{td_4} \sin\left[\pi \left(\frac{t_4 - ta_4 - tv_4}{td_4} - \frac{3}{2}\right)\right] + 1 \right] & \text{if } ta_4 + tv_4 \leq t_4 \leq ta_4 + tv_4 + td_4 \end{cases}$$

$$az_4(t_4) := \begin{cases} \frac{\pi za_4 \cos\left[\pi \left(\frac{t_4}{ta_4} - \frac{1}{2}\right)\right]}{ta_4^2} & \text{if } 0 \leq t_4 \leq ta_4 \\ 0 & \text{if } ta_4 < t_4 < ta_4 + tv_4 \\ \frac{\pi zd_4 \cos\left[\pi \left(\frac{t_4 - ta_4 - tv_4}{td_4} - \frac{3}{2}\right)\right]}{td_4^2} & \text{if } ta_4 + tv_4 \leq t_4 \leq ta_4 + tv_4 + td_4 \end{cases}$$



$$z_4(t_4) := \begin{cases} \frac{za_4 \sin\left(\frac{\pi t_4}{ta_4}\right) - \frac{\pi za_4 t_4}{ta_4}}{\pi} & \text{if } 0 \leq t_4 \leq ta_4 \\ \frac{za_4 \sin(\pi) - \pi za_4}{\pi} + 2za_4(t_4 - ta_4) & \text{if } ta_4 < t_4 < ta_4 + tv_4 \\ \frac{za_4 \sin(\pi) - \pi za_4}{\pi} + 2za_4 tv_4 + \frac{zd_4 \sin\left[\frac{\pi(t_4 - ta_4 - tv_4)}{td_4}\right]}{\pi} + \frac{zd_4(t_4 - ta_4 - tv_4)}{td_4} & \text{if } ta_4 + tv_4 \leq t_4 \leq ta_4 + tv_4 + td_4 \end{cases}$$

Рисунок Б3 – Математическая модель процессов системы подачи семян в посадочный аппарат (продолжение)



$$Vz4(ta4) = 200$$

$$Vz4max := \frac{2 \cdot za4}{ta4} = 200$$

$$az4max := az4 \left( \frac{ta4}{2} \right) = 483$$

$$z4max := z4(ta4) = 130$$

$$Fz4max := \frac{(m3 + mpc) \cdot az4 \left( \frac{ta4}{2} \right)}{1000} = 2.238$$

**Выходные параметры секции I**

|   | 1 этап         | 2 этап         | 3 этап         | 4 этап         |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Максимальная скорость, мм/с               | Vy1max = 317   | Vz2max = 100   | Vy3max = 217   | Vz4max = 200   |
| Максимальное ускорение, мм/с <sup>2</sup> | ay1max = 497   | az2max = 157   | ay3max = 340   | az4max = 483   |
| Перемещение, мм                           | y1max = 470    | z2max = 150    | y3max = 552    | z4max = 130    |
| Сила инерции, Н                           | Fy1max = 9.948 | Fz2max = 0.727 | Fy3max = 7.018 | Fz4max = 2.238 |

**СЕКЦИЯ II**

tY2 := 0.25 время хода штока толкателя ТЭМ-30, с  
 lhb := 100 высота падения семян в буферную емкость, мм  
 lhh := 150 высота падения семян в чашу, мм  
 n0 := 0 количество отсутствующих в ряду семян, шт

lcc := 15 кратчайшее расстояние от точки равновесия до центра тяжести семца, мм  
 hcc := 40 высота центра тяжести семца, мм  
 μ := 0.5 коэффициент трения кома почвы семца о ремень

Путь семца до пластины толкателя, мм

$$x\Theta21 := (n0 + 1) \cdot lp = 40$$

$$tZ2 := \sqrt{\frac{2 \cdot lhb}{9.81 \cdot 1000}} = 0.143 \quad tZ3 := \sqrt{\frac{2 \cdot lhh}{9.81 \cdot 1000}} = 0.175$$

$$t\Theta21 := t1 - (tY2 + tZ2) = 0.641$$

$$ta21 := \begin{cases} \frac{t\Theta21}{2} & \text{if } t\Theta21 \leq 2 \\ 1 & \text{if } t\Theta21 > 2 \end{cases} \quad tv21 := \begin{cases} 0 & \text{if } t\Theta21 \leq 2 \\ t\Theta21 - 2ta1 & \text{if } t\Theta21 > 2 \end{cases} \quad xa21 := \begin{cases} \frac{x\Theta21}{2} & \text{if } t\Theta21 \leq 2 \\ \frac{x\Theta21}{2 \cdot (1 + tv21)} & \text{if } t\Theta21 > 2 \end{cases}$$

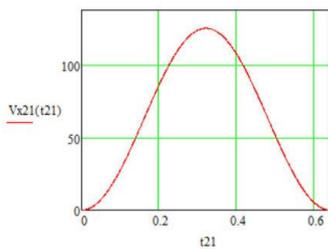
$$td21 := ta21 = 0.32 \quad tv21 = 0$$

$$ta21 + tv21 + td21 = 0.641$$

$$xd21 := xa21 = 20$$

Скорость, мм/с

$$Vx21(t21) := \begin{cases} \frac{xa21}{ta21} \left[ \sin \left[ \pi \left( \frac{t21}{ta21} - \frac{1}{2} \right) \right] + 1 \right] & \text{if } 0 \leq t21 \leq ta21 \\ \frac{2xa21}{ta21} & \text{if } ta21 < t21 < ta21 + tv21 \\ \frac{xd21}{td21} \left[ \sin \left[ \pi \left( \frac{t21 - ta21 - tv21}{td21} - \frac{3}{2} \right) \right] + 1 \right] & \text{if } ta21 + tv21 \leq t21 \leq ta21 + tv21 + td21 \end{cases}$$



Перемещение, мм

$$x21(t21) := \begin{cases} \frac{xa21 \cdot \sin \left( \frac{\pi \cdot t21}{ta21} \right) - \frac{\pi \cdot xa21 \cdot t21}{ta21}}{\pi} & \text{if } 0 \leq t21 \leq ta21 \\ \frac{xa21 \cdot \sin(\pi) - \pi \cdot xa21}{\pi} + 2xa21 \cdot (t21 - ta21) & \text{if } ta21 < t21 < ta21 + tv21 \\ \frac{xa21 \cdot \sin(\pi) - \pi \cdot xa21}{\pi} + 2xa21 \cdot (tv21) + \frac{xd21 \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (t21 - ta21 - tv21)}{td21} \right]}{\pi} + \frac{xd21 \cdot (t21 - ta21 - tv21)}{td21} & \text{if } ta21 + tv21 \leq t21 \leq ta21 + tv21 + td21 \end{cases}$$

Ускорение, мм/с<sup>2</sup>

$$ax21(t21) := \begin{cases} \frac{\pi \cdot xa21 \cdot \cos \left[ \pi \left( \frac{t21}{ta21} - \frac{1}{2} \right) \right]}{ta21^2} & \text{if } 0 \leq t21 \leq ta21 \\ 0 & \text{if } ta21 < t21 < ta21 + tv21 \\ \frac{\pi \cdot xd21 \cdot \cos \left[ \pi \left( \frac{t21 - ta21 - tv21}{td21} - \frac{3}{2} \right) \right]}{td21^2} & \text{if } ta21 + tv21 \leq t21 \leq ta21 + tv21 + td21 \end{cases}$$

