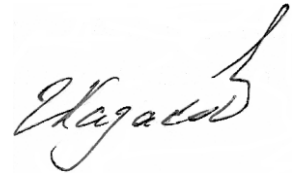


На правах рукописи



Казачков Игорь Владимирович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСА НОВЫХ
И УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МАШИН И ОРУДИЙ ДЛЯ
ВЫРАЩИВАНИЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ
ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ФГБОУ ВО «ВГЛУ»)

Научный консультант: **Посметьев Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Котов Алексей Александрович** – доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана», кафедра лесных культур, селекции и дендрологии, профессор

Гиевский Алексей Михайлович – доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени Петра 1», кафедра сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей, профессор

Фокин Сергей Владимирович – доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова», кафедра лесного хозяйства и ландшафтного строительства, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» (г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл)

Защита состоится 16 сентября 2022 г. В 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.034.02, созданном на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8, зал заседаний – ауд. 146.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова
<http://www.vglu.vrn.ru/rassmotrenie-dissertacij-v-sovete-d-212-034-02>

Автореферат разослан «__» мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Платонов Алексей Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в Российской Федерации производственные возможности лесных питомников по выращиванию стандартного посадочного материала хвойных и лиственных пород для целей воспроизводства и лесоразведения составляют не менее 700 млн. шт. в год. Однако учитывая современную устойчивую тенденцию существенного сокращения в стране лесных площадей вследствие плановых и несанкционированных вырубок леса, стихийных бедствий (пожаров, болезней и др.), которые подлежат восстановлению, реальная потребность в посадочном материале значительно больше. В этой связи выращивание в необходимых объемах высококачественного посадочного материала, при минимальных материальных и трудовых затратах, приобретает важное значение.

Наиболее перспективным и экономически оправданным по конечному результату посадочным материалом для создания лесных культур являются саженцы. Однако, традиционная технология выращивания укрупненного посадочного материала в виде саженцев является многооперационной – в начале выращивают сеянцы в посевном отделении, а затем их пересаживают для доращивания в школьное, это увеличивает затраты и удлиняет сроки на их выращивание. В этой связи получение в посевном отделении питомника укрупненного посадочного материала сокращает сроки его выращивания на один год, уменьшает количество операций, перечень и номенклатуру применяемых средств механизации. Необходимым условием реализации этой технологии является равномерно-разреженный посев семян с обеспечением их достаточной площадью питания для роста и развития сеянцев. Широкое применение этой технологии неоправданно ограничено отсутствием совершенного комплекса машин и орудий с научно обоснованными их конструктивными и рабочими параметрами.

Повышение качества посадочного материала, выращиваемого в лесных питомниках, возможно лишь при полноценном выполнении регламентированных технологических операций: первичной обработки почвы, мульчирования, внесения удобрений, посева, агротехнического ухода, обработки гербицидами, полива, выкопки и др. Наиболее трудоемкими из них являются операции посева, ухода и выкопки, которые все еще выполняются устаревшими конструкциями машин и орудий, по своим характеристикам не отвечающих действующим нормативам и возросшим требованиям к показателям качества, а также к снижению затрат на производство выращиваемого посадочного материала.

Существующие лесные сеялки, используемые в лесных питомниках для высева крупных семян лиственных пород и мелких семян хвойных пород, допускают повреждения и неравномерность их распределения в посевной бороздке. Это объясняется тем, что лесные сеялки не обеспечивают поштучно-равномерный высев крупных семян лиственных пород и равномерно-разряженный высев мелких семян хвойных пород, что ведет к неоправданно высокому расходу дорогостоящих семян, а также к загущению посевов, и как следствие этого, существенному снижению качества выращиваемого посадочного материала. Кроме того, применяемые в сеялках прикатывающие катки из-за недостаточно обоснованных их параметров и режимов работы не обеспечивают требуемую плотность почвы в посевной бороздке, что также отрицательно влияет на всхожесть семян и качество посадочного материала.

Качество агротехнического ухода в лесных питомниках в настоящее время также не соответствует должному уровню. Основной причиной этого является использование культиваторов, конструктивные параметры которых не в полной мере соответствуют требуемым агротехническим показателям ухода за посадочным мате-

риалом, выращиваемым в специфических условиях лесных питомников. Рабочие органы таких орудий недостаточно полно удаляют сорную растительность в междурядьях и часто забиваются ею, сгруживают почву, не обеспечивают требуемую стабильность глубины обработки и ширины защитной зоны, а также допускают неоправданно повышенную повреждаемость посадочного материала.

Важной операцией, существенно влияющей на качество выращиваемого посадочного материала, является его выкопка. Применяемые для этой операции традиционные машины с пассивными и активными рабочими органами, вследствие несовершенства их конструкций, не обеспечивают получение посадочного материала с минимальными повреждениями и энергозатратами.

Таким образом, решение проблемы, направленной на обоснование параметров комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для выращивания посадочного материала в зоне хвойно-широколиственных лесов, является своевременной и актуальной для отрасли.

Работа выполнена в соответствии с: «Приоритетным направлением научных исследований в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов, обеспечивающим их устойчивое управление и развитие лесного комплекса» (Утверждены приказом Рослесхоза от 19.12.2012 № 519); Государственной программой Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства» (утверждена Постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 318, ред. от 31.03.2020 № 393) – подпрограмма «Обеспечение использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов»; основами государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года (Утверждены распоряжением Правительства Российской Федерации от 26.09.2013 № 1724-р); разд. IV. п. 10е «Повышение продуктивности и улучшение породного состава лесов на землях различного целевого назначения», разд. V. п. 17в «Осуществление технической модернизации воспроизводства лесов»; Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 года № 312-р); раздел 3 – основные направления развития лесного комплекса, подраздел 5 – совершенствование воспроизводства лесов.

Степень разработанности темы. Решение различных аспектов проблемы совершенствования конструктивных параметров и режимов работы машин для механизации работ в питомниках было заложено в трудах ученых и специалистов лесного хозяйства А.И. Баранова, И.М. Зима, П.С. Нартова, И.М. Бартенева, Г.А. Ларюхина, Л.Т. Свиридова, Ф.В. Пошарникова, В.Н. Винокурова, М.В. Драпалюка, А.М. Цыпука, В.С. Сюнева, В.И. Казакова, Ю.Ю. Герасимова, А.В. Родионова, Г.Б. Климова, А.Н. Заикина, В.И. Посметьева, А.А. Котова и др. Ими предложены концепции развития средств механизации для лесного хозяйства и основные направления научных исследований по созданию новых лесных машин, а также разработаны основы расчета и проектирования машин и орудий для механизации основных технологических операций в лесном хозяйстве. В то же время некоторые важные проблемы все еще недостаточно полно решены, в частности, такие как, совершенствование конструктивных параметров и режимов работы машин и орудий, предназначенных для механизации работ в лесных питомниках, учитывающие новые перспективные агроприемы посева семян, ухода за растениями и выкопки посадочного материала.

Изучению вопросов, связанных с проблемой совершенствования существующих и разработки перспективных технологий выращивания посадочного материала для воспроизводства и лесовосстановления, посвящены работы ученых Н.А. Смирно-

ва, А.Р. Родина, А.В. Жигунова, С.А. Родина, Е.М. Романова, А.И. Писаренко, Н.М. Ведерникова, А.И. Чернодубова, Г.Я. Маттиса, А.М. Гиевского, Д.П. Ишина, Н.С. Прошина, С.В. Фокина, И.А. Марковой, Д.И. Мухортова, П.П. Мелешина и др. Однако, в трудах этих ученых, не учтены перспективные возможности новых и модернизированных машин и орудий для механизации работ в лесных питомниках, которые позволяют существенно повысить качество выполняемых ими технологических операций, в частности: посев, уход и выкопку посадочного материала. Кроме этого, все еще недостаточно полно были проработаны вопросы теоретического обоснования, в том числе на уровне имитационного моделирования рабочих процессов, связанных с получением высококачественного посадочного материала.

Таким образом, несмотря на фундаментальные исследования ученых и технологов, требуется дальнейшее развитие и совершенствование, как технологических операций выращивания посадочного материала, так и технических средств для повышения уровня механизации работ в лесных питомниках.

Цель исследования – повышение качества выращиваемого посадочного материала в зоне хвойно-широколиственных лесов с наименьшими материальными и трудовыми затратами за счет обоснования конструктивно-технологических параметров и режимов работы комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для посева, ухода и выкопки.

Задачи исследования:

1 Обосновать новые конструктивные схемы, параметры и режимы работы сеялок для поштучно-равномерного посева крупноплодных семян и для равномерно-разреженного посева мелких семян хвойных пород в лесных питомниках.

2 Исследовать технологические показатели желудей дуба черешчатого, необходимые для обоснования конструктивных параметров и режимов работы сеялки для посева крупноплодных семян в лесных питомниках.

3 Разработать математическую модель, алгоритмы, программы для ЭВМ и базы данных рабочего процесса и оптимизации конструктивных параметров рабочих органов сеялок для заделки семян почвой на заданную глубину в посевной бороздке.

4 Обосновать выбор типов, параметры и режимы работы с оптимизацией конструктивных параметров рабочих органов культиватора и выкопчной машины для лесных питомников.

5 Разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния слоя почвы в процессе ее взаимодействия с рабочими органами выкопчной машины.

6 Провести опытно-производственную проверку комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для выращивания посадочного материала лиственных и хвойных пород в лесных питомниках.

Объекты и предмет исследования. Объектами исследования являются перспективные конструктивные решения машин и орудий для посева, ухода и выкопки посадочного материала в лесных питомниках. Предметом исследования являются рабочие процессы и конструктивные параметры новых и усовершенствованных машин и орудий с учетом специфических условий их функционирования в лесных питомниках в зоне хвойно-широколиственных лесов.

Научная новизна результатов работы. Научной новизной обладают:

1 Рабочие процессы сеялки для поштучно-равномерного посева крупноплодных семян, сеялки для равномерно-разреженного посева мелких семян хвойных пород, защищенных патентами на изобретения и полезные модели, отличающиеся повышением качества посева в лесных питомниках.

2 Технологические показатели желудей дуба черешчатого, отличающиеся обоснованными параметрами, необходимыми при проектировании высевающего аппарата и конструкции сеялки с учетом основных факторов, определяющих качество посева в лесных питомниках.

3 Математические модели, программы для ЭВМ и базы данных технологических процессов для оптимизации параметров рабочих органов сеялок для посева крупных семян лиственных пород и мелких семян хвойных пород, отличающиеся учетом параметров новых конструкций сеялок, стабильностью заделки семян в почву на заданную глубину в посевной бороздке.

4 Рабочие процессы культиватора и выкопчной машины, защищенные патентами на изобретения и полезные модели, с обоснованными выборами типов, параметров, режимов работы и оптимизацией конструктивных параметров рабочих органов, отличающиеся повышением качества посева, ухода и выкопки посадочного материала в лесных питомниках.

5 Математическая модель напряженно-деформированного состояния почвы, отличающаяся учетом реологических свойств почвы, параметров и режимов работы новой выкопчной машины.

6 Результаты опытно-производственной проверки комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для выращивания посадочного материала лиственных и хвойных пород в лесных питомниках, отличающиеся учетом воздействия внешней среды и их конструктивными особенностями.

Теоретическая значимость работы заключается в: расширении теории расчета и проектирования ячеисто-транспортного высевающего аппарата для посева крупноплодных семян; исследовании рабочего процесса штифтового высевающего аппарата для посева мелких семян хвойных пород; исследовании взаимосвязи прикатывающего катка с почвой при заделке семян в посевной бороздке; расширении теории расчета рабочих органов культиватора; исследовании процесса разрушения почвенного пласта при выкопке посадочного материала; математическом моделировании процесса заделки посевной бороздки почвой, позволившем обосновать оптимальные параметры загортачей; моделировании напряженно-деформированного состояния грунта в процессе его взаимодействия с рабочими органами выкопчной машины.

Практическая значимость работы. По результатам исследований получены исходные данные на проектирование и изготовление опытных образцов комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для выращивания посадочного материала в зоне хвойно-широколиственных лесов, разработке математических моделей и программ для ЭВМ, позволившим обосновать рациональные параметры рабочих органов новых машин и орудий; разработке оригинальных конструкций комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для выращивания посадочного материала и защищенных патентами на изобретения и полезные модели. Изготовлены, испытаны и внедрены в производство сеялка лесная навесная СЛН-5А, сеялка для крупноплодных семян СКБ-3-5, культиватор комбинированный для питомников ККП-1,5А и машина выкопчная МВ-1,3А. В ОАО «ЦОКБлесхозмаш» организовано серийное производство и поставка этого комплекса машин и орудий предприятиям лесного хозяйства.

Методы исследования. Теоретические исследования выполнялись с использованием общих законов физики, теоретической механики, математическом и имитационном моделировании, а также численных методов анализа. Экспериментальные исследования выполнялись в ВГЛТУ и ФБУ ВНИИЛМ с использованием опытных об-

разцов машин и орудий для механизации работ в питомниках при проведении лабораторных опытов в почвенных каналах, а также в реальных условиях эксплуатации в лесных питомниках по стандартным программам и методикам МИС. Полученные результаты обрабатывались методом математической статистики, с использованием ЭВМ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1 Рабочие процессы сеялки для посева крупноплодных семян, сеялки для посева мелких семян хвойных пород, защищенных патентами на изобретения и полезные модели, позволяющие в лесных питомниках зоны широколиственных лесов производить поштучно-равномерный посев крупноплодных семян и равномерно-разреженный посев мелких семян хвойных пород.

2 Технологические свойства желудей дуба черешчатого, позволяющие обосновать тип и оптимизировать конструктивные и рабочие параметры высевающего аппарата и сеялки для посева крупноплодных семян.

3 Математические модели, программы для ЭВМ и базы данных рабочих процессов посева и заделки почвой на заданную глубину в посевной бороздке крупноплодных и мелких семян хвойных пород, позволяющие оптимизировать параметры рабочих органов сеялок.

4 Рабочие процессы культиватора и выкопчной машины, защищенные патентами на изобретения и полезные модели, позволяющие повысить качество ухода и выкопки посадочного материала в лесных питомниках.

5 Математическая модель напряженно-деформированного состояния почвы, позволяющая прогнозировать динамику распределения перемещений, напряжений и деформаций в почве в зависимости от параметров и режимов работы выкопчной машины, а также реологических свойств почвы.

6 Результаты опытно-производственной проверки комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий, позволяющие оценить их эффективность и качество работы при выращивании посадочного материала лиственных и хвойных пород.

