

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

ЧЕВАРДИНА Анастасия Юрьевна

На правах рукописи

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
ЦИФРОВОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ПРЕДМЕТА ТРУДА**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Побединский Владимир Викторович**

Екатеринбург – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА	12
1.1 Структура лесопромышленного комплекса.....	12
1.2 Предмет труда в лесопромышленных технологиях	14
1.3 Анализ использования отечественных и зарубежных информационных технологий в лесопромышленном комплексе.....	18
1.4 Анализ исследований, посвященных моделированию процессов производства в лесном секторе	32
1.4.1 Анализ методов моделирования для объектов лесного сектора.....	32
1.4.2 Анализ средств моделирования, применительно к объектам лесного комплекса	37
1.4.3 Анализ применения технологии цифровых двойников	42
1.5 Выводы по первой главе	46
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРНО-КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОМАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ХЛЫСТА ЕЛИ	48
2.1 Обоснование входных параметров для моделирования хлыста ели .	48
2.2 Обоснование выходных параметров для моделирования хлыста ели.....	51
2.3 Методы моделирования размерно-качественных характеристик хлыста ели.....	61
2.4 Формирование статистических данных для моделирования размерно-качественных показателей хлыста ели	61
2.4.1 Разработка программы обработки статистических данных для нейросети.....	63
2.4.2 Разработка нейронной сети в среде MATLAB	64

2.4.3 Структура модели размерно-качественных характеристик хлыста ели	66
2.5 Выводы по второй главе.....	68
ГЛАВА 3 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЁХМЕРНОГО ЦИФРОВОГО ПРОТОТИПА ПРЕДМЕТА ТРУДА НА ПРИМЕРЕ ХЛЫСТА ЕЛИ.....	70
3.1 Разработка панели пользователя	70
3.2 Методика построения цифрового прототипа хлыста ели.....	72
3.2.1 Разработка алгоритма моделирования микропрофиля закомелистости основания хлыста ели	73
3.2.2 Программная реализация среза основания хлыста с закомелистостью в 3-D пространстве	76
3.2.3 Построение основных срезов по длине хлыста ели	81
3.2.4 Программная реализация пороков формы ствола в 3-D модели цифрового прототипа хлыста ели.....	85
3.2.5 Программная реализация порока сучковатости по длине цифрового прототипа хлыста ели	89
3.3 Выводы по третьей главе	97
ГЛАВА 4 ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ПРОТОТИПА ХЛЫСТА ЕЛИ	99
4.1 Технология выполнения численного эксперимента	99
4.2 Технология экспортирования цифрового прототипа хлыста ели между различными средами трёхмерного моделирования	122
4.3 Выводы по результатам экспериментальных исследований.....	124
ГЛАВА 5 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРАКТИКУ	126
5.1 Внедрение виртуальных экспериментов	126
5.2 Внедрение полунатурных экспериментов.....	127

5.3 Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследования в производство лесопромышленного оборудования	128
5.3.1 Расчет экономического эффекта на этапе проектирования.....	128
5.3.2 Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследований в научно-исследовательскую разработку.....	139
5.4 Выводы по пятой главе.....	143
Основные выводы и рекомендации	145
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	147
ПРИЛОЖЕНИЯ	164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время человечество вступило в эпоху цифровой трансформации, которую определили 4-й промышленной революцией, согласно концепции Industry 4.0. В условиях данной парадигмы в высокотехнологичной промышленности решающее значение отводится технологиям проектирования, то есть важнейшим фактором прогресса становится не просто производство, а разработка и проектирование создаваемой продукции. Отсюда следует появление проблемы создания цифрового прототипа любого проектируемого изделия.

В лесопромышленных технологиях традиционно проектирование оборудования выполняется с использованием основного предмета труда – лесоматериала в упрощенном его представлении. Между тем, он имеет специфические особенности, в первую очередь изменчивость всех его параметров в широких пределах, без точного учета которых практически невозможно создавать образцы техники и технологий, соответствующие современному уровню. Поскольку параметры предмета труда являются исходными для проектирования, то учитывая современные тенденции в части цифровизации, переход на новейшие технологии модельно-ориентированного проектирования на основе цифрового прототипирования, а также управления жизненным циклом изделий с использованием цифровых двойников будет невозможен, что делает проблему создания цифрового прототипа предмета труда в проектировании лесопромышленного оборудования чрезвычайно актуальной.