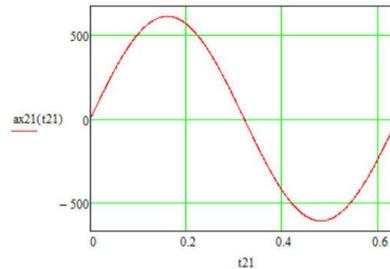
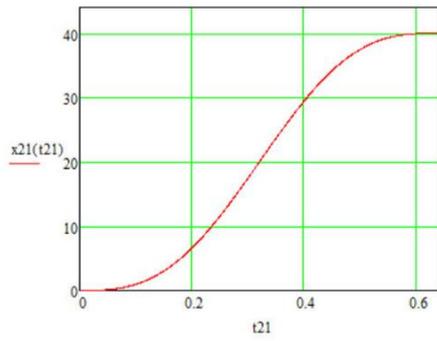


Рисунок Б4 – Математическая модель процессов системы подачи семян в посадочный аппарат (продолжение)



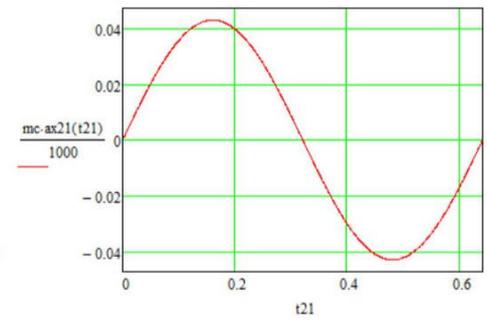
$$V_{x21}(t_{\Sigma 21}) = 125$$

$$V_{x21max} := \frac{2 \cdot x_{a21}}{t_{a21}} = 125$$

$$a_{x21max} := a_{x21} \left( \frac{t_{a21}}{2} \right) = 613$$

$$x_{21max} := x_{21}(t_{\Sigma 21}) = 40$$

$$F_{x21инmax} := \frac{m \cdot a_{x21} \left( \frac{t_{a21}}{2} \right)}{1000} = 0.04$$



Максимально допустимое ускорение, мм/с<sup>2</sup>

$$a_{Xd} := \frac{9.81 \cdot 1000 \cdot \mu \cdot 1000}{h_{cc}} = 1839$$

|   | 1 этап                  |
|---|-------------------------|
| Максимальная скорость, мм/с               | $V_{x21max} = 125$      |
| Максимальное ускорение, мм/с <sup>2</sup> | $a_{x21max} = 613$      |
| Перемещение, мм                           | $x_{21max} = 40$        |
| Сила инерции, Н                           | $F_{x21инmax} = 0.043$  |
|   | $t_{\Sigma 21} = 0.641$ |

### Выходные параметры секции II

|  | 2 этап                               | 3 этап                         |
|--|--------------------------------------|--------------------------------|
| Время движения пластины толкателя, с       | $t_{Y2} = 0.25$                      | Время падения сеянца в чашу, с |
| Скорость движения сеянца, мм/с             | $V_{Y2} := \frac{l_p}{t_{Y2}} = 160$ | $t_{Z3} = 0.175$               |
| Время падения сеянца в буферную емкость, с | $t_{Z2} = 0.143$                     |                                |

Рисунок Б5 – Математическая модель процессов системы подачи сеянцев в посадочный аппарат (окончание)

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

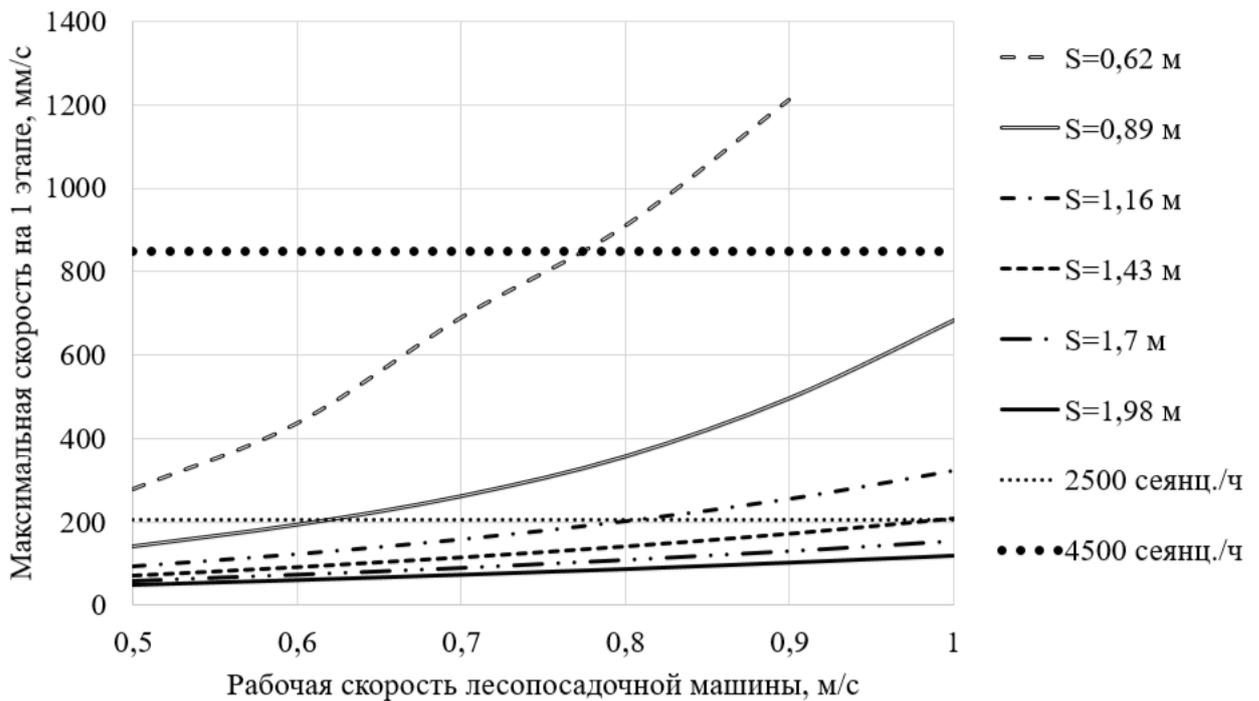


Рисунок В1 – Зависимость максимальной скорости перемещения захвата по оси y от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при n = 10