Степень достоверности результатов исследования и заключения базируется на обоснованной постановке задачи и целей работы, применением общепризнанных методик проведения опытов и обработки полученных результатов. Достоверность результатов теоретических и экспериментальных исследований подтверждена достаточным объемом полученных данных и положительными результатами разработки, испытаний и внедрения в производство комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на заседании кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин (2021 г.), на заседаниях Ученого совета ФБУ ВНИИЛМ (2016-2020 гг.) и научных конференциях: профессорско-преподавательского состава ВГЛТУ (1995-2021 гг.); ежегодных национальных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов по итогам НИР Мытищинского филиала МГТУ имени Н.Э. Баумана; международной научно-практической конференции – «Научно-технические проблемы в развитии ресурсосберегающих технологий и оборудования лесного комплекса» (2008 г.); международной конференции в Болгарии «39-the International symposium on forestry mechanization (FORMEC 2006). – Sofia, Bulgaria»; международной заочной научно-практической конференции – «Механика технологических процессов в лесном комплексе» (2014 г.); использовались в учебном процессе следующих вузов: «ВГЛТУ», «Мытищинский филиал МГТУ», «ПГУ» и институте повышения квалификации «ВИПКЛХ».

Разработанная сеялка для посева крупноплодных семян СКБ-3-5 получила 2 место в конкурсе губернатора Московской области. Комплекс машин, включающий сеялку СЛН-5А, культиватор ККП-1,5А и выкопчную машину МВ-1,3А экспонировался на ежегодных Международных выставках «Леспромбизнес» и «Лесдревмаш» (г. Москва) и отмечен призовыми дипломами. Опытные образцы этих машин успешно прошли приемочные испытания на Лесной МИС и рекомендованы к постановке на серийное производство, а также в ОАО «ЦОКБлесхозмаш» организован их выпуск и поставка лесохозяйственным предприятиям Воронежской, Тульской, Московской, Новгородской, Пермской, Ярославской, Тюменской и других областей.

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности. Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства, пунктам: 5 – «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы лесозаготовительных и лесохозяйственных машин», 2 – «Теория и методы воздействия техники и технологий на лесную среду в процессе заготовки древесного сырья и лесовыращивания».

Публикации. По теме диссертации опубликована 51 научная работа общим объемом 113 усл. печ. л. (доля автора – 37,7 усл. печ. л.), включая 1 монографию, энциклопедию лесного хозяйства, 2 учебника и 1 брошюру, 8 патентов на изобретения и полезные модели, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных, 2 статьи в журнале базы данных Scopus, а также 11 статей в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Автором единолично опубликовано 12 статей.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственно личное участие на всех этапах проведения исследования: обосновании постановки темы и ее актуальности, формулировании цели и задач исследования, проведении теоретических и экспериментальных исследований, разработке математических моделей и программ для ЭВМ, анализе полученных теоретических и экспериментальных данных, разработке, испытании и внедрении в производство комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для механизации работ в лесных питомниках.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 297 страниц, из которых 271 основного текста и 6 приложений, 83 иллюстрации, 35 таблиц и 287 наименований использованных источников, включая 24 на иностранных языках.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в подготовке диссертации д. с.-х. наук, профессору, академику РАН Родину С.А. и администрации ФБУ ВНИИЛМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматривается актуальность решаемой проблемы, разработанность поставленной темы, цель и задачи, научная новизна исследования и положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость, а также опытно-производственная проверка полученных результатов и их внедрение.

В первой главе «Состояние проблемы выращивания качественного посадочного материала в зоне хвойно-широколиственных лесов» представлены обзор научной литературы, характеристика почвенно-лесорастительных и природно-климатических условий питомников в зоне хвойно-широколиственных лесов. Изложен обзор результатов исследований свойств желудей и мелких семян хвойных пород, анализ технологий выращивания посадочного материала и требования к машинам и орудиям для выпол-

нения основных технологических операций. Дан обзор конструкций машин и орудий, применяемых при выращивании посадочного материала: сеялок для посева крупноплодных и мелких семян хвойных пород, культиваторов для ухода за сеянцами и саженцами в питомниках, машин и орудий для выкопки посадочного материала.

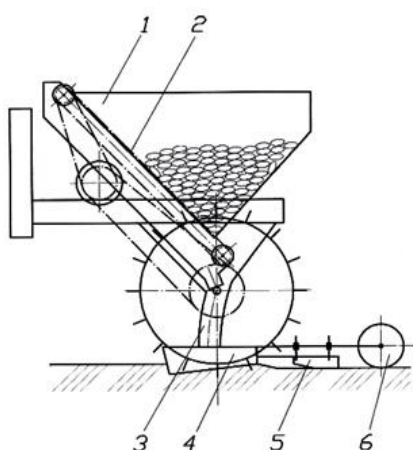
Обзор литературных источников показал, что исследования технологических свойств лесных семян изучены не достаточно полно и не систематизированы. В частности, для проведения экспериментальных исследований использовались семена с ростками, заготовленными в разные годы и со средой стратификации, и не могут быть использованы при обосновании параметров и режимов работы перспективных лесных сеялок.

Анализ конструкций существующих лесных сеялок показал, что они не обеспечивают поштучно-равномерный посев крупных семян лиственных пород и равномерно-разреженный посев мелких семян хвойных пород. Используемые в лесных сеялках высевальные аппараты травмируют семена, что негативно влияет на всхожесть и равномерность их посева. Культиваторы для агротехнического ухода в лесных питомниках не обеспечивают требуемого качества ухода и удаления сорной растительности в междурядьях. Применяемые для выкопки посадочного материала машины не удовлетворительно отделяют почву от корневых систем растений, что отрицательно влияет на качество посадочного материала. Таким образом, используемый в настоящее время в лесных питомниках комплекс машин и орудий, не обеспечивает необходимое качество посадочного материала в зоне хвойно-широколиственных лесов.

На основании анализа состояния проблемы сформулированы цель и задачи исследования, представляющие научный и практический интерес для лесного хозяйства.

Во второй главе «Обоснование инновационных технологий и конструктивно-технологических схем новых и усовершенствованных машин и орудий для лесных питомников» представлены результаты разработки конструктивно-технологической схемы сеялки СКБ-3-5 для посева крупноплодных семян с ячеисто-транспортёрным высевальным аппаратом в соответствии с патентом РФ № 2118076 (рис. 1).

Получены следующие аналитические выражения для установления основных параметров высевального аппарата: скорости подачи V_u и рационального шага расстановки ячеек t_k^{pac} в зависимости от поступательной скорости движения агрегата и конструкции механизма привода с передаточным отношением I_o^{pac} :



1 – семенной бункер; 2 – высевальный аппарат; 3 – семяпровод; 4 – сошник; 5 – загортаки; 6 – прикатывающие катки

Рисунок 1 – Схема устройства сеялки для посева крупноплодных семян

$$V_u = \frac{V_{aep}(1-S)t_u}{I_o D_k \sin \frac{180^\circ}{z}}; \quad (1)$$

$$t_k^{pac} = \frac{t_{ж} t_u (1-S)}{I_o D_k} \cos e c \frac{180^\circ}{z}; \quad (2)$$

$$I_o^{pac} = \frac{t_{ж} t_u (1-S)}{D_k t_k} \cos e c \frac{180^\circ}{z}; \quad (3)$$

где V_{aep} – скорость движения агрегата, м/с; S – коэффициент проскальзывания опорно-приводного колеса; t_u – шаг цепи привода высевального аппарата, м; $t_{ж}$ – рациональный шаг посева желудей, м; t_k – шаг расстановки ячеек высевальных аппаратов, м; I_o – общее передаточное отношение привода высевального аппарата; D_k – диаметр приводного колеса, м; z – число зубьев звездочки привода высевального аппарата.

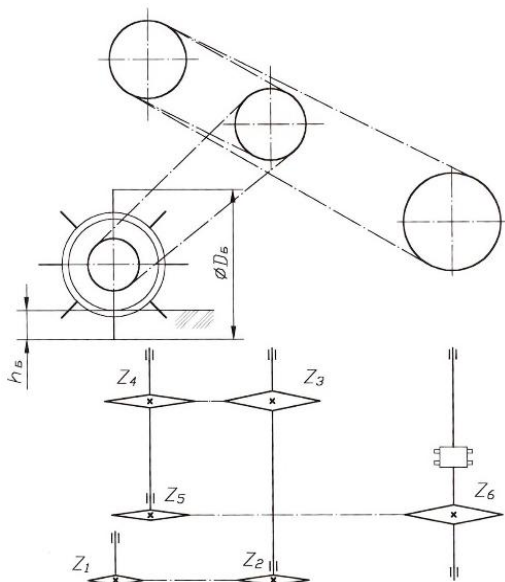


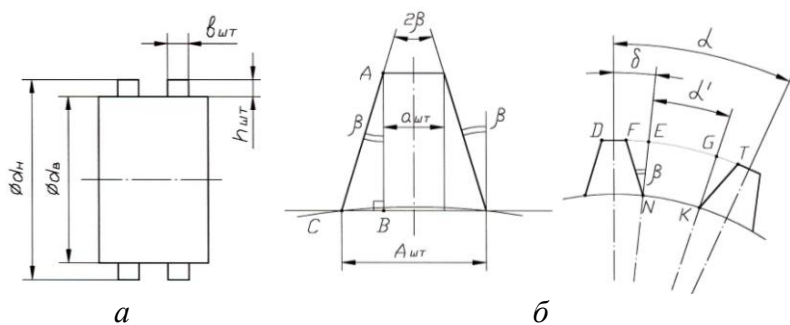
Рисунок 2 – Кинематическая схема привода высевальных аппаратов

На основании анализа современных высевальных аппаратов сеялок для лесных питомников был выбран штифтовый высевальный аппарат для посева мелких семян хвойных пород и проведены аналитические исследования процесса его работы (патент на полезную модель РФ № 62767). В результате анализа кинематических параметров привода новых высевальных аппаратов (рис. 2) получены зависимости для определения основных режимов их работы:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{ва} &= \frac{\omega_6}{I_{о6}} = \frac{V_{агр}(1-\xi)Z_1Z_3Z_5}{\left(\frac{D_6}{2} - h_6\right)Z_2Z_4Z_6} \\ n_{ва} &= \frac{30V_{агр}(1-\xi)Z_1Z_3Z_5}{\pi\left(\frac{D_6}{2} - h_6\right)Z_2Z_4Z_6} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\omega_{ва}$ и $n_{ва}$ – угловая скорость и частота вращения вала высевальных аппаратов, c^{-2} и $мин^{-1}$; ω_6 – угловая скорость вращения бороздообразователя, c^{-2} ; $V_{агр}$ – скорость движения агрегата, м/с;

$I_{о6}$ – общее передаточное отношение привода; ξ – коэффициент проскальзывания бороздообразователя, установленный экспериментально; Z_1-Z_6 – количество зубьев звездочек привода, шт.; D_6 и h_6 – наружный диаметр и глубина хода бороздообразователя, м.



a и b – основные конструктивные параметры катушки и штифтов высевального аппарата, соответственно; d_H и d_R – наружный и внутренний диаметр катушки высевального аппарата, м; $v_{шт}$ и $a_{шт}$ – ширина и толщина штифта, м; $A_{шт}$ и $h_{шт}$ – толщина у основания и высота штифта, м; α – угол между соседними штифтами, град; 2β – угол конуса штифта, град

Рисунок 3 – Схема для определения параметров штифтового высевального аппарата

На рисунке 3 приведена схема для определения рациональных параметров штифтового высевального аппарата.

В результате проведенных исследований получены зависимости для определения нормы высева и количества высеваемых семян в зависимости от конструктивно-технологических параметров новой сеялки:

– для определения нормы высева семян, кг/га:

$$Q = \frac{5m_0i_c(1-\xi)i_{pвшт}k_3}{I_0\alpha'(D_6-2h_6)A(i_c-1)} \left[(d_H^2 - d_B^2) \frac{\alpha'}{2} + \frac{1}{4} h_{шт}^2 tg\beta \right], \quad (5)$$

– для определения поштучного высева семян, шт./га:

$$Q_{шт} = \frac{i_c(1-\xi)i_{pвшт}k_3m}{200I_0\alpha'(D_6-2h_6)A(i_c-1)} \left[(d_H^2 - d_B^2) \frac{\alpha'}{2} + \frac{1}{4} h_{шт}^2 tg\beta \right], \quad (6)$$

где m_0 – объемная масса семян хвойных пород $кг/м^3$; i_c – количество высевальных аппаратов на сеялке, шт.; i_p – количество рядов штифтов на высевальном аппарате, шт.; $v_{шт}$ – ширина штифта, м; m – масса тысячи штук семян, кг; k_3 – коэффициент заполнения объема между соседними штифтами ($k_3 \leq 1$); A – ширина междурядий, м; α' – центральный угол

между основаниями штифтов, град; β – угол наклона боковой поверхности штифта, град.

Важным показателем посева семян является неравномерность подачи P семян в посевную бороздку. При постоянных параметрах штифтов высевальных аппаратов (см. рис. 3) получена формула для определения P :

$$P = \frac{a_{шт} \square_{шт} + \square_{шт}^2 \operatorname{tg} \beta}{\left[\frac{1}{8} (d_H^2 - d_B^2) \alpha' + h_{шт}^2 \operatorname{tg} \beta \right] k_3} \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что неравномерность подачи семян возрастает с увеличением размеров штифтов, следовательно, размеры штифта необходимо принимать с учетом его прочности. При многорядном размещении штифтов на катушке их необходимо располагать со смещенными рядами.