В отношении породы предмета труда следует отметить, что в промышленных заготовках преобладают хвойные породы древесины, поэтому первоочередной породой для создания цифрового прототипа представляется именно хвойная порода, а по виду лесоматериала предпочтительно рассмотреть древесный хлыст.

Современные компьютерные технологии позволяют решать задачи, ранее недоступные для решения. В их числе следует назвать цифровые прототипы, построенные с использованием интеллектуальных систем на основе нейронных сетей с визуализацией результатов в виде реалистичных 3-D моделей.

Описанных выше разработок уже достаточно много в других отраслях, но в лесном секторе, несмотря на отдельные примеры, параметрической модели лесоматериала не создано, что является препятствием дальнейшего развития лесопромышленных технологий, поэтому первоочередной задачей представляется решение проблемы создания и использования в практике проектирования цифрового прототипа предмета труда. Таким образом проблема остается нерешенной, а исследования в этом направлении становятся все более актуальными, что и предопределило тему настоящих исследований.

Степень разработанности проблемы. Следует отметить, что проблема размерно-качественных параметров круглых лесоматериалов исследовалась рядом ведущих учёных. Данными вопросами занимались в УЛТИ-УГЛТУ проф., д.с.х.н. С.В. Залесов, исследовавший таксационные характеристики хвойных древостоев. В ТОГУ проф., д.т.н. Казаков Н.В. моделировал древостой на цифровых пространственных моделях лесосек. Моделированию процессов лесосечных работ посвящены труды проф., д.т.н. С.Б. Якимовича. В ЛТА-СПБГЛТУ была предложена математическая модель уравнения образующей древесного ствола проф., д.т.н. В.С. Петровским. Позже проф., д.т.н. А.С. Торопов в своем исследовании разрабатывал универсальную математическую модель предмета труда. Также проф., д.т.н. С.П. Бойков исследовал модели размерно-качественных характеристик лесоматериалов и их влияние на процесс окорки. В последующем в диссертационных изысканиях К.Д. Жука была построена двумерная модель ствола дерева, позволяющая отражать сбежистость ствола и объем. В УГЛТУ к.т.н. В.В. Обвинцев и к.т.н. В.В. Чамеев формализовали размерно-качественные характеристики сортиментов применительно к имитационному моделированию работы технологии тарных цехов. В ЦНИИМЭ к.т.н. Л.Г. Дорофеев установил зависимость сучковатости от толщины ствола, а М.Я. Обросов предложил методику моделирования параметров сучковатости деревьев. В МЛТИ-МГУЛ проф., д.т.н. А.К. Редькин предложил основы теории потоков древесины, а проф., д.т.н. В.И. Алябьев разработал основы теории оптимизации параметров лесных погрузочно-разгрузочных машин, базирующиеся на особенностях размерно-качественных характеристик круглых лесоматериалов. В ТОГУ проф., д.т.н.

Исаев С.П. и к.т.н. Н.О. Бегункова исследовали внутреннее макростроение ствола дерева с последующей разработкой его цифровой копии. Но несмотря на достижения в вопросах изучения, систематизации, установлении зависимостей размерно-качественных параметров дерева и представлению связей в строгом математическом виде, трёхмерной модели древесного хлыста с параметрическим описанием пороков формы ствола так и не было предложено.

Таким образом, на основании вышеизложенного определилась цель настоящих исследований.

Цель исследований: создание цифрового прототипа предмета труда в виде древесного хлыста.