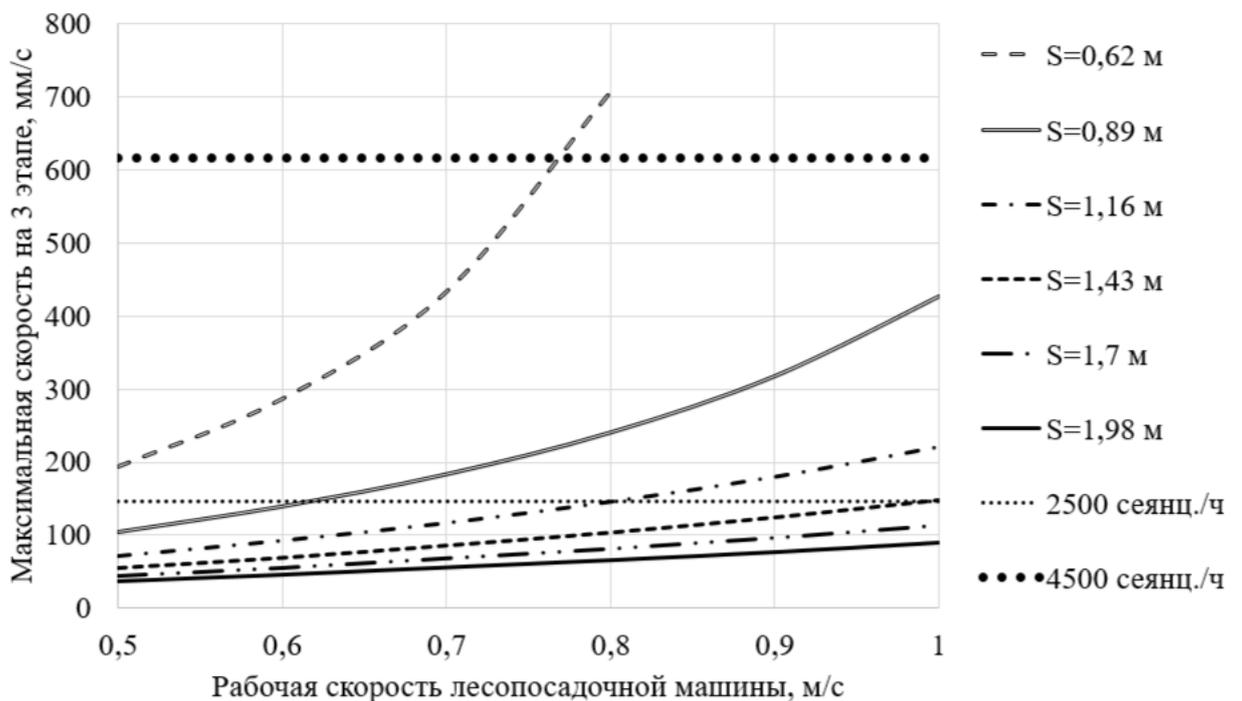


Рисунок В2 – Зависимость максимальной скорости перемещения захвата по оси y от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при n = 10

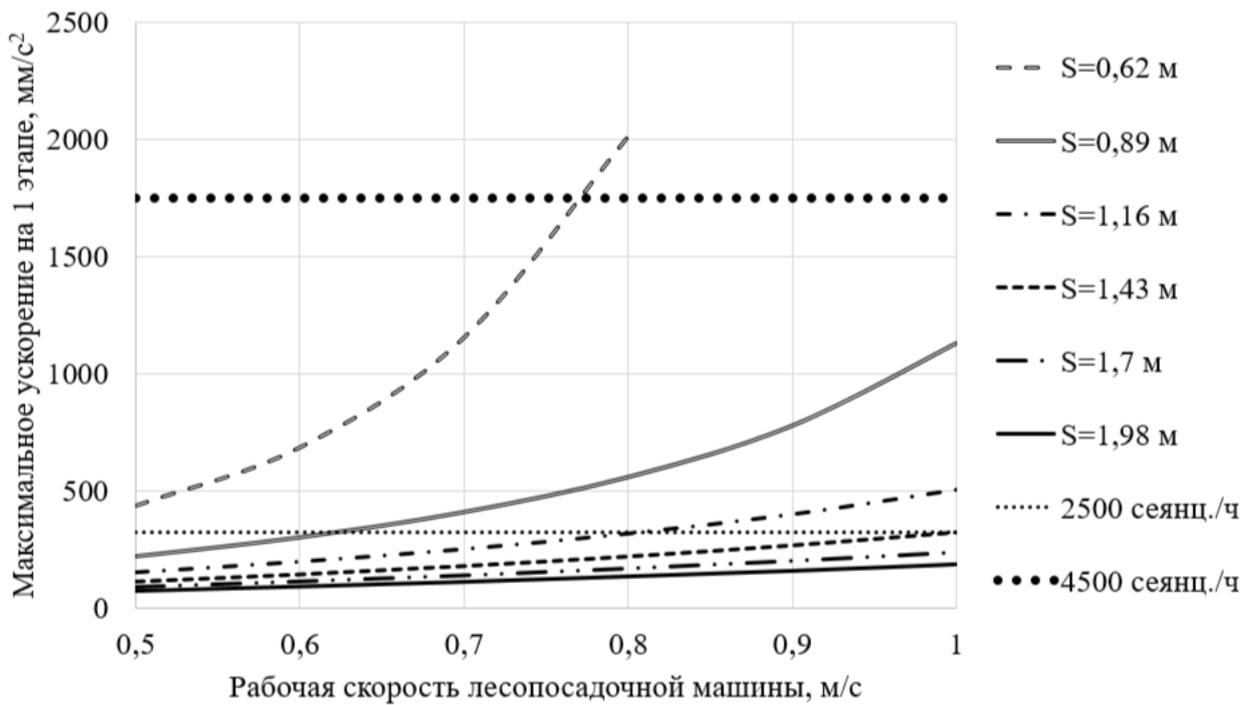


Рисунок В3 – Зависимость максимального ускорения движения захвата по оси у от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при  $n = 10$

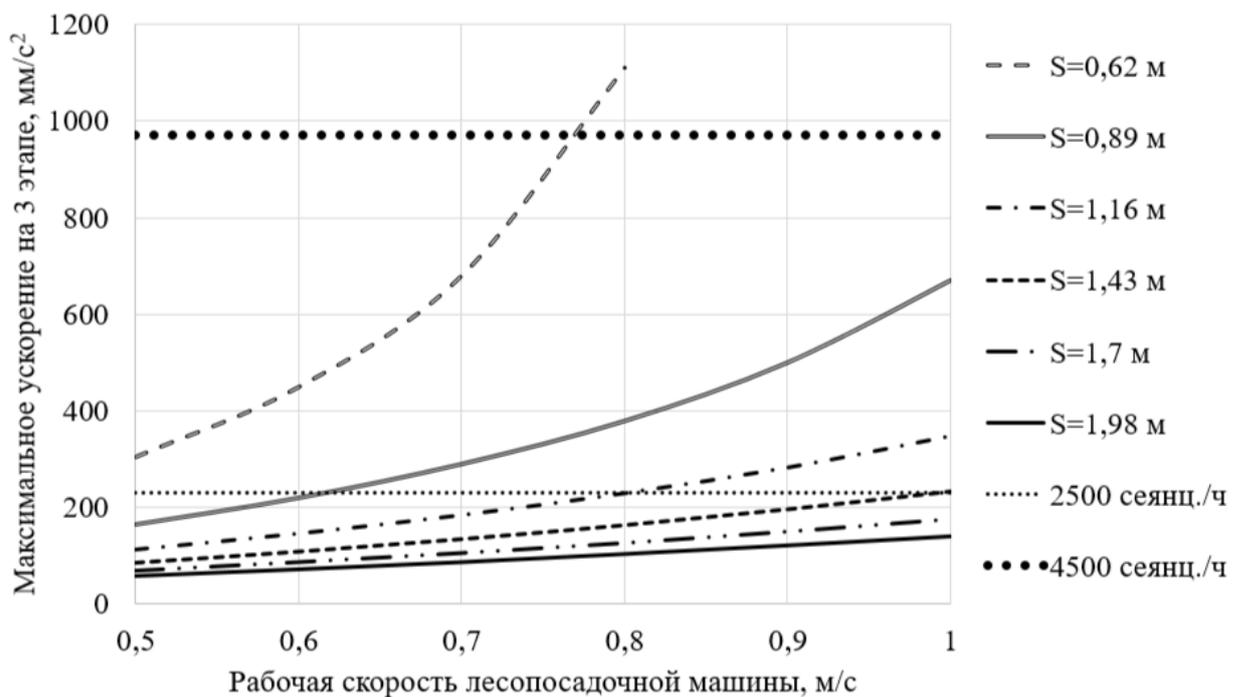


Рисунок В4 – Зависимость максимального ускорения движения захвата по оси у от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при  $n = 10$