В процессе посева семян важное значение для их всхожести имеет плотность почвы в посевных бороздках. На рисунке 4, а представлена схема предлагаемого ме-

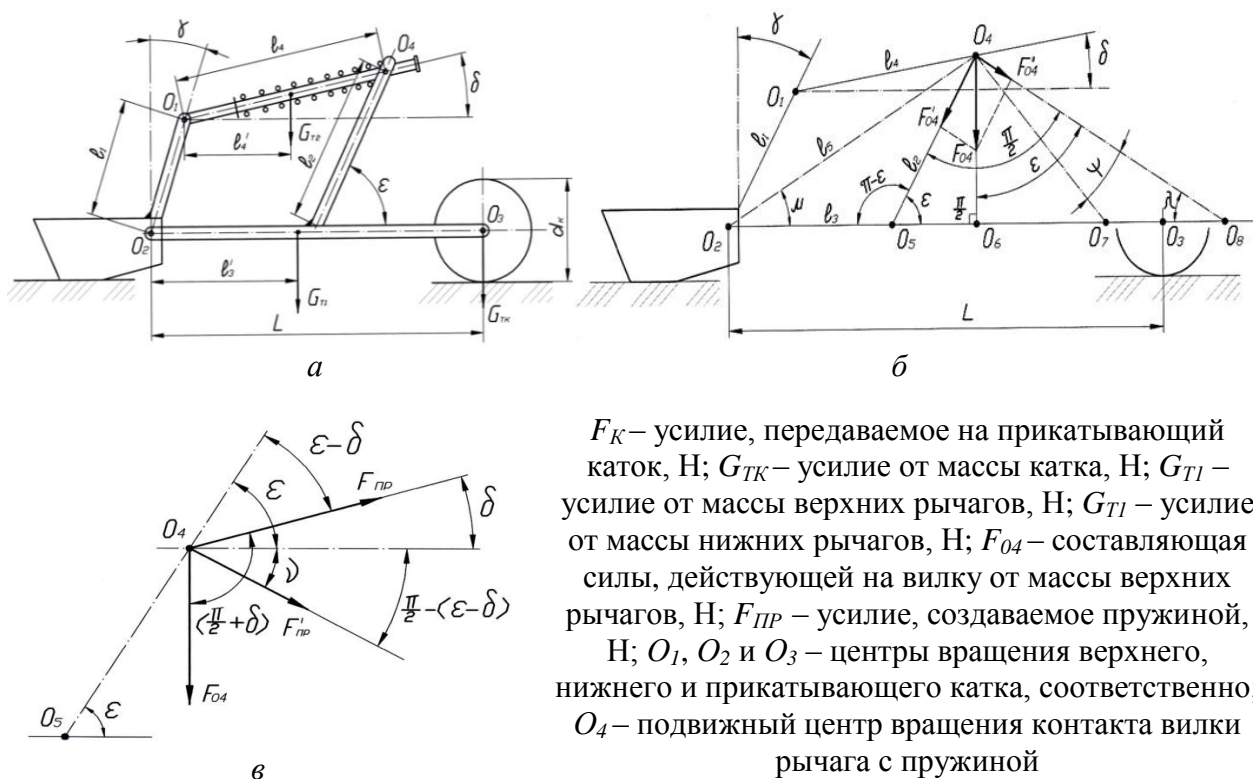


Рисунок 4 – Схемы нового механизма подвески а и сил б, в, действующих на прикатывающий каток

ханизма подвески прикатывающего катка, выполненного в соответствии с патентом РФ № 2020131862, в которой углы наклонов его рычагов приняты из конструктивных соображений: $\gamma = 15^\circ$, $\delta = 4^\circ$, $\epsilon = 60^\circ$. С целью установления силы F_K , действующей на прикатывающий каток и обеспечивающей рекомендуемую плотность почвы в зоне заделки семян, рассмотрены силы, возникающие в механизме его подвески (см. рис. 4, б и рис. 4, в).

Усилие F_K , действующее на прикатывающий каток, определится как, Н:

$$F_K = G_{TK} + G_{T1} + G_{T2} + F_{PP}'' \quad (8)$$

Усилие G_{TK} , создаваемое массой прикатывающего катка, Н:

$$G_{TK} = m_K g, \quad (9)$$

где m_K – масса прикатывающего катка, кг; g – ускорение центра тяжести катка, м/с^2 .

Усилие G_{T1} , создаваемое массой верхних рычагов, Н:

$$G_{T1} = m_H g \frac{l'_3}{L}, \quad (10)$$

где m_H – масса рычагов, м.

Усилие G_{T2} , создаваемое массой нижних рычагов, Н:

$$G_{T2} = m_B g \frac{l'_4 l'_5}{l_4 L} \cos \varepsilon \cos \phi. \quad (11)$$

Усилие $F''_{\text{ПР}}$ в выражении (8), создаваемое пружиной, после ряда преобразований и подстановок определится из выражения, Н:

$$F''_{\text{ПР}} = F_{\text{ПР}} \sin(\varepsilon - \delta) \cos \varepsilon \cos \phi \frac{l'_5}{L}. \quad (12)$$

Сила $F_{\text{ПР}}$, действующая на прикатывающий каток, за счет сжатия пружины, Н:

$$F_{\text{ПР}} = \frac{[F'_K - (G_{TK} + G_{T1} + G_{T2})]L}{\sin(\varepsilon - \delta) \cos \varepsilon \cos(\varepsilon - \mu) l'_5}, \quad (13)$$

где F'_K – усилие, действующее на прикатывающий каток, при котором обеспечивается необходимое уплотнение почвы, Н.

Для определения нагрузки на каток F'_K , обеспечивающей оптимальную плотность почвы в посевной бороздке, получено следующее выражение, Н:

$$F'_K = \frac{2}{3} q_o b_o h_k \sqrt{d_k h_k^3}, \quad (14)$$

где q_o – удельное давление на опорной поверхности катка, Н/м²; b_o – ширина прикатывающего катка, м; d_k – диаметр прикатывающего катка, м; h_k – глубина колеи, образуемой катком, м.

Аналитические зависимости процесса взаимодействия прикатывающего катка с почвой позволяют определить необходимые его параметры и усилие прижатия его к почве, обеспечивающее заданную плотность почвы в посевной бороздке и обосновать основные параметры подвески прикатывающего катка.

Для агротехнического ухода за сеянцами в культиваторе ККП-1,5А использована конструкция рабочего органа в виде рыхлительно-подрезающей лапы и проведен анализ сил, действующих на нее. В результате получена формула для определения силы тягового сопротивления R_{Σ} рыхлительно-подрезающей лапы, Н:

$$R_{\Sigma} = k_l s_c h_2 \sec \alpha_l (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_T)^{1/2}, \quad (15)$$

где k_l – коэффициент удельного сопротивления почвы, Н/м²; s_c – толщина стойки лапы, м; h_2 – глубина обработки почвы, м; α_l – угол наклона рабочей части рыхлительно-подрезающей лапы, град; φ_T – угол трения почвы по стали, град.

Устойчивую и стабильную глубину рыхления почвы при агротехническом уходе, можно обеспечить путем выбора рациональной геометрии и параметров рыхлительно-подрезающей лапы. На основании аналитических исследований получена формула для расчета общего тягового сопротивления культиватора при агротехническом уходе в лесных питомниках, Н:

$$R_x^{\text{общ}} = k_l [s_c h_2 + 0,25(B_l - s_c)^2 \sin(\gamma_n - \gamma_{n1}) \sec \gamma_n \sec \gamma_{n1}], \quad (16)$$

где B_l – ширина захвата крыловидных ножей, м; γ_n и γ_{n1} – углы установки крыловидных ножей, град.

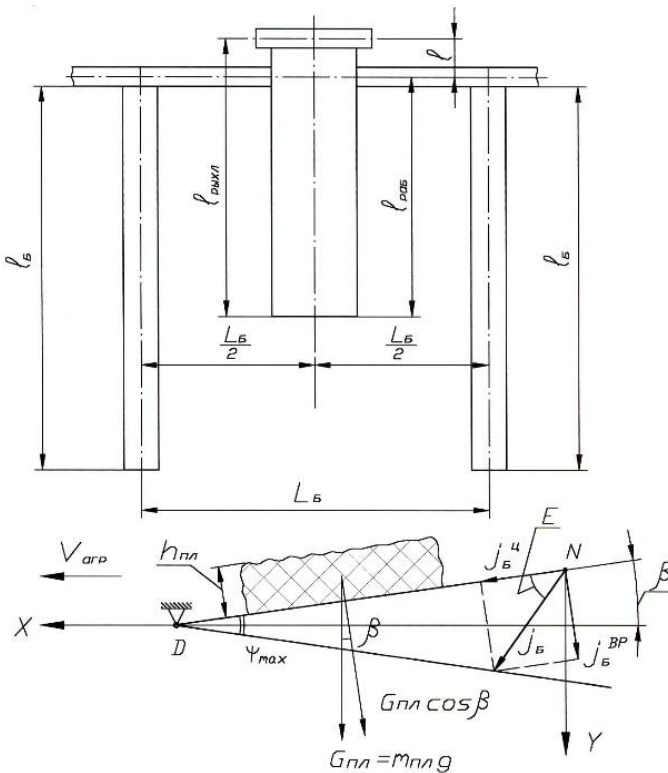


Рисунок 5 – Схема расположения почвенного пласта на рабочих органах выкопчной машины

L_B – расстояние между билами, м; l_B – длина била, м; $l_{РАБ}$ – рабочая длина планок ($l_{РАБ} = l_{РЫХЛ} - l$), м; $l_{РЫХЛ}$ – общая длина планок, м; $h_{ПЛ}$ – высота почвенного пласта, м; l – расстояние между центрами вращения бил и планок, м; $G_{ПЛ}$ – усилие, создаваемое массой пласта, Н

Окончательно получим выражение для определения напряжения изгиба почвенного пласта, обеспечивающее гарантированное его разрушение, при следующем условии, Па:

$$\sigma_{и}^{дин} \max = 0,375 g \sigma_{П} \lambda_{к} k_{Б} (l_{РЫХЛ} - l) \left[\cos(\psi_p^{max} + \beta) + \cos(\psi_{max} - \beta) \right] \left. \vphantom{\sigma_{и}^{дин} \max} \right\} \sigma_{и}^{дин} \max \geq [\sigma_{и}] \quad (19)$$

где k_B – коэффициент кинематического режима рабочих органов для бил; $[\sigma_{и}]$ – предельное значение напряжения изгиба, Па.

На интенсивность процесса рыхления почвенного пласта и отряхивания почвы от корневых систем семян значительное влияние оказывают режимы работы выкопчной машины и свойства почвы.

В третьей главе «Математическое моделирование процесса засыпки посевной бороздки почвой» приведено описание движения элементов почвы, определены параметры модели и особенности решения дифференциальных уравнений, выполнена программная реализация модели и получены результаты компьютерного эксперимента, построен план теоретического исследования, определено влияние на процесс засыпания бороздки почвой основных оптимизированных параметров загортачей сеялки СЛН-5А.

Сила сопротивления культиватора при агротехническом уходе в лесных питомниках зависит от типа почвы и ее удельного сопротивления, ширины захвата и глубины обработки почвы, а также от параметров рабочих органов.

Анализ состояния почвенного пласта на рабочих органах выкопчной машины МВ-1,3А (рис. 5) показывает, что его деформация происходит под действием изгибающего момента, максимальное значение которого определяется следующим выражением, Н·м:

$$M_{max} = \frac{g h_{ПЛ}}{32} \rho_{П} L_B^2 (l_{РЫХЛ} - l), \quad (17)$$

где $\rho_{П}$ – средняя плотность почвы, кг/см³.

Средний динамический изгибающий момент, действующий на почвенный пласт, составляет, Н·м:

$$M_{СН}^{дин} = \frac{h_{ПЛ} \rho_{П}}{64} \lambda_{к} j_{Y} (l_{РЫХЛ} - l) L_B^2 \times [\cos(\psi_p + \beta) + \cos(\psi - \beta)], \quad (18)$$

где $\lambda_{к}$ – константа, учитывающая конструктивные параметры механизма привода планок; j_Y – вертикальная проекция полного ускорения, м/с²; β – угол между

горизонталью и рабочей поверхностью планки (рыхлителя), град; ψ – угол отклонения планки от нулевого положения, град; ψ_p – текущее значение угла отклонения планки от ее исходного положения (при $\beta_p = \beta$), град.

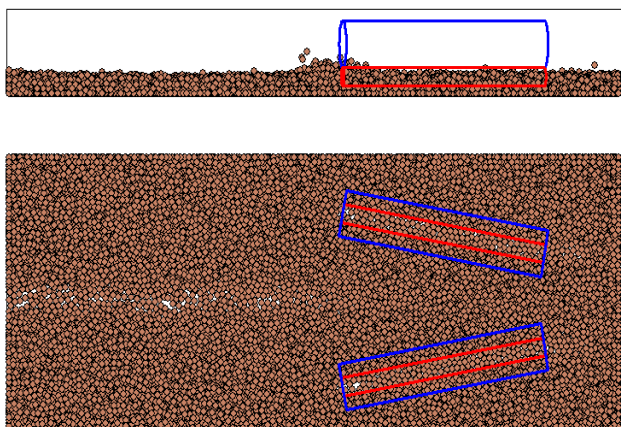


Рисунок 6 – Представление в модели почвы и загортача

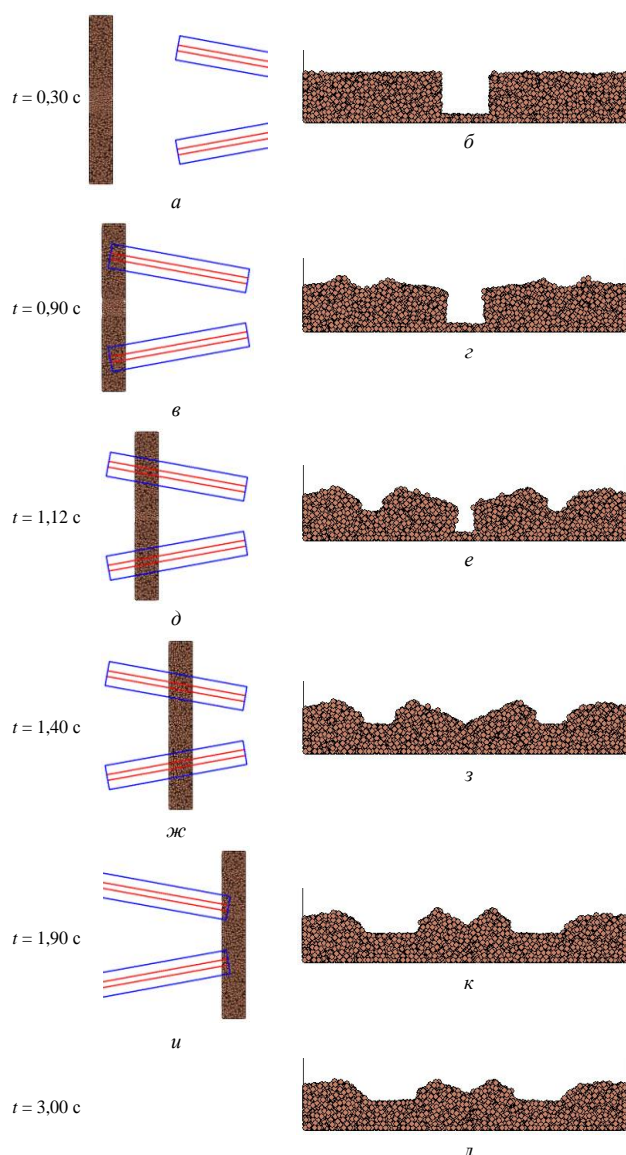


Рисунок 7 – Движение загортача в процессе базового компьютерного эксперимента относительно фрагмента почвы (а, в, д, ж, и) и соответствующие профили посевной бороздки (б, г, е, з, к, л)

Одним из недостатков существующих конструкций сеялок для лесных питомников является несовершенство устройств, предназначенных для заделки семян почвой. Поэтому усовершенствование конструктивно-технологических параметров загортачей, путем моделирования процесса их работы, представляет интерес при проектировании новых лесных сеялок. В связи с этим, поставлена задача разработать математическую модель процесса заделки посевной бороздки почвой, обладающую высокой физической адекватностью, пространственным и временным разрешением (рис. 6).