Задачи исследования:

- на основании результатов анализа научных и практических проблем в лесном секторе определить наиболее актуальное направление дальнейших исследований, направленных на совершенствование проектирования лесопромышленного оборудования;
- установить размерно-качественные характеристики предмета труда на примере хлыста ели, определяющие форму ствола;
- разработать методику моделирования показателей формы предмета труда на основе нейросетевой технологии;
- разработать методику построения цифрового прототипа предмета труда;
- реализовать алгоритм построения трёхмерной параметрической модели цифрового прототипа предмета труда на примере хлыста ели с учётом основных пороков формы ствола;
- провести численные эксперименты по моделированию цифрового прототипа предмета труда с различными размерно-качественными характеристиками;
- выполнить генерацию цифрового потока прототипов предметов труда на примере хлыстов ели с размерно-качественными характеристиками под требования различных технологических линий;
- оценить экономическую эффективность от внедрения результатов исследования в проектно-конструкторскую практику.

Объект исследований: предмет труда в лесопромышленных технологиях в виде хлыста ели.

Предметом исследований: размерно-качественные характеристики предмета труда на примере хлыста ели и закономерности его параметрического моделирования.

Научная новизна работы.

1. Впервые разработана методика с использованием нейросетевой технологии для моделирования размерно-качественных параметров лесоматериала, определяющих форму хлыста.

2. Программно реализован алгоритм по моделированию трёхмерной модели цифрового прототипа предмета труда на примере хлыста ели, отличающийся учётом основных пороков формы ствола.

3. Впервые разработана методика моделирования поверхности микропрофиля ствола по окружности комлевого среза.

4. Создана методика, формирующая как отдельный цифровой прототип хлыста ели, так и технологический поток лесоматериалов в виде цифровых прототипов хлыстов ели, отличающаяся отражением параметрического представления формы стволов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики моделирования размерно-качественных характеристик предмета труда на основе нейросетевой технологии и цифрового прототипирования.

Практическая значимость работы состоит в использовании методики и программного обеспечения для проектирования машин, и оборудования лесопромышленных, лесохозяйственных и деревообрабатывающих технологий.

Использование рекомендаций и разработанного программного обеспечения на этапе проектирования позволяет проводить виртуальные испытания оборудования, что сокращает экономические затраты и время создания продукции. Расчетный экономический эффект от внедрения результатов исследования в проектно-конструкторскую практику на примере окорочных станков не менее 1 460 тыс. руб. на одну модель станка.

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования.

Работа базируется на результатах исследований ученых в области размерно-качественных характеристик круглых лесоматериалов и нормативно-технической литературе (ГОСТ), технологии нейронных сетей, методах имитационного моделирования MATLAB, языке программирования API Python, средствах графического моделирования BLENDER и SolidWorks.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика с использованием интеллектуальных систем на основе нейросетевой технологии для моделирования размерно-качественных параметров лесоматериала, определяющих форму хлыста.

2. Методика моделирования поверхности микропрофиля ствола по окружности комлевого среза.

3. Алгоритм построения трёхмерной модели цифрового прототипа хлыста ели, учитывающего пороки дерева овальность, сбежистость, кривизну (простая и сложная), закомелистость (округлая и ребристая), сучковатость мутовчатого типа.

4. Методика генерации цифровых прототипов как отдельного хлыста, так и технологических потоков лесоматериалов.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов работы определяется большим объемом проведенных статистических и численных экспериментов, а также положительными результатами апробации в промышленном производстве. Получен акт промышленной апробации результатов диссертационного исследования на ООО «Проектсервис» г. Екатеринбург (приложение В). Результаты исследований внедрены в ООО «Лестех» (приложение Г).

Результаты моделирования размерно-качественных характеристик цифрового прототипа предмета труда на примере хлыста ели демонстрируют аналогичность параметрам физического елового хлыста, что подтверждает достаточный уровень адекватности модели реальным объектам и свидетельствует о достоверности работы системы с возможностью дальнейшего использования моделей для исследований и

проектирования лесозаготовительного, деревообрабатывающего и лесохозяйственного оборудования.

Основные положения диссертационного исследования были представлены в виде докладов и сообщений на международных и всероссийских научно-практических конференциях.