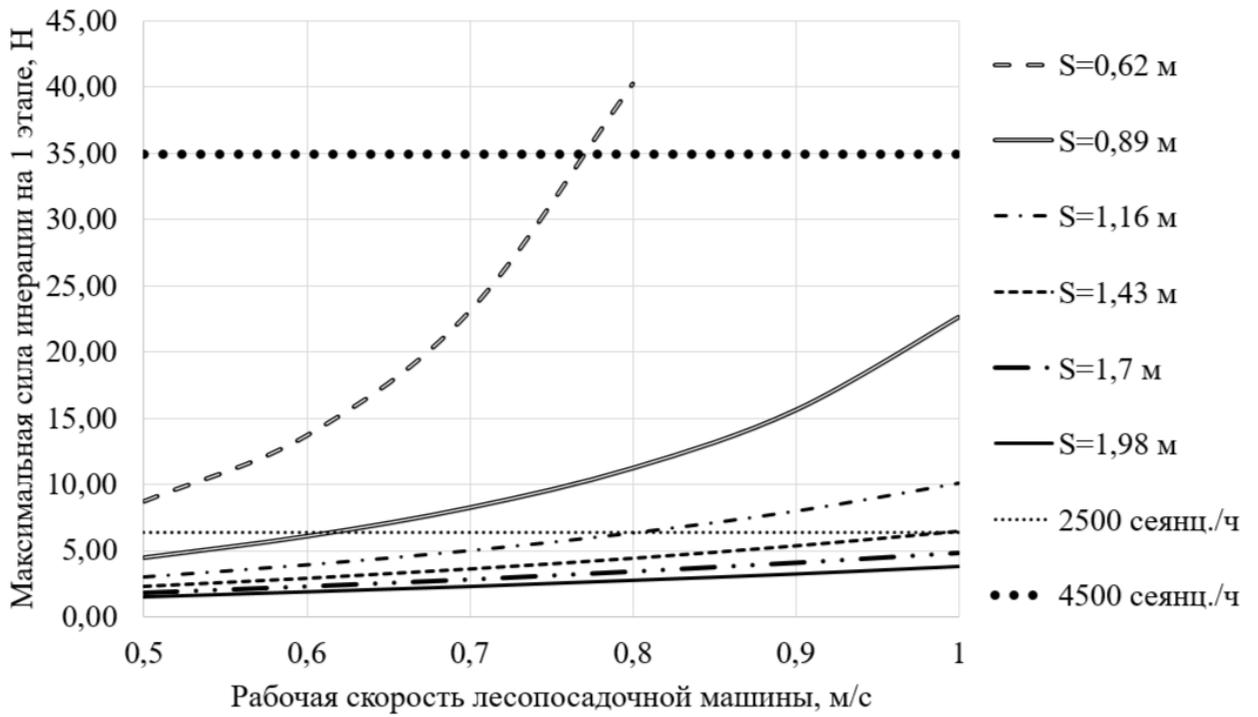


Рисунок В5 – Зависимость максимальной силы инерции захвата от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при  $n = 10$

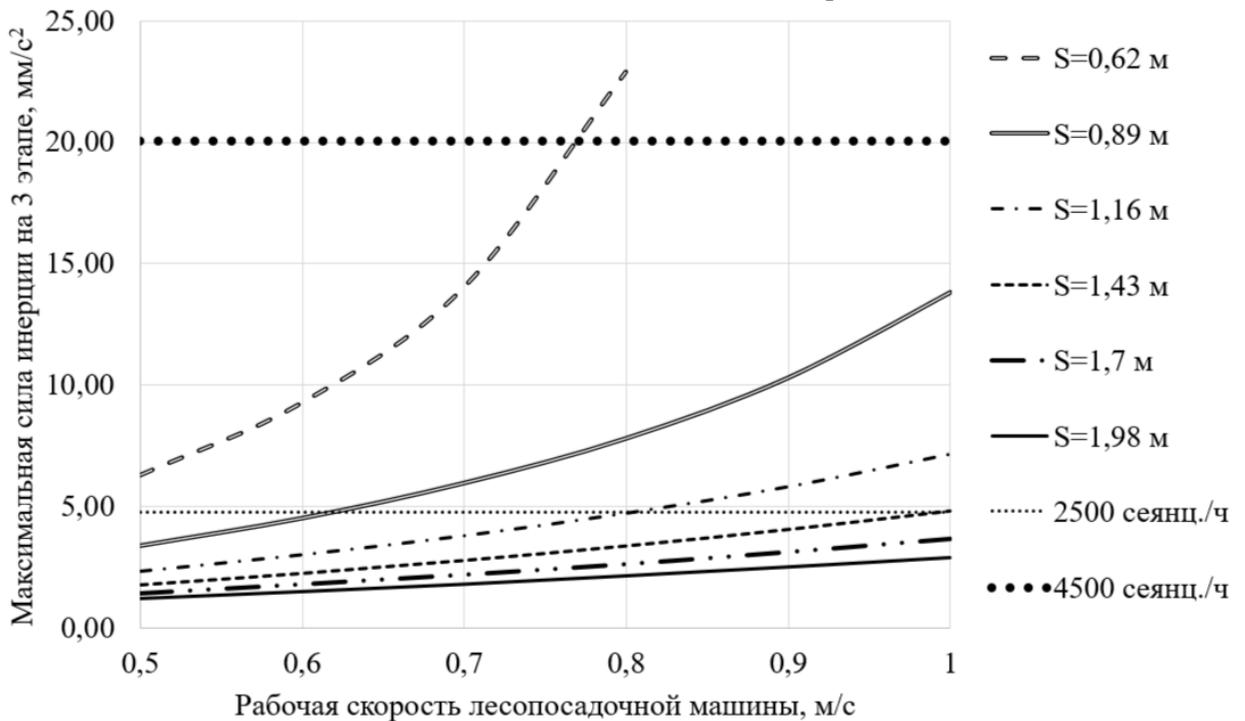


Рисунок В6 – Зависимость максимальной силы инерции захвата от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при  $n = 10$