Для моделирования механического поведения почвы под воздействием загортача использовался метод динамики частиц. В модели учитывается, что между соседними элементами почвы могут возникать, как силы отталкивания при их внедрении друг в друга, так и силы притяжения, при отдалении сцепленных элементов почвы друг от друга.

Разработанная математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений. Для ее анализа разработана компьютерная программа «Программа для моделирования заделки семян» на языке ObjectPascal в среде программирования BorlandDelphi 7.0.

При проведении компьютерных экспериментов эта программа позволяет выводить на экран компьютера три проекции фрагмента почвы, две проекции загортача и показатели эффективности процесса. Программа также применима для различных типов почвы и сохраняет работоспособность при изменении параметров загортача в широких пределах, а также позволяет определить его оптимальные конструктивно-технологические параметры.

Для проверки работоспособности математической модели и ее оценки был проведен базовый компьютерный эксперимент с определенными параметрами загортача и типом почвы. В процессе

проведения эксперимента загортач двигался по поверхности почвы, взаимодействуя с ее верхним слоем (рис. 7). В процессе исследований был использован фрагмент почвы длиной около 20 мм вдоль направления движения загортача и с учетом выполняемого технологического процесса. Фрагмент почвы принят шириной 150 мм и высотой 25 мм и представляет собой сечение, в котором можно исследовать процесс перемещения почвы загортачом при заделке посевной бороздки.

Перед началом проведения исследований в фрагменте почвы была подготовлена посевная бороздка сечением 20 × 20 мм (рис. 7, б). Следует отметить, что при взаимодействии загортача с почвой края бороздки смещаются навстречу друг другу (рис. 7, з).

При заделке посевной бороздки загортач сдвигает объем почвы в виде близкой к прямоугольной форме (рис. 7, е и рис. 7, з). В процессе работы загортача посевная бороздка заполняется почвой с формированием «горки» (рис. 7, к), которая частично осыпается в соответствии с ее физическими свойствами (рис. 7, л).

Теоретическое исследование модели проводили в соответствии со следующей схемой входных и выходных параметров (рис. 8). Варьировали следующими параметрами

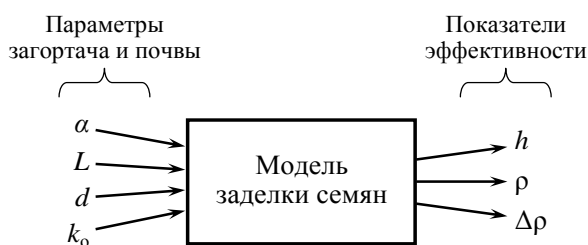


Рисунок 8 – Постановка задачи на теоретическое исследование

загортача и почвы: α – угол между направляющими загортача; L – рабочая длина направляющих загортача; d – диаметр прутков загортача; k_0 – коэффициент пределов взаимодействия между принимаемыми шарообразными элементами почвы, определяющий ее связность и позволяющий воспроизводить в модели различные типы почв; ρ – средняя плотность почвы в бороздке.

При проведении компьютерных экспериментов определяли следующие показатели эффективности работы загортача: h – высота засыпания бороздки. Отрицательные значения h означают, что бороздка не полностью засыпана. Если бороздка засыпана недостаточно качественно, плотность почвы оказывается ниже первоначальной плотности почвы (принята 1 г/см³). Если загортач оказывает значительное уплотняющее действие, то плотность ρ в бороздке может быть более 1 г/см³. Неоднородность плотности почвы $\Delta\rho$ определяется путем деления сечения бороздки на девять квадратных фрагментов (3 × 3) и подсчета плотности почвы в каждом ее фрагменте, определения разности между максимальной и минимальной плотностью $\Delta\rho = \rho_{max} - \rho_{min}$.

При теоретическом исследовании процесса принята «звездообразная» схема, согласно которой параметры изменяются поочередно относительно базового их набора и априори предлагаемых следующими: $\alpha = 20^\circ$, $L = 120$ мм, $d = 5$ мм, $k_0 = 1,003$.

В результате исследования влияния отдельных параметров загортача на его эффективность установлено, что наибольшую практическую значимость имело бы изучение влияния изменения нескольких параметров. С этой целью целесообразно проведение двухфакторной оптимизации параметров загортача: длины направляющих L и угла α между ними.

Эту задачу оптимизации параметров загортача выразим в следующем виде:

$$\begin{cases} h(L, \alpha) \rightarrow 0 \text{ мм;} \\ \rho(L, \alpha) \rightarrow 1 \text{ г/см}^3; \Rightarrow L_{\text{опт}}, \alpha_{\text{опт}}. \\ \Delta\rho(L, \alpha) \rightarrow 0. \end{cases} \quad (20)$$

Для определения связи между параметрами оптимизации L , α и критериями оп-

тимизации h , ρ , $\Delta\rho$ были проведены 16 компьютерных экспериментов, в которых изменяли длину направляющих L в следующих величинах: 80, 100, 120, 140 мм и углах между направляющими загортача α : 10, 20, 30, 40°.

Для функций $h(L, \alpha)$, $\rho(L, \alpha)$, $\Delta\rho(L, \alpha)$ получены выражения в виде полиномов второго порядка. При проведении анализа графики функций $h(L, \alpha)$, $\rho(L, \alpha)$, $\Delta\rho(L, \alpha)$ приведены в виде картограмм, представляющих собой набор линий на плоскости факторного пространства (L, α) .

Для определения высоты засыпания бороздки h в качестве благоприятного параметра выбраны пределы изменения от -2 до $+2$ мм относительно исходного уровня поч-

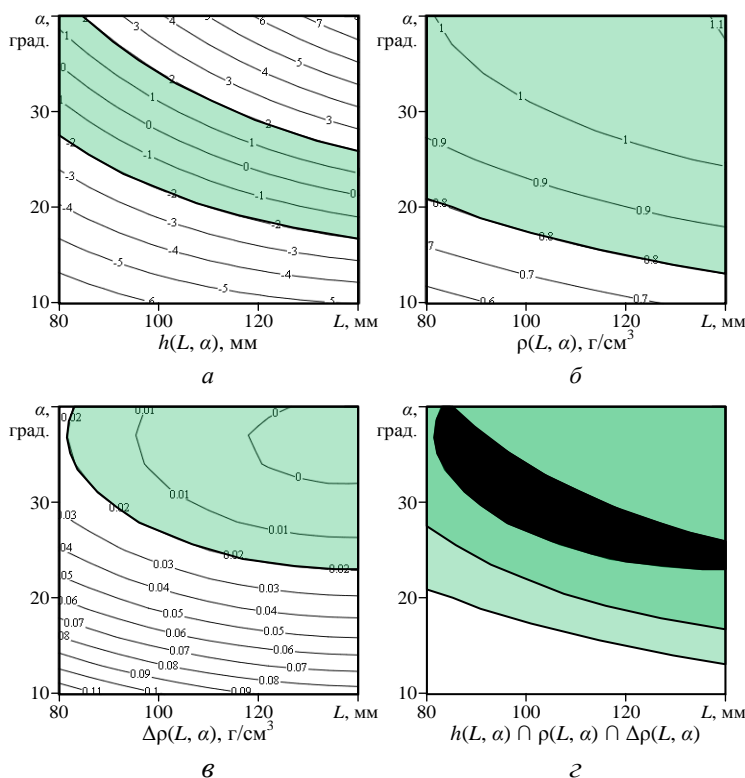


Рисунок 9 – Картограммы оптимизации параметров направляющих загортача L и α (затемнены благоприятные области факторного пространства и черным цветом выделена общая оптимальная область)

равляющих загортача высота засыпания бороздки h будет около 1 мм над исходным уровнем почвы и плотность почвы в посевной бороздке составит около $1,01 \text{ г/см}^3$, а неоднородность плотности почвы находится в пределах $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$.

Глава четвертая «Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния почвы при ее взаимодействии с рабочими органами выкопчной машины» включает: постановку задачи исследования, рассмотрение реологии почвы, определение реологических уравнений, установление реологических коэффициентов, начальных и граничных условий, описание метода исследования математической модели напряженно-деформированного состояния слоя грунта, входные расчетные параметры математической модели, результаты моделирования напряженно-деформированного состояния грунта при движении рабочих органов выкопчной машины МВ-1,3А.

Предложенная математическая модель построена при следующих основных предположениях. Материал грунта принимается как не сжимаемая гомогенная сплошная

вы (рис. 9, а) при изменении плотности почвы ρ от $0,8$ до $1,2 \text{ г/см}^3$ (рис. 9, б) и при $\Delta\rho$ – менее $0,02 \text{ г/см}^3$ (рис. 9, в). Для одновременного учета влияния всех трех критериев оптимизации на рисунке 9, з найдено пересечение наиболее благоприятных областей. Затемненный фрагмент представляет собой область, в которой все критерии h , ρ , $\Delta\rho$ имеют необходимые значения. Оптимальная область является достаточно протяженной, что свидетельствует о высокой стабильности работы загортача при изменении внешних факторов.

В качестве оптимальных параметров загортача L и α рекомендуется любая точка из затемненного фрагмента картограммы, в частности, точка $L = 120 \text{ мм}$, $\alpha = 28^\circ$, наиболее близкая к верхней границе оптимальной области, при которой над канавкой формируется почва высотой от 1 до 2 мм. При таких параметрах на-

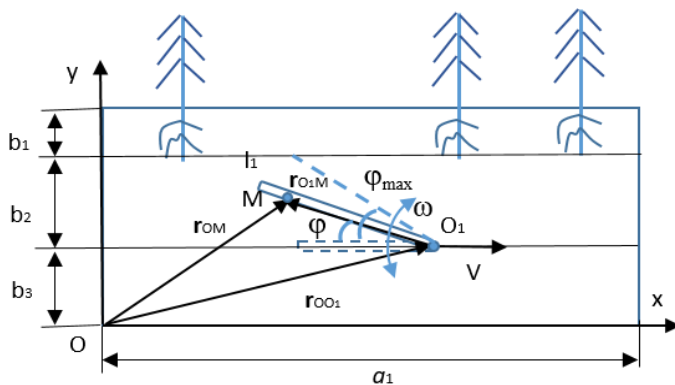


Рисунок 10 – Расчётная схема почвенного фрагмента

из конструктивных соображений, с учетом особенностей выполняемого технологического процесса, и для планок составляет $l_1 = 450$ мм и бил $l_1 = 300$ мм. Ширина фрагмента почвы a_1 принята ориентировочно равной примерно $5l_1$. В зоне боковых границ слоя почвы ее деформация предполагается не значительной.

Уравнения математической модели в неподвижной системе координат OXY (см. рис. 10) запишем в следующем виде:

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y}, \quad \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} - \rho g, \quad (21)$$

где ρ – плотность почвы, кг/м^3 ; u_x, u_y – компоненты вектора перемещения частиц почвы, м; x, y – координаты, м; t – время, с; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; σ_{ij} ($i, j = x, y$) – компоненты тензора напряжений, Па.

В случае конечных деформаций связь между компонентами тензора деформаций и вектора движения частиц почвы, представим в следующем виде:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (22)$$

Для замыкания уравнений (21) и (22) воспользуемся реологическим уравнением, связывающим тензоры напряжений и деформаций почвы. Выполнены оценки, согласно которым время релаксации напряжений почвы существенно больше, чем длительность отдельного прохода планки или билы. Поэтому в рассматриваемых условиях можно исследовать динамику изменения напряженно-деформированного состояния почвы без учета эффектов механической памяти, которые практически не успевают проявиться в изучаемом процессе интенсивного деформирования поверхностного слоя почвы. Для описания реологии почвы выбрано уравнение состояния Рамберга-Осгуда, не зависящее от временного фактора, но описывающее упругопластическое поведение данной ненасыщенной дисперсной системы.

Для одноосного напряженно-деформированного состояния модель Рамберга-Осгуда имеет следующий вид:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E}, \sigma \leq \sigma_T \\ \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_0 \left[\frac{\sigma}{\sigma_T} \right]^n, \sigma > \sigma_T \end{cases}, \quad (23)$$

где ε – деформация, м; σ – напряжение, Па; E – модуль упругости, Па; σ_T – условный предел текучести, Па; ε_0 и n – константы материала.

Для изучения сложного напряженно-деформированного состояния материала модель Рамберга-Осгуда записана в инвариантной форме:

среда. По реологическим свойствам грунт является нелинейно-упругопластическим. Взаимное влияние планок и бил на деформацию почвы не учитывается. Напряженное состояние грунта рассматривается в рамках плоской задачи.

На рисунке 10 представлена расчётная схема почвенного фрагмента для формирования математической модели поведения грунта при воздействии на него планок и бил. Рабочая длина планок и бил принята

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E}, F_T(I_1, I_2, I_3) \leq 0; \\ \frac{\sigma}{E} + \frac{\varepsilon_0}{\sigma_T} \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{2}tr\sigma^2}}{\sigma_T} \right]^{n-1}, F_T(I_1, I_2, I_3) > 0, \end{cases} \quad (24)$$

где σ_T – предел текучести, Па; E – модуль упругости, Па; n и ε_0 – константы материала; I_1, I_2, I_3 – инварианты тензора напряжений; ε – тензор деформаций, м; σ – тензор напряжений, Па.

Неравенство $F_T(I_1, I_2, I_3) > 0$ позволяет установить условие текучести материала.

В процессе работы выкопчной машины в почве возникает пластическая деформация с образованием зон разрушения. Показателем зоны разрушения почвы рекомендуется принять критерий Друккера-Прагера, используемый при оценке состояния строительных материалов и при изучении прочности различных материалов. С учетом этого уравнение Друккера-Прагера запишем в следующем виде:

$$F_T = J_2 - B \cdot I_1 - A, \quad (25)$$

$$\text{здесь } A = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_p \sigma_c}{\sigma_p + \sigma_c}, \quad B = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_p - \sigma_c}{\sigma_p + \sigma_c}, \quad J_2 = \sqrt{\frac{1}{2}tr\tau^2},$$

где I_1 – первый инвариант тензора напряжений, МПа; $\frac{1}{2}tr\tau^2$ – второй инвариант девиатора тензора напряжений τ , МПа; σ_c и σ_p – пределы прочности материала на сжатие и растяжение, МПа. Предполагая при этом, что при $B = 0$ функция текучести Друккера-Прагера переходит в функцию Хубера-Мизеса.