Международных: «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (Екатеринбург, 2022), «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2022), «Современная наука и молодые учёные» (Пенза, 2022), «Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: материалы XV международной научно-технической конференции» (Екатеринбург, 2024).

Всероссийских: «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов (Екатеринбург, 2021), «Цивилизационные перемены в России: материалы XII научно-практической конференции» (Екатеринбург, 2022), «Цивилизационные перемены в России: материалы XIII научно-практической конференции» (Екатеринбург, 2023), «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XIX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов (Екатеринбург, 2023), «3D технологии в решении научно-практических задач» (Красноярск, 2023), «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов (Екатеринбург, 2024).

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» при подготовке бакалавров и магистров (приложение Д).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Полученные научные результаты соответствуют пунктам 1. «Параметры и показатели предмета труда в лесном хозяйстве и лесной промышленности как объекта обработки (технологических воздействий); создание информационных баз» и 6.

«Автоматизация, роботизация, информатизация управления машинами и системами лесного хозяйства и лесной промышленности» паспорта специальности 4.3.4 – Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины.

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертации, заключается в определении цели и задач исследования, анализе современных информационных технологий, используемых в лесопромышленном комплексе; разработке методики построения цифрового прототипа предмета труда на примере древесного хлыста для использования в проектировании лесопромышленного оборудования; разработке технологии моделирования размерно-качественных характеристик формы хлыста породы ель, основанной на использовании метода нейронных сетей; разработке программного обеспечения для построения трёхмерной модели цифрового прототипа хлыста ели, учитывающего пороки дерева овальность, сбежистость, кривизна (простая и сложная), закомелистость (округлая и ребристая), сучковатость мутовчатого типа; проведении численных экспериментов и обработки их результатов; подготовке результатов исследований по теме диссертации к публикации и доклады на научно-технических конференциях.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертации изложены в 19 публикациях, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (приложение Е; приложение Ж).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и рекомендаций, заключения, библиографического списка и приложений. Содержание работы представлено на 187 страницах, включая 64 рисунка, 11 таблиц и 7 приложений, изложенных на 24 страницах, содержащих таблицу, программный код, акты внедрения и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

1.1 Структура лесопромышленного комплекса

Леса занимают треть всей суши на Земле, представляя собой мировой запас лесных ресурсов. Половина лесных территорий сосредоточена в пяти странах: России, Бразилии, Канаде, США и Китае. Наибольшая площадь лесного покрова в мире находится на территории Российской Федерации [1]. Лесной фонд России представляет собой разнообразие древесных пород, однако основными являются хвойные виды. Процент хвойных лесов снижается с севера на юг: в тайге он составляет 78%, в зоне смешанных лесов — 53%, в лесостепи — 25%, а в степи — 12%. Таким образом, более 30% всей лесной площади страны занимают сосны, ели, пихты и кедры [2].

Лесопромышленный комплекс включает в себя лесное хозяйство и лесную промышленность. Лесное хозяйство представляет собой отрасль, занимающуюся реализацией мероприятий, направленных на восстановление лесов, защиту их от пожаров и негативных воздействий, а также регулирование их использования и учет лесных ресурсов. Лесная промышленность, в свою очередь, состоит из отраслей, которые занимаются заготовкой и переработкой древесины, производя готовую продукцию различной степени технологической сложности с использованием химических и механических методов обработки древесных ресурсов [1]. К отраслям лесной промышленности относятся:

- Лесозаготовительная промышленность – заготовка древесины.
- Целлюлозно-бумажная промышленность – производство целлюлозы, картона и бумаги.
- Деревообрабатывающая промышленность – обработка и переработка древесины посредством механического и химико-механического воздействия (плитное производство, производство фанеры, мебельное производство, деревянное домостроение, производство пиломатериалов и пр.)

— Лесохимическая промышленность (производство канифоли, таллового масла и пр.).

В лесной промышленности все круглые лесоматериалы принято разделять на деловые сортаменты и низкокачественную древесину.