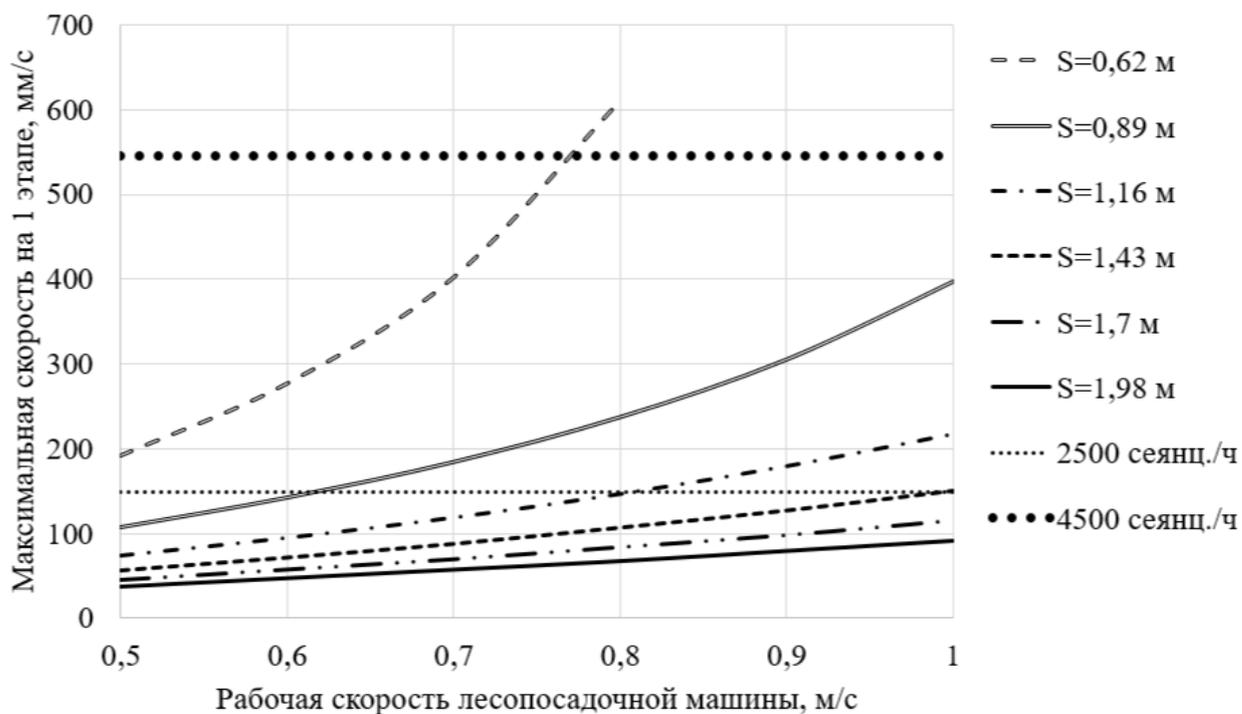


Рисунок В7 – Зависимость максимальной скорости перемещения захвата по оси y от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при  $n = 12$

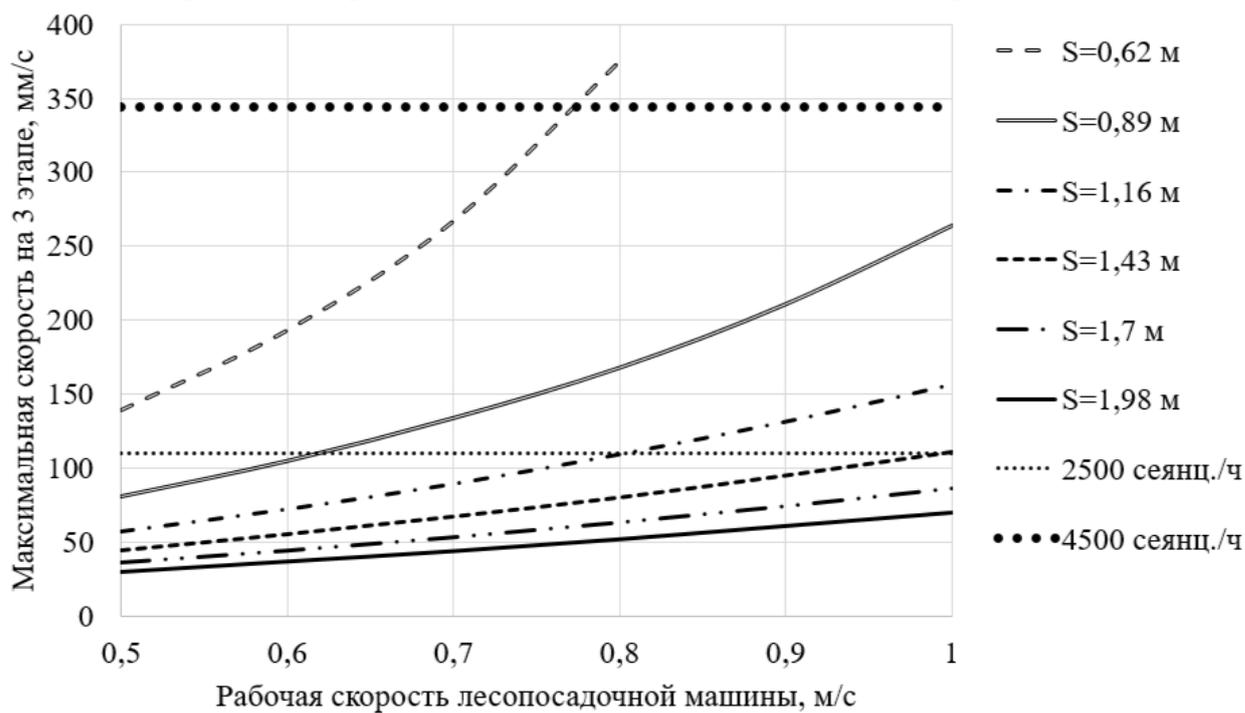


Рисунок В8 – Зависимость максимальной скорости перемещения захвата по оси y от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при  $n = 12$

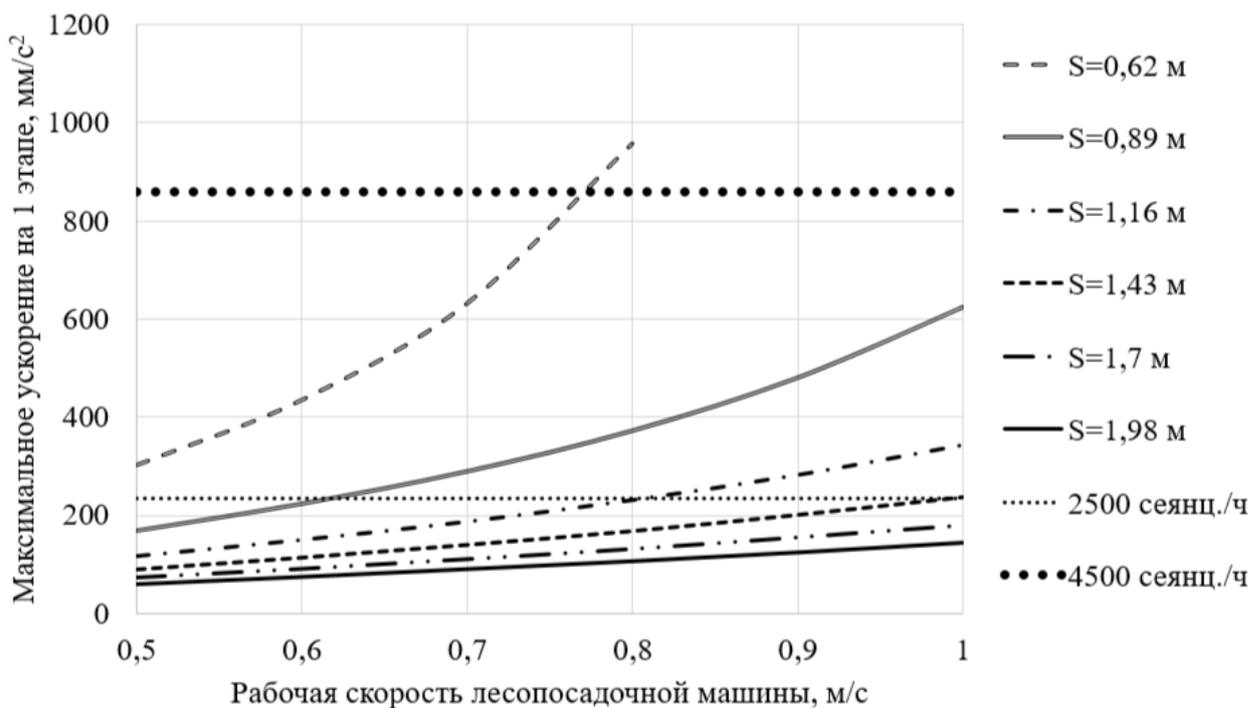


Рисунок В9 – Зависимость максимального ускорения движения захвата по оси у от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при n = 12