Реологическое уравнение содержит четыре реологических константы – модуль упругости E , предел текучести σ_T , параметры ε_0 и n . Эти константы определяются на основании известных экспериментальных работ по реологии почв.

Граничные условия представляются двумя типами: на границах фрагмента почвы и на поверхностях контакта планок и бил с почвой. На границах выделенного фрагмента почвы имеются смешанные граничные условия. Верхняя граница (Γ) не имеет внешних нагрузок. На нижней и боковых границах принято, что грунт практически неподвижен:

$$\sigma \cdot \vec{n}|_{\Gamma} = 0, \quad \vec{u}|_{y=0} = 0, \quad \vec{u}|_{\substack{x=0 \\ x=a_1}} = 0, \quad (26)$$

где \vec{n} – вектор единичной внешней нормали.

На внутренних подвижных границах, совпадающих с границами движущегося тела планки или билы, выполнены условия прилипания:

$$v_x = V - \omega(y - b_3); v_y = \omega(x - Vt), \quad (27)$$

где ω – угловая скорость рабочего органа, с⁻¹; V – линейная скорость поступательного движения машины, м/с.

В качестве начального условия принято следующее:

$$\vec{u} = 0. \quad (28)$$

Сформулированная математическая модель (21), (22), (24) ... (28) для описания процесса деформирования слоя почвы при его взаимодействии с планками и биллами машины выкопчной представляет собой нелинейную двумерную начально-краевую задачу для объема среды со свободной границей, в которой также имеются внутренние подвижные границы.

Анализ сформулированной математической модели проведен с использованием метода конечных элементов на основе программного пакета COMSOL Multiphysics 5.3a. Результаты расчетов разрыхления почвы представлены на рисунке 11 для двух

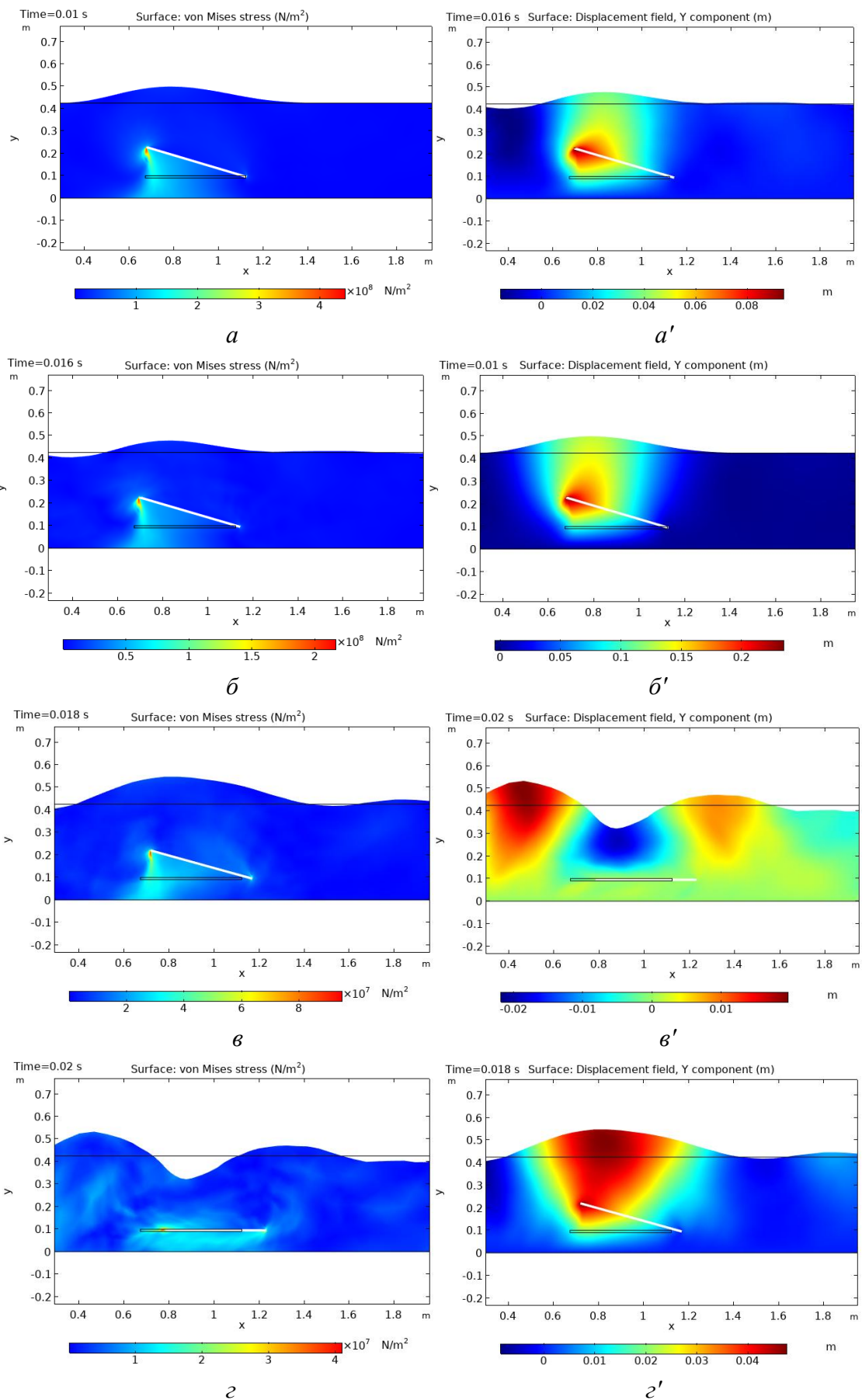


Рисунок 11 – Распределение интенсивности напряжения по Мизесу J_2 , Па (a-г) и вертикального перемещения v , м (a'-г') в слое почвы для различных моментов времени t , с: 0,01 (a-a'); 0,016 (б-б'); 0,018 (в-в'); 0,02 (г-г'). Время одного полного цикла движения планки 0,02 с.

основных параметров – усредненной величины вертикального перемещения v_{cp} и усредненного значения интенсивности напряжений по Мизесу J_2_{cp} . В рамках анализируемой математической модели они характеризуют интенсивность рыхления почвы.

Рисунок 11 иллюстрирует динамику распределения по объему почвенного фрагмента интенсивности напряжений по Мизесу и вертикального перемещения при $l_1 = 0,45$ м, $V = 1$ м/с, $\omega = 8,33$ с⁻¹. Величина интенсивности напряжений по Мизесу J_2 , определяемая через 2-ой инвариант девиатора тензора напряжений $J_2 = (1/2 \text{tr} \tau^2)^{1/2}$, используется при формировании критериев разрушения. Повреждения локализуются в тех зонах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. Как видно из рисунка 11, *a-z*, наибольшая интенсивность напряжений наблюдается в окрестности точек планки, наиболее удаленных от центра вала O_1 в момент времени, соответствующий половине периода колебаний планки, когда она занимает верхнее положение. При этом область почвенного домена, которая не контактировала с рабочим органом, первоначально в течение примерно $3/4$ первого периода колебаний перемещается как твердое недеформируемое тело, благодаря наличию свободной поверхности, не препятствующей перемещениям почвы. Вертикальные смещения почвы, связанные с движением планки, приводят к формированию «горбов» на поверхности почвы, при росте значений вертикального перемещения, и «впадин», когда происходит уменьшение компоненты v с переходом к отрицательным значениям (рис. 11, *a'-z'*).

На рисунке 12 изображена схема расположения сечений почвенного фрагмента, по длине которых проведено усреднение расчетных параметров модели, а на рисунке 13 представлены зависимости от времени вертикального перемещения частиц почвы, усредненного вдоль этих выбранных

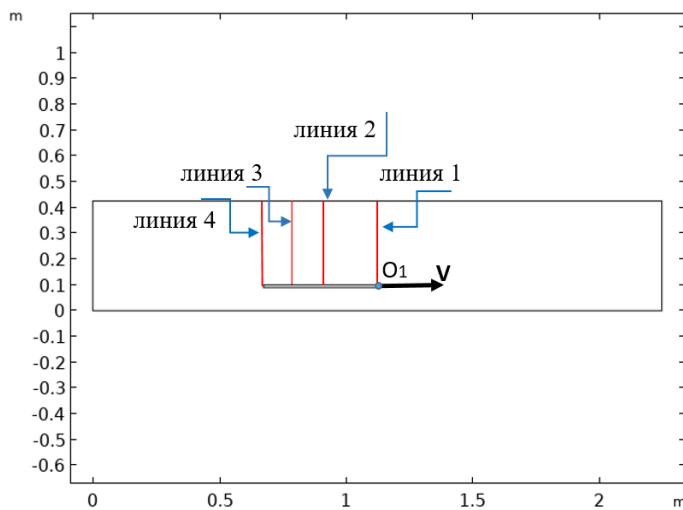


Рисунок 12 – Схема расположений сечений почвенного фрагмента, по длине которых проведено усреднение расчетных параметров модели

линий 1-4 с уравнениями $x = a_1/2$, $x = a_1/2 - l_1/2$, $x = a_1/2 - 3l_1/4$, $x = a_1/2 - l_1$ для различных значений угловой скорости вращения. Каждая серия кривых рисунка 14 построена для первого периода, который составляет 0,02 с для $\omega = 8,33$ с⁻¹, 0,025 с для $\omega = 6,67$ с⁻¹, 0,033 с для $\omega = 5$ с⁻¹ и 0,05 с для $\omega = 3,33$ с⁻¹. Амплитуда вертикального перемещения практически не зависит от угловой скорости билы или планки, что связано с отсутствием диссипативных и релаксационных эффектов при деформировании среды Рамберга-Осгуда.

Выполнены оценки, согласно которым влияние конечной скорости распространения упругих продольных волн имеет место для режима работы выкопчной машины с $\omega = 8,33$ с⁻¹, а поперечных волн для режимов с $\omega > 3,33$ с⁻¹.

Таким образом, при высокочастотных режимах работы машины следует ожидать проявление негладкого характера зависимостей для основных переменных от времени.

На рисунке 14 показаны кривые изменения напряжения по Мизесу, полученные при усреднении в разных зонах фрагмента почвы. Частота колебания планки или билы практически не влияет на амплитуду колебаний величины J_2_{cp} в данном вертикальном сечении, однако в области деформирования самой удаленной от оси вала (линия 4) интенсивность

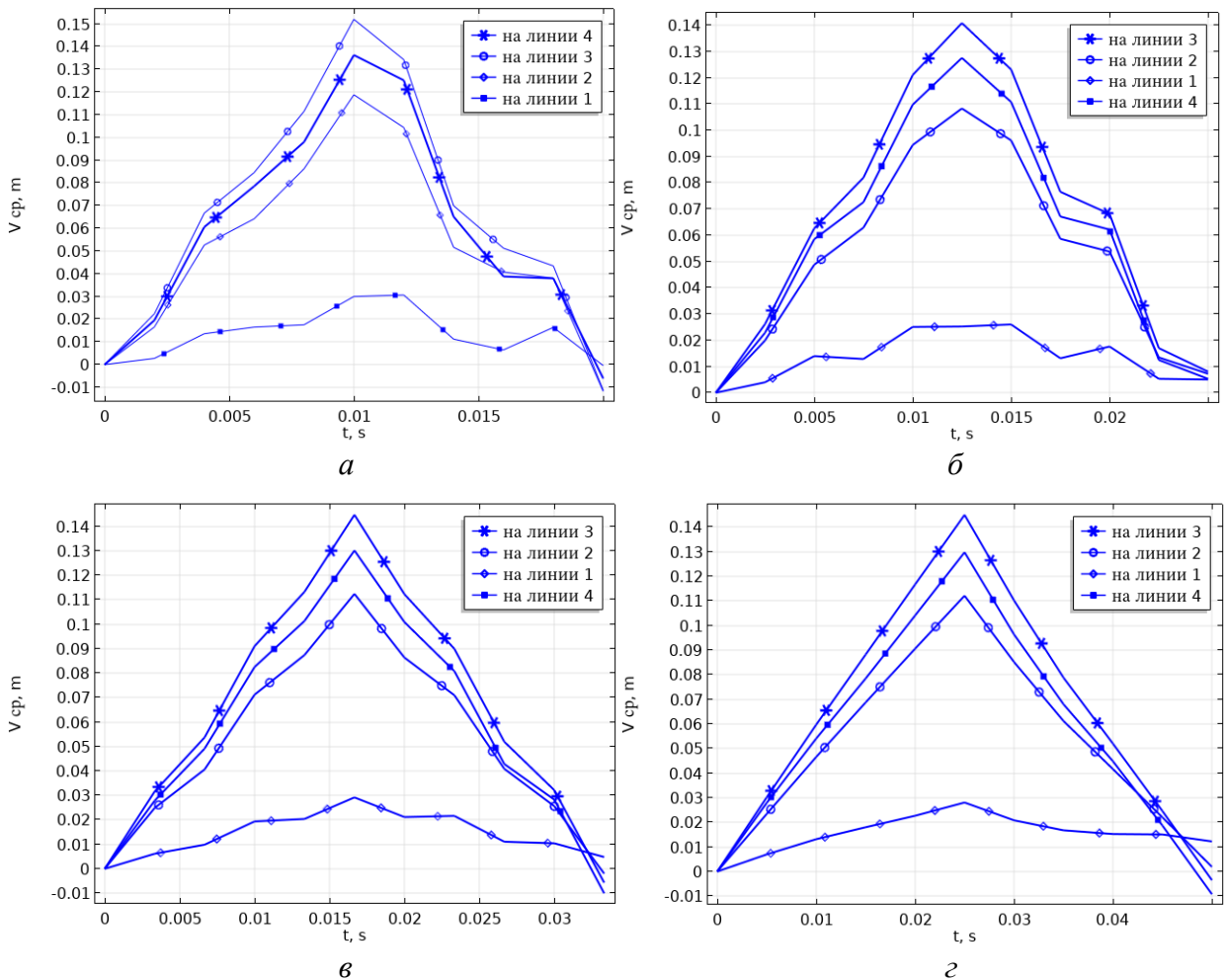


Рисунок 13 – Усредненные значения v_{cp} вертикального перемещения грунта в сечениях почвенного слоя, показанных на схеме рисунка 12, для $\omega, \text{с}^{-1}$:
 а – 8,33, б – 6,67, в – 5,00, г – 3,33

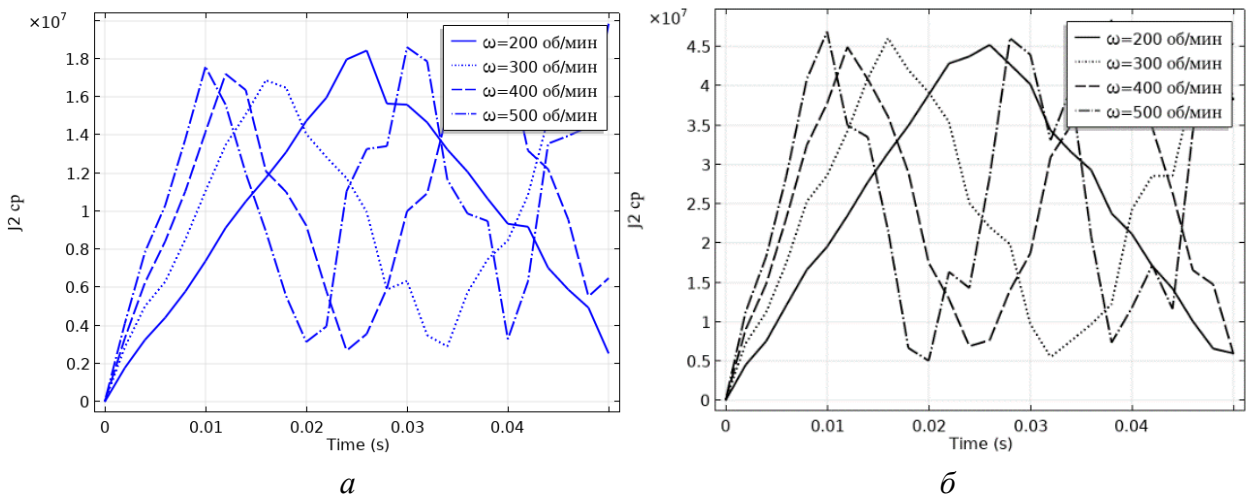


Рисунок 14 – Усредненные по высоте значения интенсивности напряжений по Мизесу J_{2cp} , Па от времени для различных значений частоты вращения вала рабочего органа ($\omega = 3,33 \div 8,33 \text{с}^{-1}$) для линии 2 – а, 4 – б (см. рис. 13)

напряжений по Мизесу в 2,5 раза выше, чем в зоне близкой к середине планки (линия 2).

Как видно из рисунка 15 такой конструктивный параметр, как максимальный угол поворота планки, оказывает существенное влияние на изучаемые параметры процесса работы выкопчной машины. Чем меньше φ_{max} , тем, очевидно, меньше период колеба-

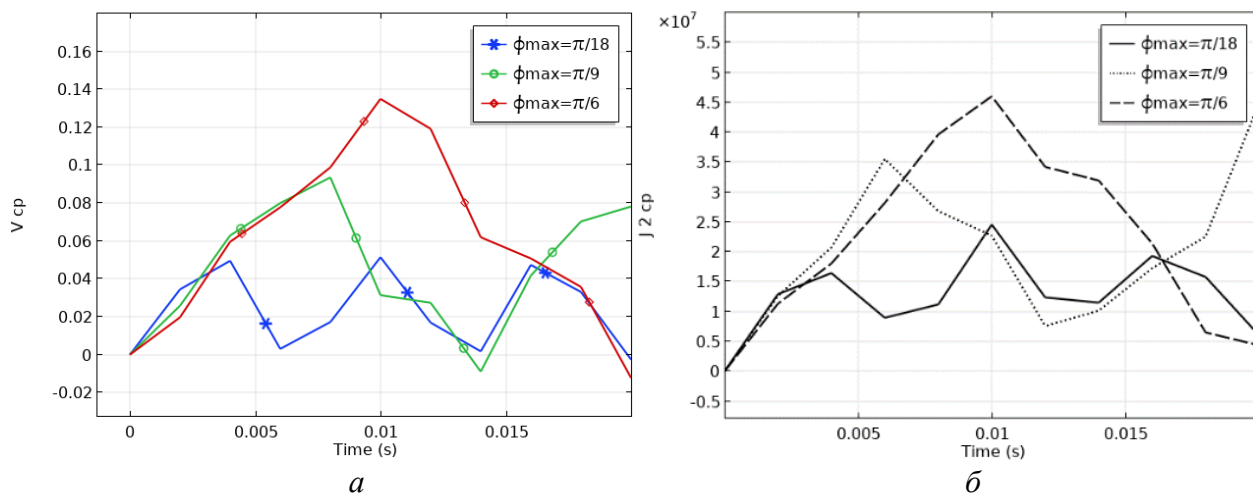


Рисунок 15 – Усредненные по высоте значения вертикального перемещения частиц V_{cp} , м – а и интенсивности напряжений по Мизесу J_{2cp} , Па – б от времени в сечении слоя почвы, показанного на схеме рисунка 14 как линия 4, для различных значений угла поворота планки $\varphi_{max} = \pi/18 \div \pi/6$ рад, при $\omega = 8,33 \text{ с}^{-1}$

ний планки. Изменение максимального угла поворота от 30° до 10° приводит к уменьшению интенсивности напряжений по Мизесу примерно в 1,8 раза (на выделенной линии 4), а максимального среднего значения вертикального перемещения примерно в 3 раза.

Глава пятая «Экспериментальные исследования работы комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий в лесных питомниках» включают исследования: технологических свойств желудей, влияния параметров и режимов работы сеялки на показатели посева желудей, влияния частоты вращения штифтового высевающего аппарата на норму и равномерность посева семян ели, влияния параметров и режимов работы прикатывающего катка на плотность почвы в посевной бороздке, обоснованию параметров культиватора, влияния режимов работы выкопочной машины на качество выкопки посадочного материала, по усовершенствованию технологических операций выращивания укрупненных сеянцев ели без перешколивания.

Для определения технологических свойств желудей дуба черешчатого были обследованы их образцы и уточнены масса 1000 штук желудей и объемная их масса, угол естественного откоса и угол трения скольжения желудей по стали, длина и поперечный диаметр. Исследования процесса высева желудей проводили на экспериментальном образце сеялки для крупноплодных семян СКБ-3-5 при скорости подачи семян 0,12; 0,17; 0,19; 0,25 м/с, глубине ячеек равной 5; 7,5; 10; 12,5; 15 мм и скорости движения агрегата 0,28 м/с. С учетом поштучно-равномерного посева желудей в количестве 13-19 шт./пог.м и среднем расстоянии между ними в посевной бороздке 5,2-7,6 см, глубину ячейки высевающего аппарата рекомендуется принимать равной 5 мм при скорости его подачи в пределах от 0,12 до 0,19 м/с и скорости движения агрегата, равной 0,28 и 0,42 м/с. В результате обработки опытных данных предложена следующая эмпирическая зависимость для определения количества желудей N , высеваемых на один метр посевной бороздки, в зависимости от скорости движения агрегата V_T , скорости подачи высевающего аппарата $V_{Ц}$ и глубины ячейки h :

$$N = 15,132 - 36,047V_T + 6,3911V_{Ц} + 0,561778h. \quad (29)$$

Это уравнение адекватно описывает зависимость между исследуемыми параметрами, так как критерий Фишера равен 60,3, при $F_{табл}$ равном 4,72, т. е. $F_{расч} > F_{табл}$. Таким образом, установлено, что количество высеваемых желудей уменьшается с увеличением скорости движения агрегата и возрастает с увеличением скорости пода-

чи высевашего аппарата и глубины ячейки.

Исследование влияния глубины ячеек высевашего аппарата на равномерность и норму посева желудей, проводили при глубине ячеек высевашего аппарата 5,0, 7,5, 10,0, 12,5, и 15,0 мм и скорости движения агрегата 0,28 м/с. Анализ полученных опытных данных, показывает, что наиболее приемлемое количество 13-15 шт./пог.м, высеванных желудей и расстоянии между ними в посевной бороздке 6,5-7,5 см, получено при глубине ячеек в пределах от 5 до 10 мм и скорости подачи высевашего аппарата 0,12 м/с. В результате обработки экспериментальных данных получена следующая эмпирическая зависимость для определения расстояния L между посеянными желудями в посевной бороздке в зависимости от скорости движения агрегата V_T , скорости подачи высевашего аппарата $V_{Ц}$ и глубины ячейки h , см:

$$L = 6,61 + 13,4 V_T^2 - 0,44 V_{Ц}^2 - 0,01 h^2. \quad (30)$$

Это уравнение адекватно описывает зависимость между расстоянием L и режимами работы высевашего аппарата, так как критерий Фишера равен 19,797, а $F_{табл}$ равен 4,72, т. е. $F_{расч} > F_{табл}$. Установлено, что расстояние между посеянными желудями в посевной бороздке возрастает с увеличением скорости движения агрегата и уменьшается с увеличением скорости подачи высевашего аппарата и глубины ячейки.

Для определения агротехнических показателей посева семян ели, проведены исследования экспериментального образца сеялки лесной навесной СЛН-5А, при частоте вращения штифтовых высеваших аппаратов: 4,3; 7,0; 10,5 и 14,5 об/мин и поступательной скорости агрегата 0,28 м/с. При этом была выбрана более совершенная конструктивная схема и обоснованы параметры и режимы работы сеялки для равномерно-разреженного посева семян ели без их повреждения: частота вращения штифтового высевашего аппарата 7 об./мин и поступательная скорость агрегата 0,28 м/с.

Анализ влияния частоты вращения высеваших аппаратов на норму посева семян ели показывает, что норма посева семян ели с увеличением частоты от 4,3 до 14,5 об/мин увеличивается от 13,2 до 50,5 кг/га (от 0,4 до 1,55 г/пог.м). Результаты исследования влияния частоты вращения высевашего аппарата на равномерность посева семян ели показывают, что среднее количество посеянных семян ели изменяется в пределах от 81 до 300 шт./пог.м при изменении среднего расстояния между семенами от 12,3 до 3,3 мм.

Для обеспечения оптимальной плотности почвы (1-1,2 г/см³) в зоне заделки семян проводится ее уплотнение прикатывающими катками. С целью определения рациональных параметров прикатывающего катка проведены исследования влияния различных их параметров на плотность почвы в посевной бороздке. В процессе проведения этих исследований использовались катки с шириной обода 70, 80, 90 и 100 мм и с диаметром от 170 до 320 мм, с шагом через 50 мм, при действующей на них силе 30, 80, 130 и 180 Н. В результате обработки опытных данных предложены эмпирические формулы для определения плотности почвы в посевной бороздке в зависимости от действующей на каток силы F , диаметра катка D и ширины обода катка B , г/см³:

– на глубине до 3 см (для мелких семян хвойных пород)

$$\rho_1 = 0,837 + 0,0015F + 0,017D - 0,039B, \quad (31)$$

– на глубине до 9 см (для крупноплодных семян)

$$\rho_2 = 0,741 + 0,0043F + 0,0189D - 0,00047B. \quad (32)$$

На основе этих зависимостей разработана номограмма (рис. 16) для определения параметров и режимов работы прикатывающего катка сеялки СЛН-5А и оценки их влияния на плотность почвы в зоне заделки семян. Установлено, что рациональными конструктивно-технологическими параметрами прикатывающего катка являются: диа-

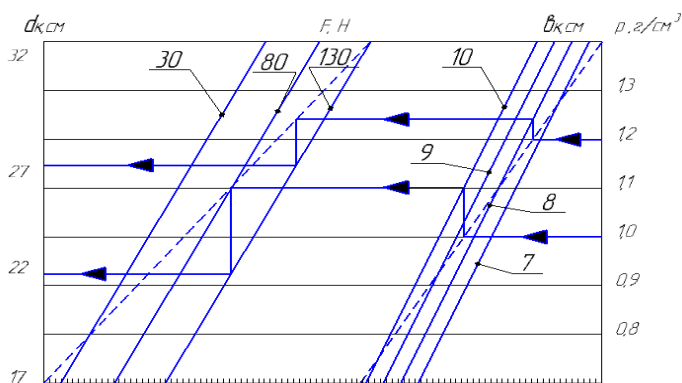


Рисунок 16 – Номограмма для определения усилия и параметров прикатывающего катка

метр катка 220 мм, ширина катка 70 мм и усилие прижатия катка к почве 80 Н.

С целью определения агротехнических показателей ухода за посадочным материалом, были проведены исследования экспериментального образца культиватора ККП-1,5А с различными сменными рабочими органами. Наиболее высокие показатели агротехнического ухода получены при использовании рыхлительно-подрезающих лап, которые обеспечивали высокую степень до 85,5 % уничтожения сорной растительности и

фракционный состав разрыхленной почвы размером до 50 мм достигал 90 %. Игольчатые диски обеспечивали хорошее разрушение почвенной корки и количество мелких (менее 10 мм) фракций почвы составило около 30 %, однако, степень уничтожения сорной растительности была несколько ниже, чем рыхлительно-подрезающими лапами, и составила 68,4 %. Долотообразные зубья обеспечивали большую глубину обработки почвы, средняя величина которой составила 6,3 см и был получен более крупный фракционный состав разрыхленной почвы с количеством фракций размером более 50 мм равном 19,4 %.

С целью определения рациональных параметров и режимов работы были проведены исследования экспериментального образца выкопочной машины МВ-1,3А при выкопке укрупненных четырехлетних сеянцев ели. В процессе проведения опытов частота колебаний планок и бил составила: 4,50; 6,92; 9,00 и 11,25 Гц. Амплитуда колебаний планок и бил была принята с учетом глубины выкопки укрупненных сеянцев ели равной 20 см и составила: 60, 100 и 140 мм. Подача на одно колебание планки и била при рабочей скорости агрегата 0,61 м/с составила: 5,4; 6,8; 8,8 и 13,5 см/кол. При оценке качества выкопки укрупненных сеянцев ели определялась масса почвы на их корневой системе и усилие на извлечение сеянцев из почвы. Анализ влияния режимов работы выкопочной машины на качество выкопки укрупненных четырехлетних сеянцев ели показывает, что при частоте колебаний планок и бил 4,50 и 6,92 Гц и подаче на одно их колебание равное 13,5 и 8,8 см/кол., масса почвы на корневой системе сеянцев составила, соответственно, 374,5 и 248,1 г и усилие на их извлечение из разрыхленной почвы, соответственно, 165,7 и 96,2 Н. Эти показатели превышают допустимое количество почвы на корневой системе сеянцев и усилие на их извлечение из почвы, и не соответствуют требованиям качества выкопки посадочного материала. Установлено, что с увеличением частоты колебаний планок и бил до 9,00 и 11,25 Гц, масса почвы, остающейся на корневой системе сеянцев, уменьшилась, соответственно, до 177,40 и 136,20 г, а усилие на их извлечение из почвы уменьшилось, соответственно, до 58,60 и 36,40 Н. Установлено, что при этих режимах работы выкопочной машины, показатели качества выкопки укрупненных сеянцев ели соответствуют агротехническим требованиям.