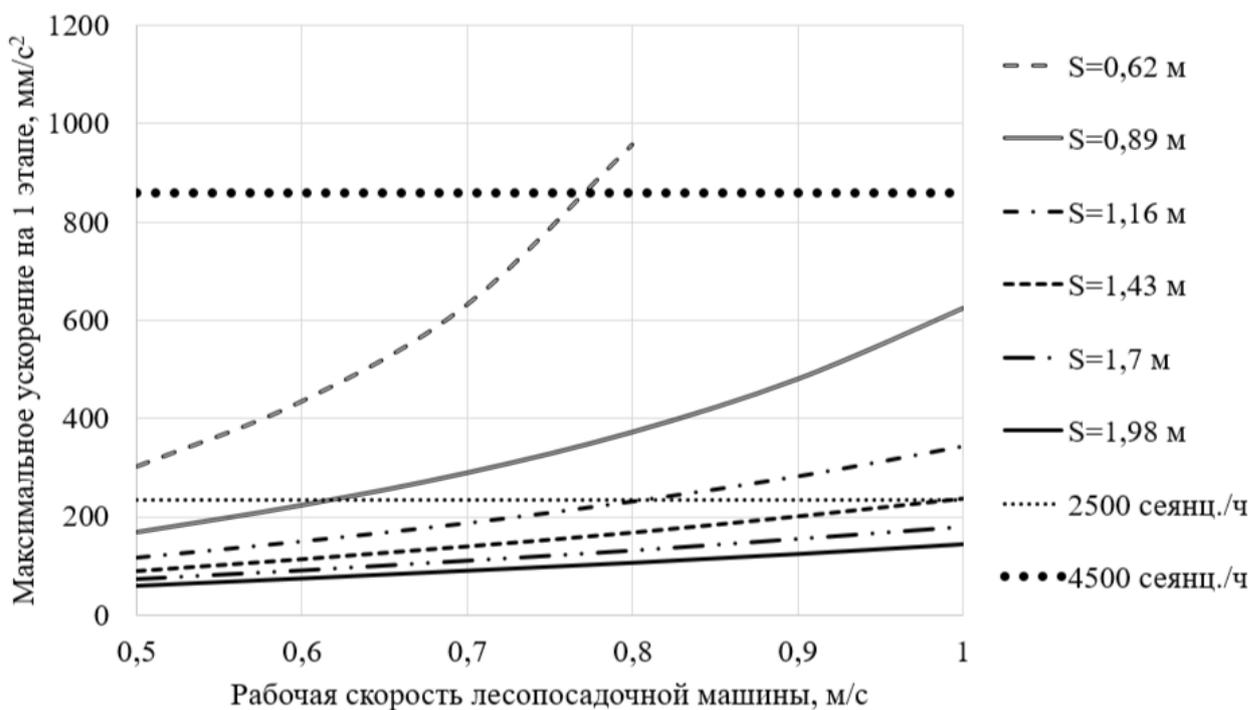


Рисунок В10 – Зависимость максимального ускорения движения захвата по оси у от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при n = 12

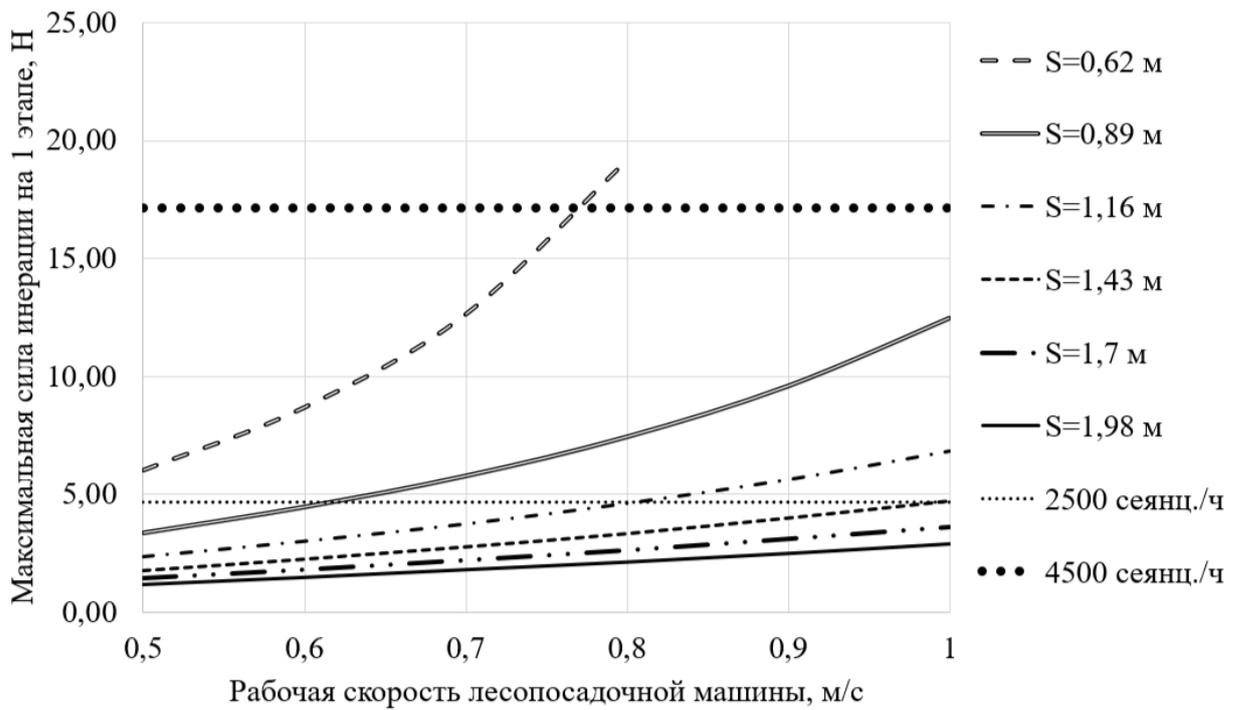


Рисунок В11 – Зависимость максимальной силы инерции захвата от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 1 при  $n = 12$