Глава шестая «Результаты разработки и испытаний комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для лесных питомников» включает результаты разработки и испытаний следующего комплекса машин и орудий: сеялку для крупноплодных семян СКБ-3-5, сеялку лесную навесную для посева семян ели СЛН-5А, культиватор комбинированный для питомников ККП-1,5А и выкопочную машину МВ-1,3А, которые имеют оригинальные конструкции и их новизна защищена патентами на изобретение и полезные модели. На основании проведенных теоретических и эксперимен-

тальных исследований были получены необходимые исходные данные для проектирования и в ОАО «ЦОКБлесхозмаш» разработана конструкторская документация и изготовлены опытные образцы этих машин и орудий. При этом выбрана более совершенная конструктивная схема и обоснованы параметры и режимы работы сеялки для равномерно-разреженного посева семян ели практически без их повреждения (менее 1 %) при выращивании укрупненных сеянцев без перешколивания: частота вращения штифтового высевающего аппарата 7 об./мин и поступательная скорость агрегата 0,28 м/с. Отличительной особенностью этого комплекса машин и орудий являются высокие показатели коэффициентов готовности и надежности, которые были в пределах от 0,91 до 0,98. По результатам испытаний комплекс новых и усовершенствованных машин и орудий рекомендован к постановке на серийное производство, а в ОАО «ЦОКБлесхозмаш» организовано их производство и поставка предприятиям лесного хозяйства.

Глава седьмая «Эффективность комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для выращивания посадочного материала в зоне хвойно-широколиственных лесов» включает результаты оценки эффективности применения разработанного комплекса машин и орудий.

Традиционная технология выращивания саженцев ели в питомниках является многооперационной и предусматривает сначала выращивание сеянцев с последующей их выкопкой и пересадкой в школьное отделение для доращивания. Перспективные агроприемы позволяют вырастить в посевном отделении питомника укрупненные сеянцы ели, равноценные саженцам, выращенным в школьном отделении питомника. С целью уточнения оптимальной густоты размещения сеянцев в строчке и целесообразности подрезки их корней были заложены опыты с количеством сеянцев: 20-30, 50-60 и 100-110 шт./пог.м. Для равномерно-разреженного посева семян ели с нормой высева от 0,5 до 1,5 г/пог.м использовалась сеялка лесная навесная модернизированная СЛН-5А. Подрезку корней сеянцев ели проводили на глубине 12-15 см и на расстоянии 10-12 см от ряда растений корнеподрезчиком навесным управляемым КНУ-1,2. Анализ полученных данных показывает, что лучшие показатели роста сеянцев ели получены при густоте в строчке 20-30 шт./пог.м и подрезке их корней, при этом соотношение массы тонких корней к массе хвои составило 1 : 3, при средней высоте четырехлетних укрупненных сеянцев ели равной 34,9 см и среднем диаметре стволика 5,7 мм.

С целью исследования влияния способа подрезки корней сеянцев ели и их возраста на показатели роста, была проведена подрезка корней двух- и трехлетних сеянцев ели. Анализ полученных опытным путем данных, показывает, что лучшие показатели роста сеянцев ели получены при подрезке корней в трехлетнем возрасте, так средняя высота, с густотой их размещения в строчке 20-30 шт./пог.м, составила 33,6-34,2 см и средний диаметр стволика 5,5-5,8 мм. Таким образом, технология выращивания укрупненных сеянцев ели без перешколивания в посевном отделении питомника, равноценных саженцам, выращенным в школьном отделении заменяет две технологические операции: выращивание сеянцев в посевном отделении питомника и выращивание саженцев в уплотненной школе на одну операцию. Эта технология уменьшает номенклатуру машин и орудий, применяемых для механизации работ в питомниках, а также исключает из оборота одно поле, благодаря сокращению на один год срока выращивания укрупненных сеянцев ели.

Анализ удельной энергоемкости (по номинальной мощности энергетических средств) на выращивание пятилетних (2 + 3) саженцев ели, состоящей из энергоемкости на выращивание двухлетних сеянцев в посевном отделении питомника – 0,74 кВт/1000 шт. и энергоемкости на их доращивание (в течение трех лет) в школьном

отделении питомника – 2,28 кВт/1000 шт. Общая удельная энергоемкость выращивания саженцев ели составляет 3,02 кВт/1000 шт. Удельная энергоемкость при выращивании укрупненных четырехлетних сеянцев ели без перешколивания, составляет 2,03 кВт/1000 шт. Таким образом, удельная энергоемкость при выращивании укрупненных сеянцев ели без перешколивания в посевном отделении питомника составляет 0,99 кВт/1000 шт., т.е. уменьшается в 1,5 раза.

Оценка удельной металлоемкости при выращивании саженцев ели, с учетом массы применяемых машин и орудий, показала, что при выращивании двухлетних сеянцев ели в посевном отделении питомника, она составляет 5,66 кг/1000 шт., и при доращивании саженцев в школьном отделении питомника, увеличивается на 17,9 кг/1000 шт. Общая удельная металлоемкость на выращивание саженцев ели (2 + 3) составляет 23,56 кг/1000 шт. Удельная металлоемкость при выращивании укрупненных четырехлетних сеянцев ели без перешколивания, не превышает 10,22 кг/1000 шт., т. е. она уменьшается в 2,3 раза.

При расчете затрат труда и средств на выращивание укрупненных сеянцев ели без перешколивания, выход посадочного материала при пятирядной схеме посева и густоте сеянцев в строчке 20-30 шт./пог.м, составляет 660-825 тыс. шт./га, в среднем принят равным 750 тыс. шт./га. При этом затраты труда на выращивание 1000 шт. пятилетних (2 + 3) саженцев ели составляют 0,79 чел.-дн., а затраты труда на выращивание четырехлетних укрупненных сеянцев ели без перешколивания снижаются до 0,43 чел.-дн., т. е. уменьшаются в 1,84 раза по сравнению с выращиванием саженцев ели в уплотненной школе. Затраты средств, на выращивание 1000 шт. саженцев ели, составляют 3047,08 р., а на выращивание 1000 шт. укрупненных сеянцев ели – 2287,93 р., т. е. затраты средств уменьшаются на 759,15 р. Это позволяет получить экономический эффект при выращивании 750 тыс. шт./га укрупненных четырехлетних сеянцев ели без перешколивания в посевном отделении питомника в размере 569,36 тыс. р.

Нормативные затраты труда на выращивание двухлетних сеянцев дуба при ручном способе составляют 78,54 чел.-дн. и затраты средств – 314,16 тыс. р. Затраты труда на выращивание двухлетних сеянцев дуба с применением разработанных средств механизации на выполнение тех же операций составляют 29,28 чел.-дн., т. е. уменьшаются в 2,68 раза. Затраты средств на выращивание 1000 шт. двухлетних сеянцев дуба при ручном способе составляют 628,32 р., а при применении средств механизации – 234,24 р., т. е. затраты средств уменьшаются на 394,08 р. Это позволяет получить экономический эффект при выращивании 500 тыс. шт./га двухлетних сеянцев дуба в размере 197,04 тыс. р. Таким образом, суммарный годовой экономический эффект от внедрения одного разработанного комплекса машин и орудий составляет 766,4 тыс. р., в ценах 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ традиционных технологий выращивания посадочного материала в лесных питомниках и применяемых средств механизации, свидетельствует о необходимости модернизации существующих и разработки комплекса новых машин и орудий, а также совершенствования технологических операций на его базе, с целью снижения трудозатрат, энерго- и металлоемкости, а также повышения качества выращивания посадочного материала лиственных и хвойных пород в зоне хвойно-широколиственных лесов.

2 Уточнены основные технологические свойства желудей дуба черешчатого и на этой основе обоснованы конструктивная схема и режимы работы сеялки СКБ-3-5 для посева крупноплодных семян, обеспечивающей поштучно-равномерный высев желудей без их повреждения с рациональными параметрами и режимами работы: скорость подачи ячеисто-транспортного высевающего аппарата 0,12 м/с, глубина

ячейки 5 мм; поступательная скорость агрегата 0,28 м/с.

3 Выбрана более совершенная конструктивная схема и обоснованы параметры и режимы работы сеялки СЛН-5А для равномерно-разреженного посева семян ели, без их повреждения, обеспечивающая при выращивании укрупненных сеянцев без перешколивания норму высева в пределах от 0,40 до 0,74 г/пог.м (от 81 до 145 шт./пог.м) при поступательной скорости сеялки 0,28 м/с и изменении частоты вращения штифтовых высевающих аппаратов от 4,3 до 7,0 об./мин.

4 Обоснованы параметры и режимы работы прикатывающего катка сеялки СКБ-3-5: диаметр 220 мм, ширина 70 мм и действующей на каток силы 80 Н, обеспечивающие оптимальную плотность почвы 1,0-1,2 г/см³ при заделке семян в посевной бороздке. Разработана номограмма для определения рациональных параметров прикатывающего катка, которая на стадии его проектирования позволяет определять достигаемую плотность почвы в посевной бороздке при известных параметрах катка и, наоборот, установить необходимые параметры катка и усилие его прижатия для требуемой плотности почвы.

5 Наиболее качественные показатели агротехнического ухода получены при использовании рыхлительно-подрезающих лап культиватора ККП-1,5А, которые обеспечивали высокую степень уничтожения сорной растительности – не менее 86 %, а фракционный состав рыхленной почвы размером до 50 мм, достигал 90 %. Полученные зависимости для определения сил, действующих, на рыхлительно-подрезающую лапу культиватора, при уходе за сеянцами, которые зависят от толщины ее стойки, глубины обработки и удельного сопротивления почвы и их рекомендуется применять при проектировании новых и совершенствовании существующих конструкций культиваторов для лесных питомников.

6 Установлено, что эффективность процесса разрушения почвенного пласта выкопочной машиной с активными рабочими органами зависит от частоты и амплитуды колебаний планок и бил. Обоснован рациональный режим работы выкопочной машины МВ-1,3А, обеспечивающий минимальную массу почвы на корневой системе укрупненных сеянцев ели в количестве 135,4-177,4 г и допустимое усилие на их извлечение из почвы в пределах от 36 до 58 Н, при подаче на одно колебание планок и бил 5,4-6,8 см/кол., их частоте колебаний в пределах от 9,00 до 11,25 Гц и скорости агрегата 0,6 м/с (2,2 км/ч).

7 Разработана математическая модель процесса заделки посевной бороздки почвой и предложена компьютерная программа, на основе которой определены конструктивные и технологические параметры загортача сеялки СЛН-5А: рабочая длина направляющих 120 мм, угол схождения между направляющими 28⁰ и диаметр прутков загортача 7 мм, которые обеспечивают заделку посевной бороздки почвой около 10 мм и плотностью в ней около 1,01 г/см³.

8 Сформулирована математическая модель процесса выкопки посадочного материала, позволяющая прогнозировать напряжённо-деформированное состояние слоя почвы при его рыхлении рабочими органами выкопочной машиной МВ-1,3А, в зависимости от реологических свойств почвы и технических параметров: частоты вращения вала рабочего органа, скорости движения машины, размеров и углов поворота планок и бил, высоты подрезаемого слоя почвы и глубины хода рабочего органа.

9 Усовершенствована технология выращивания укрупненных сеянцев ели без перешколивания на базе комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий, предусматривающая использование для посева тяжелых и средних по массе семян ели с нормой высева, обеспечивающей густоту сеянцев в количестве 20-30 штук на один метр строчки и позволяющая вырастить укрупненные сеянцы ели, равноценные саженцам.

10 Разработаны конструкции и обоснованы параметры и режимы работы сеял-

ки для крупноплодных семян СКБ-3-5, сеялки лесной навесной для семян ели СЛН-5А, культиватора комбинированного для питомников ККП-1,5А и машины выкопной МВ-1,3А, новизна и оригинальность конструкций, которых защищена патентами на изобретения и полезные модели. Опытные образцы комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий успешно прошли опытно-производственную проверку и приемочные испытания, в результате которых они рекомендованы к постановке на серийное производство, а в ОАО ЦОКБлесхозмаш организованы их выпуск и поставка предприятиям лесного хозяйства.

11 Разработанный комплекс новых и усовершенствованных машин и орудий позволяет вырастить высококачественный посадочный материал, снизить металлоемкость в 2,3 раза, энергозатраты в 1,5 раза, трудозатраты в 1,84 раза при выращивании укрупненных сеянцев ели без перешколивания и в 2,68 раза при выращивании сеянцев дуба. Применение этого комплекса при выращивании укрупненных 500 тыс. шт./га сеянцев дуба и 750 тыс. шт./га сеянцев ели позволяет получить суммарный годовой экономический эффект в размере 766,4 тыс. р., в ценах 2021 г.

12 Основными рекомендациями результатов исследования для их внедрения в проектно-конструкторских организациях, предприятиях лесного хозяйства и в учебном процессе высших учебных учреждений соответствующего профиля, являются математические модели, алгоритмы и программы для ЭВМ, а также рабочие процессы и результаты оптимизации параметров комплекса новых и усовершенствованных машин и орудий для выращивания посадочного материала в лесных питомниках зоны хвойно-широколиственных лесов.

13 Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в разработке теоретических основ, создании и внедрении в лесных питомниках на основе разработанных и разрабатываемых средств механизации автоматизированных и роботизированных комплексов, обеспечивающих выполнение необходимых технологических операций по выращиванию высококачественного посадочного материала при существенном повышении производительности и снижении материальных и трудовых затрат.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в базы данных Scopus

1 Kazakov I V Rate of sowing Norway spruce seeds : the effect of rotation frequency of the sowing machine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 392 (2019) 012047, 6p. – DOI : 10.1088/1755-1315/392/1/012047.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/392/1/012047/pdf>.

2 Kazakov I V, Prokazin N E, Kazakov V I and Martynyuk A A Innovative aspects of cultivation of large spruce seedlings for reforestation // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, Volume 392 (2019) 012042, 7p. – DOI : 10.1088/1755-1315/392/1/012042. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/392/1/012042/pdf>.

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

3 Бартнев, И. М. Аналитические исследования рыхлительно-подрезающих лап культиватора для питомников / И. М. Бартнев, В. И. Казаков, И. В. Казаков // Лесотехнический журнал : ВГЛТА. – 2011. – № 1. – С. 220-228.

4 Казаков, В. И. Исследование процесса резания корней сеянцев при подрезке и выкопке / В. И. Казаков, И. В. Казаков // Лесотехнический журнал : ВГЛТА. – 2014. – № 2. – С. 216-219.

5 Казаков, В. И. Аналитические исследования процесса разрушения почвенного пласта выкопчной машиной с активными рабочими органами / В. И. Казаков, И. В. Казаков // Лесотехнический журнал : ВГЛТА. – 2015. – № 3. – С. 220-228.

6 Казаков, В. И. Влияние сортировки семян хвойных пород на посевные качества / В. И. Казаков, Н. Е. Проказин, Е. Н. Лобанова, И. В. Казаков // Лесотехнический журнал : ВГЛТУ. – 2016. – № 3. – С. 161-167.

7 Казаков, И. В. Аналитические исследования процесса высева семян хвойных пород штифтовым высевающим аппаратом / И. В. Казаков, В. И. Казаков // Лесотехнический журнал / ВГЛТУ. – Воронеж, – 2017. – № 3. – С. 201-210.

8 Казаков, И. В. Математическое моделирование процесса заделки семян почвой / И. В. Казаков // Лесотехнический журнал / ВГЛТУ. – Воронеж, – 2018. – № 4. – С. 221-229.

9 Казаков, В. И. Эффективность контактного нанесения гербицидов для борьбы с сорной растительностью в лесных питомниках / В. И. Казаков, Н. Е. Проказин, И. В. Казаков, Е. Н. Лобанова // Лесотехнический журнал / ВГЛТУ. – Воронеж, – 2019. – № 1. – С. 153-159.

10 Дорняк, О. Р. Математическая модель напряженно-деформированного состояния грунта в процессе его взаимодействия с рабочими органами выкопчной машины / О. Р. Дорняк, М. В. Драпалюк, И. В. Казаков, Э. С. Оруджов // Лесотехнический журнал / ВГЛТУ. – Воронеж, – 2019. – № 2. – С. 157-163.

11 Казаков, И. В. Влияние параметров и режимов работы сеялки для крупноплодных семян на агротехнические показатели посева желудей / И. В. Казаков // Лесотехнический журнал / ВГЛТУ. – Воронеж, – 2019. – № 3. – С. 149-156.

12 Казаков, И. В. Результаты моделирования процесса заделки посевной бороздки почвой / И. В. Казаков // Лесотехнический журнал / ВГЛТУ. – Воронеж, – 2019. – № 3. – С. 157-171.

13 Казаков, И. В. Влияние режимов работы выкопчной машины на качество выкопки посадочного материала / И. В. Казаков // Лесотехнический журнал / ВГЛТУ. – Воронеж, – 2020. – № 1. – С. 203-208.

В монографиях, энциклопедии, учебниках и пособиях

14 Пошарников, Ф. В. Перспективные технологии выращивания лесопосадочного материала : моногр. / Ф. В. Пошарников, И. В. Казаков ; Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2007. – 290 с. – ISBN 978-5-7994-0259-4.

15 Энциклопедия лесного хозяйства (издание исправленное и дополненное) : в 2-х томах / авторский коллектив : Т. А. Антипенко, Е. Ю. Афонин, Н. А. Бабищ, И. В. Казаков [и др.] – Т. 1. – М. : ВНИИЛМ, 2006. – 424 с. : с илл. ISBN 5-94737-022-0; Т. 2. – М. : ВНИИЛМ, 2006. – 416 с. : с илл. ISBN 5-94737-023-9.

16 Технология и механизация лесохозяйственных работ : учебник для вузов / И. В. Казаков, Н. Е. Проказин, С. А. Родин [и др.] ; под ред. В. И. Казакова. – Москва : изд-во Юрайт, 2022. – 348 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-14465-9.

17 Механизация лесного и лесопаркового хозяйства : учебник для вузов / В. Н. Винокуров, Г. В. Силаев, И. В. Казаков ; под общей редакцией В. И. Казакова. – Москва : Издательство Юрайт, 2021. – 599 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-15187-9.

18 Казаков, И. В. Машины и оборудование для лесных питомников : пособие для специалистов лесного хозяйства / И. В. Казаков // ВНИИЛМ. – Пушкино, 2004. – 60 с.

В патентах, свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных

19 Патент № 2118076 Российская Федерация, МКИ А01С 7/00, А01С 7/16. Сеялка для высева крупноплодных семян ; № 97106866/13 ; заявл. 24.04.97 ; опубл.

27.08.98 / Казаков В. И., Свиридов Л. Т., Дегтев В. Т., Березин А. С., Казаков И. В. ; заявитель ФБУ ВНИИЛМ – 4 с. : ил.

20 Патент на полезную модель № 61982 Российская Федерация, МКИ А01С 11/04. Выкопчная машина для лесных питомников ; № 2006145727/22 ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 27.03.2007 / Казаков В. И., Родин С. А., Дегтев В. Т., Казаков И. В., Лобанова Е. Н. ; заявитель ФБУ ВНИИЛМ – 2 с. : ил.

21 Патент на полезную модель № 62767 Российская Федерация, МКИ А01С 7/00. Сеялка для лесных питомников ; № 2006145730/22 ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 10.05.2007 / Казаков В. И., Родин С. А., Дегтев В. Т., Казаков И. В., Лобанова Е. Н. ; заявитель ФБУ ВНИИЛМ – 3 с. : ил.

22 Патент на полезную модель № 61976 Российская Федерация, МКИ А01В 13/02. Выравниватель-грядододелатель для лесных питомников ; № 2006145726/22 ; заявл. 26.12.2006 ; опубл. 27.03.2007 / Казаков В. И., Родин С. А., Дегтев В. Т., Казаков И. В., Лобанова Е. Н. ; заявитель ФБУ ВНИИЛМ – 4 с. : ил.

23 Патент на полезную модель № 61979 Российская Федерация, МКИ А01В 49/02, А01В 49/04. Машина для обработки почвы в лесных питомниках ; № 2006145728/22 ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 27.03.2007 / Казаков В. И., Родин С. А., Дегтев В. Т., Казаков И. В., Лобанова Е. Н. ; заявитель ФБУ ВНИИЛМ – 3 с. : ил.

24 Патент на полезную модель № 182661 Российская Федерация, МПК А01М 7/00. Устройство для уничтожения сорной растительности в питомниках ; № 2017146075 ; заявл. 26.12.2017 ; опубл. 28.08.2018 / Мартынюк А. А., Казаков В. И., Дегтев В. Т., Проказин Н. Е., Казаков И. В., Лобанова Е. Н. ; заявитель ФБУ ВНИИЛМ – 2 с. : ил.

25 Патент на полезную модель № 191875 Российская Федерация, МПК А01С11/04. Машина выкопчная для лесных питомников ; заявл. 11.02.2019 ; опубл. 26.08.2019 / Мартынюк А. А., Казаков В. И., Дегтев В. Т., Проказин Н. Е., Казаков И. В., Лобанова Е. Н. ; заявитель ФБУ ВНИИЛМ – 2 с. : ил.

26 Патент № 2745076 Российская Федерация, МПК А01С7/00, А01С 7/20. Сеялка лесная ; № 2020131862 ; заявл. 24.09.2020 ; опубл. 19.03.2021 / Бартенев И. М., Казаков И. В. ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ – 2 с. : ил.

27 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610705 Российская Федерация. Программа для моделирования заделки семян в почву : № 2018665534 : заявл. 29.12.2018 : опубл. 16.01.2019 / И. В. Казаков, В. В. Посметьев, В. И. Казаков, В. И. Посметьев, В. О. Никонов ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ. – 1 с.

28 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20196110706 Российская Федерация. Программа для расчета параметров желоба высевающего аппарата : № 2018665532 : заявл. 29.12.2018 : опубл. 16.01.2019 / И. В. Казаков, М. В. Драпалюк ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ. – 1 с.

29 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620127 Российская Федерация. Технологические свойства дуба черешчатого : № 2019620033 : заявл. 10.01.2019 : опубл. 21.01.2019 / И. В. Казаков, М. В. Драпалюк ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ. – 1 с.

30 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620128 Российская Федерация. Результаты исследования углов трения скольжения желудей дуба черешчатого по стали и дереву : № 2019620034 : заявл. 10.01.2019 : опубл. 21.01.2019 / И. В. Казаков, М. В. Драпалюк ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ. – 1 с.

31 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620142 Российская Федерация. Распределение желудей дуба черешчатого в бороздке в зависимости от конструктивно-технологических параметров сеялки : № 2019620016 : за-

явл. 10.01.2019 : опубл. 23.01.2019 / И. В. Казаков, М. В. Драпалюк ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ. – 1 с.

32 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620143 Российская Федерация. Результаты компьютерного эксперимента процесса заделки семян почвой загортачами сеялки : № 2019620015 : заявл. 10.01.2019 : опубл. 23.01.2019 / И. В. Казаков, М. В. Драпалюк ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ. – 1 с.

33 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620152 Российская Федерация. Зависимости количества захватываемых желудей дуба черешчатого ячейкой высевающего аппарата сеялки от его конструктивно-технологических параметров : № 2019620004 : заявл. 09.01.2019 : опубл. 24.01.2019 / И. В. Казаков, М. В. Драпалюк ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ. – 1 с.

В сборниках научных трудов и материалах конференций

34 Казаков, И. В. Влияние параметров прикатывающего катка на степень уплотнения почвы / И. В. Казаков // Лесохоз. информ. – 2003. – № 11. – С. 31-32.

35 Казаков, И. В. Современные средства механизации для выращивания посадочного материала хвойных пород / И. В. Казаков // Наука и образование на службе лесного комплекса (к 75-летию ВГЛТА) : материалы межд. науч.-практ. конф. – Воронеж : ВГЛТА, 2005. – С. 63-66.

36 Казаков, В. И. Сеялка для высева мелких семян хвойных пород СЛН-5/9А / В. И. Казаков, И. В. Казаков // Лесн. хоз-во. – 2005. – № 1. – С. 44-45.

37 Казаков, И. В. Машина выкопчная модернизированная МВ-1,3А / И. В. Казаков // Лесное хозяйство – Москва, – 2006. – № 5. – С. 47-48.

38 Казаков, В. И. Повышение качества сеянцев путем формирования корневой системы / В. И. Казаков, И. В. Казаков, М. В. Драпалюк // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – Прил. к № 8. – С. 96-101.

39 Казаков, И. В. Лесохозяйственная техника, разработанная ВНИИЛМ и ЦОКБлесхозмаш / И. В. Казаков. – Пушкино : ВНИИЛМ, 2006. – 37 с.

40 Казаков, И. В. Современные технологии и машины для лесного хозяйства / И. В. Казаков, Е. Н. Лобанова – М. : ВНИИЛМ, 2006. – 46 с.

41 Родин, С. А. Современные средства механизации для лесного комплекса / С. А. Родин, В. И. Казаков, И. В. Казаков // 39-th International symposium on forestry mechanization (FORMEC 2006). – Sofia, Bulgaria. – 2006. – p. 45-47.

42 Казаков, И. В. Аналитические исследования рабочего процесса штифтового высевающего аппарата / И. В. Казаков // Лесовосстановление и механизация лесохозяйственных работ // Науч. тр. Вып. 332. Москва : МГУЛ. – 2007. – С. 10-19.

43 Казаков, В. И. Оптимальная густота размещения сеянцев и целесообразность подрезки их корневой системы / В. И. Казаков, Е. Н. Лобанова, Н. Е. Проказин, И. В. Казаков // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение. Межвузовский сб. науч. тр. – Вып. 4. – Воронеж : – 2009. – С. 163-173.

44 Казаков, В. И. Аналитические исследования процесса выравнивания поверхности почвы в лесных питомниках / Казаков В. И., Казаков И. В. // Механика технологических процессов в лесном комплексе: материалы межд. заоч. научн.-практ. конф. – Воронеж : ВГЛТУ, 2014. – Т. 2., № 2-2(7-2) – С. 93-99.

45 Казаков, И. В. Обоснование конструктивно-технологической схемы сеялки для посева крупноплодных семян / И. В. Казаков // Лесохоз. информ. : электрон.сетевой журн. – 2019. – № 2. – С. 89-96.

46 Проказин, Н. Е. Совершенствование технологий выращивания посадочного материала и лесовосстановления на горельниках / Н. Е. Проказин, С. А. Родин, В. И.

Казаков, Е. Н. Лобанова, И. В. Казаков // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. – 2019. – № 3. – С. 38-47.

47 Казаков, И. В. Агротехнические показатели рабочих органов культиватора ККП-1,5А при уходе в лесных питомниках / И. В. Казаков, С. А. Родин, В. И. Казаков // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. – 2020. – № 3. – С. 123-130.

48 Казаков, И. В. Перспективная лесопитомниковая сеялка для широкострочного посева / И. В. Казаков, А. Н. Журавлев // Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства : научн.-практ. конф. – Воронеж : ВГЛТУ, 2021. – С. 21-23.

49 Мартынюк, А. А. Состояние и проблемы развития механизации лесохозяйственных работ / А. А. Мартынюк, В. И. Казаков, И. В. Казаков // В сборнике : Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства : научн.-практ. конф., Воронеж, 21-22 октября 2021 г. Отв. ред. И. С. Зиновьева ; М-во природных ресурсов и экологии РФ, Фед. агентство лесного хозяйства. – Воронеж, 2021. – с. 195-199.

50 Казаков, И. В. Обоснование параметров загортача для заделки семян в посевных бороздках / И. В. Казаков, В. И. Посметьев // Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 25-26 ноября 2021 г., ФГБОУ ВО «ВГЛТУ» – Воронеж, 2021. – С. 183-187.

51 Казаков, И. В. Оценка эффективности комплекса усовершенствованных машин для выращивания посадочного материала без перешколивания в лесных питомниках / И. В. Казаков, В. И. Посметьев, В. И. Казаков // «Мониторинг и биоразнообразие естественных, искусственных и лесомелиоративных систем» : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 27 мая 2021 г., – под ред. В. И. Михина ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2021. – С. 29-43.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 212.034.02 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ученому секретарю, факс (473) 253-67-02.

Казаков Игорь Владимирович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСА НОВЫХ
И УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МАШИН И ОРУДИЙ ДЛЯ
ВЫРАЩИВАНИЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ
ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Подписано к печати __.__.2022 г.

Формат 60×90 1/16. Объем 2 п. л. Тираж 100 экз. Заказ № __

Отпечатано в УОП ФГБОУ ВО «ВГЛТУ» 394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10