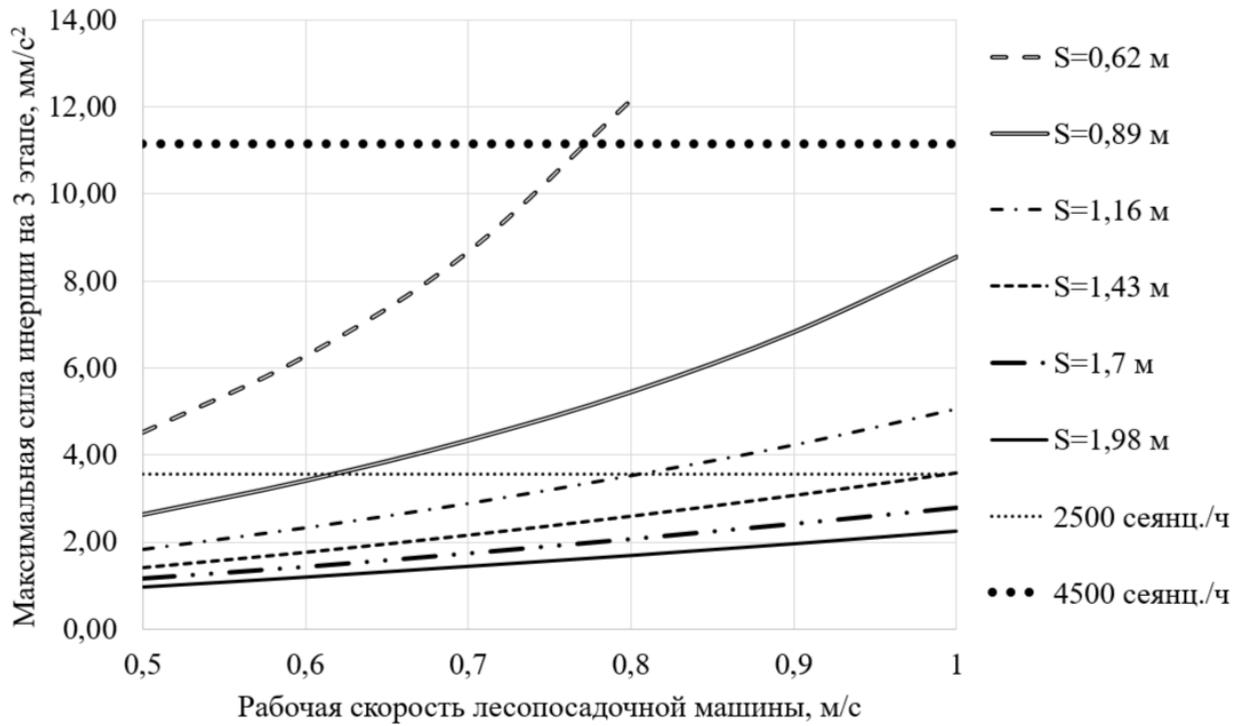


Рисунок В12 – Зависимость максимальной силы инерции захвата от рабочей скорости лесопосадочной машины на этапе 3 при  $n = 12$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1 – Матрица планирования эксперимента

| Номер опыта | Число факторов |           |       |
|-------------|----------------|-----------|-------|
|             | $X_1$          | $X_2$     | $X_3$ |
| 1           | 0,62 м         | 0,53 м/с  | 10    |
| 2           | 1,30 м         | 0,53 м/с  | 10    |
| 3           | 1,98 м         | 0,53 м/с  | 10    |
| 4           | 0,62 м         | 0,765 м/с | 10    |
| 5           | 1,30 м         | 0,765 м/с | 10    |
| 6           | 1,98 м         | 0,765 м/с | 10    |
| 7           | 0,62 м         | 1,0 м/с   | 10    |
| 8           | 1,30 м         | 1,0 м/с   | 10    |
| 9           | 1,98 м         | 1,0 м/с   | 10    |
| 10          | 0,62 м         | 0,53 м/с  | 12    |
| 11          | 1,30 м         | 0,53 м/с  | 12    |
| 12          | 1,98 м         | 0,53 м/с  | 12    |
| 13          | 0,62 м         | 0,765 м/с | 12    |
| 14          | 1,30 м         | 0,765 м/с | 12    |
| 15          | 1,98 м         | 0,765 м/с | 12    |
| 16          | 0,62 м         | 1,0 м/с   | 12    |
| 17          | 1,30 м         | 1,0 м/с   | 12    |
| 18          | 1,98 м         | 1,0 м/с   | 12    |
| 19          | 0,62 м         | 0,53 м/с  | 14    |
| 20          | 1,30 м         | 0,53 м/с  | 14    |
| 21          | 1,98 м         | 0,53 м/с  | 14    |
| 22          | 0,62 м         | 0,765 м/с | 14    |
| 23          | 1,30 м         | 0,765 м/с | 14    |
| 24          | 1,98 м         | 0,765 м/с | 14    |
| 25          | 0,62 м         | 1,0 м/с   | 14    |
| 26          | 1,30 м         | 1,0 м/с   | 14    |
| 27          | 1,98 м         | 1,0 м/с   | 14    |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица Д1 – Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнений регрессии и статистические параметры выходных параметров

| Коэффициенты регрессии              | Выходные параметры     |          |          |          |          |          |          |
|-------------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                     | $Y_1$                  | $Y_2$    | $Y_3$    | $Y_4$    | $Y_5$    | $Y_6$    | $Y_7$    |
|                                     | Значения коэффициентов |          |          |          |          |          |          |
| $b_0$                               | -257,986               | 3838,08  | 754,085  | 2308,7   | -36,627  | 3189,54  | -6,482   |
| $b_1$                               | -2396,59               | -14699,2 | -1654,56 | -8086,13 | 521,921  | 12231,8  | 6,593    |
| $b_2$                               | 9536,05                | 17774,2  | 4330,95  | 8563,36  | -87,22   | -27800,7 | 10408,9  |
| $b_3$                               | -92,793                | -40,114  | -170,311 | 15,826   | 0,0      | 0,0      | 0,0      |
| $b_{11}$                            | 595,277                | 3254,83  | 528,819  | 1780,36  | -284,11  | -7717,84 | -0,794   |
| $b_{12}$                            | -6829,88               | -27110,1 | -5305,56 | -14410,2 | 0,0      | -10432,5 | -8811,63 |
| $b_{13}$                            | 538,415                | 2998,53  | 375,138  | 1617,89  | 1322,4   | 0,0      | 0,0      |
| $b_{22}$                            | 3995,23                | 51993,9  | 5077,59  | 29271,1  | 0,0      | 43611,3  | -8,654   |
| $b_{23}$                            | -1128,49               | -5962,87 | -618,861 | -3214,37 | 0,0      | 0,0      | 0,0      |
| $b_{33}$                            | 5,057                  | -7,403   | 7,844    | -7,592   | 644,188  | 0,0      | 0,0      |
| $b_{112}$                           | 1635,78                | 6419,64  | 1300,65  | 3357,44  | 0,0      | 14383,8  | 2256,96  |
| $b_{113}$                           | -112,997               | -562,374 | 97,1381  | -298,263 | -745,613 | 0,0      | 0,0      |
| $b_{122}$                           | -1484,57               | -11878,8 | -1619,93 | -6355,46 | 0,0      | -24565,3 | 6,657    |
| $b_{123}$                           | 294,9                  | 1993,12  | 282,384  | 1076,35  | 0,0      | 0,0      | 0,0      |
| $b_{133}$                           | -15,809                | -110,692 | -10,968  | -60,356  | 0,0      | 0,0      | 0,0      |
| $b_{223}$                           | -108,646               | -2585,63 | -181,832 | -1503,7  | 0,0      | 0,0      | 0,0      |
| $b_{233}$                           | 31,383                 | 266,046  | 16,046   | 150,089  | 0,0      | 0,0      | 0,0      |
| Коэффициент детерминации, $R^2$ , % | 97,91                  | 85,09    | 96,64    | 84,52    | 99,66    | 98,11    | 99,57    |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е1 – Характеристики системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат лесопосадочной машины

| Параметры лесопосадочной машины |                                      |                                    | Характеристики системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат                        |   |   |   |  |  |                                |
|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|---|---|---|--|--|--------------------------------|
| Шаг посадки, $S$ , м            | Рабочая скорость машины, $V_p$ , м/с | Количество семян в накопителе, $n$ | Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян, мм/с | Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян, мм/с <sup>2</sup> | Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян, мм/с | Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян, мм/с <sup>2</sup> | Максимальная скорость перемещения семян в накопителе, мм/с | Максимальное ускорение при перемещении в накопителе, мм/с <sup>2</sup> | Производительность, семян./час |
| 0,62                            | 0,53                                 | 10,0                               | 316   | 496   | 217   | 341   | 160  | 645  | 3077                           |
| 1,3                             | 0,53                                 | 10,0                               | 88  | 138   | 67  | 105   | 58   | 92   | 1468                           |
| 1,98                            | 0,53                                 | 10,0                               | 51  | 80  | 39  | 62  | 26   | 42   | 964                            |
| 0,62                            | 0,765                                | 10,0                               | 825   | 1654  | 588   | 924   | 297  | 2233   | 4442                           |
| 1,3                             | 0,765                                | 10,0                               | 153   | 240   | 113   | 177   | 95   | 228  | 2118                           |
| 1,98                            | 0,765                                | 10,0                               | 82  | 129   | 62  | 98  | 52   | 81   | 1391                           |
| 0,62                            | 1,0                                  | 10,0                               | 1651  | 6631  | 1303  | 3662  | 546  | 7546   | 5806                           |
| 1,3                             | 1,0                                  | 10,0                               | 250   | 393   | 177   | 278   | 137  | 473  | 2769                           |
| 1,98                            | 1,0                                  | 10,0                               | 120   | 189   | 90  | 141   | 78   | 155  | 1818                           |
| 0,62                            | 0,53                                 | 12,0                               | 215   | 337   | 154   | 242   | 160  | 645  | 3077                           |
| 1,3                             | 0,53                                 | 12,0                               | 69  | 109   | 53  | 83  | 58   | 92   | 1468                           |
| 1,98                            | 0,53                                 | 12,0                               | 41  | 65  | 32  | 50  | 26   | 42   | 964                            |
| 0,62                            | 0,765                                | 12,0                               | 523   | 822   | 332   | 522   | 297  | 2233   | 4442                           |
| 1,3                             | 0,765                                | 12,0                               | 115   | 180   | 86  | 135   | 95   | 228  | 2118                           |

| Параметры лепосадочной машины |                                      |                                    | Характеристики системы подачи семян с ЗКС в посадочный аппарат                        |   |   |   |  |  |                                |
|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|---|---|---|--|--|--------------------------------|
| Шаг посадки, $S$ , м          | Рабочая скорость машины, $V_P$ , м/с | Количество семян в накопителе, $n$ | Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян, мм/с | Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к последнему ряду семян, мм/с <sup>2</sup> | Максимальная скорость механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян, мм/с | Максимальное ускорение механизма захвата при перемещении к накопителю от последнего ряда семян, мм/с <sup>2</sup> | Максимальная скорость перемещения семян в накопителе, мм/с | Максимальное ускорение при перемещении в накопителе, мм/с <sup>2</sup> | Производительность, семян./час |
| 1,98                          | 0,765                                | 12,0                               | 64  | 101   | 49  | 78  | 52   | 81   | 1391                           |
| 0,62                          | 1,0                                  | 12,0                               | 999   | 2428  | 788   | 1341  | 546  | 7546   | 5806                           |
| 1,3                           | 1,0                                  | 12,0                               | 177   | 278   | 129   | 203   | 137  | 473  | 2769                           |
| 1,98                          | 1,0                                  | 12,0                               | 92  | 145   | 70  | 109   | 78   | 155  | 1818                           |
| 0,62                          | 0,53                                 | 14,0                               | 163   | 255   | 119   | 187   | 160  | 645  | 3077                           |
| 1,3                           | 0,53                                 | 14,0                               | 57  | 89  | 44  | 69  | 58   | 92   | 1468                           |
| 1,98                          | 0,53                                 | 14,0                               | 34  | 54  | 27  | 42  | 26   | 42   | 964                            |
| 0,62                          | 0,765                                | 14,0                               | 340   | 534   | 231   | 364   | 297  | 2233   | 4442                           |
| 1,3                           | 0,765                                | 14,0                               | 92  | 144   | 70  | 109   | 95   | 228  | 2118                           |
| 1,98                          | 0,765                                | 14,0                               | 53  | 84  | 41  | 64  | 52   | 81   | 1391                           |
| 0,62                          | 1,0                                  | 14,0                               | 716   | 1248  | 462   | 725   | 546  | 7546   | 5806                           |
| 1,3                           | 1,0                                  | 14,0                               | 137   | 215   | 101   | 159   | 137  | 473  | 2769                           |
| 1,98                          | 1,0                                  | 14,0                               | 75  | 117   | 57  | 90  | 78   | 155  | 1818                           |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Таблица Ж1 – Данные выходных параметров и их нормированных значений с обобщенным параметром оптимизации

| № опыта | Выходной параметр |       |       | Нормировка выходного параметра |       |       | Обобщенный параметр |
|---------|-------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|---------------------|
|         | $Y_3$             | $Y_6$ | $Y_7$ | $d_3$                          | $d_6$ | $d_7$ | $W_g$               |
| 1       | 217               | 645   | 3077  | 0,725                          | 0,662 | 0,670 | 0,690               |
| 2       | 67                | 92    | 1468  | 0,940                          | 0,968 | 0,196 | 0,431               |
| 3       | 39                | 42    | 964   | 0,980                          | 0,996 | 0,048 | 0,218               |
| 4       | 588               | 2233  | 4442  | 0,193                          | 0,000 | 0,000 | 0,000               |
| 5       | 113               | 228   | 2118  | 0,874                          | 0,893 | 0,388 | 0,583               |
| 6       | 62                | 81    | 1391  | 0,947                          | 0,975 | 0,174 | 0,407               |
| 7       | 1303              | 7546  | 5806  | 0,000                          | 0,000 | 0,000 | 0,000               |
| 8       | 177               | 473   | 2769  | 0,782                          | 0,757 | 0,579 | 0,671               |
| 9       | 90                | 155   | 1818  | 0,907                          | 0,933 | 0,299 | 0,523               |
| 10      | 154               | 645   | 3077  | 0,815                          | 0,662 | 0,670 | 0,724               |
| 11      | 53                | 92    | 1468  | 0,960                          | 0,968 | 0,196 | 0,435               |
| 12      | 32                | 42    | 964   | 0,990                          | 0,996 | 0,048 | 0,219               |
| 13      | 332               | 2233  | 4442  | 0,560                          | 0,000 | 0,000 | 0,000               |
| 14      | 86                | 228   | 2118  | 0,913                          | 0,893 | 0,388 | 0,593               |
| 15      | 49                | 81    | 1391  | 0,966                          | 0,975 | 0,174 | 0,410               |
| 16      | 788               | 7546  | 5806  | 0,000                          | 0,000 | 0,000 | 0,000               |
| 17      | 129               | 473   | 2769  | 0,851                          | 0,757 | 0,579 | 0,694               |
| 18      | 70                | 155   | 1818  | 0,936                          | 0,933 | 0,299 | 0,529               |
| 19      | 119               | 645   | 3077  | 0,865                          | 0,662 | 0,670 | 0,741               |
| 20      | 44                | 92    | 1468  | 0,973                          | 0,968 | 0,196 | 0,437               |
| 21      | 27                | 42    | 964   | 0,997                          | 0,996 | 0,048 | 0,219               |
| 22      | 231               | 2233  | 4442  | 0,705                          | 0,000 | 0,000 | 0,000               |
| 23      | 70                | 228   | 2118  | 0,936                          | 0,893 | 0,388 | 0,599               |
| 24      | 41                | 81    | 1391  | 0,977                          | 0,975 | 0,174 | 0,412               |

окончание таблицы Ж1

| № опыта   | Выходной параметр |       |       | Нормировка выходного параметра |       |       | Обобщенный параметр |
|-----------|-------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|---------------------|
|           | $Y_3$             | $Y_6$ | $Y_7$ | $d_3$                          | $d_6$ | $d_7$ | $W_g$               |
| 25        | 462               | 7546  | 5806  | 0,374                          | 0,000 | 0,000 | 0,000               |
| 26        | 101               | 473   | 2769  | 0,891                          | 0,757 | 0,579 | 0,707               |
| 27        | 57                | 155   | 1818  | 0,954                          | 0,933 | 0,299 | 0,533               |
| $y^{(-)}$ | 723               | 1839  | 800   |                                |       |       |                     |
| $y^{(+)}$ | 25                | 35    | 4200  | -                              | -     | -     | -                   |
| $\delta$  | 0,8               | 0,2   | 1,0   |                                |       |       |                     |