К деловой древесине относят лесоматериалы, из которых производят следующие виды продукции:

- Пиломатериалы и заготовки (пиловочник).
- Шпалы железных дорог (шпальный кряж).
- Клепки бочек (клепочный кряж).
- Целлюлозы и древесной массы – балансы.
- Спичечный кряж.
- Шпон или фанерный кряж.
- В круглом виде: крепления горных выработок; мачт и судов; строительства; опор линий связи и т.д.

К низкокачественной древесине относят круглые лесоматериалы, не соответствующие по своим размерно-качественным характеристикам требованиям стандартов или технических условий. Однако, несмотря на это, низкокачественная древесина является популярным средством для изготовления товаров другого назначения.

Предприятия лесопромышленного сектора используют низкокачественное сырьё для следующих назначений:

- Технологическое назначение.
- Дровяная древесина для технологических нужд.
- Сырьё древесное тонкомерное.
- Дрова для отопления.
- Отходы раскряжевки хлыстов [2].

Исторически лесопромышленный комплекс России является одним из базовых экономических направлений российской экономики, охватывающим широкий спектр товаров. Правительством Российской Федерации взят курс на повышение технологичности производства лесной промышленности. Стратегия

развития лесопромышленного комплекса, утвержденная Правительством РФ 11 февраля 2021 г. №312-р, предлагает к 2030 г. разработать системы устойчивого лесопользования, усилить меры контроля и надзора в лесной сфере, внедрить цифровые технологии в производственный процесс, а также ввести запрет на экспорт необработанной древесины ценных хвойных пород и развить производство продукции с высокой добавленной стоимостью [1].

Лесопромышленный комплекс Российской Федерации имеет разветвленную, обширную структуру, затрагивающую большой диапазон промышленного сектора страны. Так, лесная промышленность играет большую роль в строительстве зданий, мебели, железнодорожной и энергетической инфраструктуры, типографии и химической промышленности, а также топливно-энергетического сегмента экономики. Всё производственное разнообразие товаров базируется на богатой сырьевой базе нашей страны. В основе каждой лесопромышленной технологии находится предмет труда – лесоматериал [3].

1.2 Предмет труда в лесопромышленных технологиях

Технологические процессы лесопромышленного комплекса характеризуются значительным разнообразием методов и конечных продуктов, однако их объединяет один основополагающий ресурс – лесоматериал. Несмотря на центральную роль сырьевой базы как предмета труда, научные исследования преимущественно сфокусированы на оптимизации производственных процессов, минимизации ресурсных затрат и технологическом развитии. В большинстве случаев древесина рассматривается исключительно как объект переработки, а не как предмет комплексного исследования. Надо отметить, что проблема размерно-качественных параметров круглых лесоматериалов исследовалась в работах Дорофеева Л.Г., Петровского В.С., Торопова А.С., Обвинцева В. В., Стяжкина В.П., Чамеева В.В. В этих работах установлены и формализованы корреляционные связи между морфометрическими особенностями лесоматериала,

но предмет труда представлен в математическом виде, параметрическая трёхмерная модель ствола дерева, учитывающая пороки формы ствола и сучковатость так и не была реализована, что требует продолжения изучения свойств предмета труда лесопромышленных технологий.

В процессе первичной обработки древесный хлыст подвергается сегментации на сортименты — отрезки определённой длины, обусловленной следующими факторами: наличием и локализацией пороков древесины, требованиями сортиментного плана, производственными мощностями перерабатывающих предприятий и нормативными стандартами. Круглые лесоматериалы классифицируются по породному составу и сортности, причём, как отмечает В.В. Чамеев, их параметры подчиняются размерно-качественным закономерностям. Ключевые размерные характеристики включают:

- Толщина.
- Длина.
- Сбег.

Качественные параметры, влияющие на сортность:

- Гниль.
- Кривизна.
- Сучки.

Указанные параметры обладают стохастической природой и значительной вариативностью значений. Доминирующим фактором, определяющим сортообразующие дефекты, выступает толщина круглых лесоматериалов, которая коррелирует со средним объёмом хлыста, породой дерева, структурой сортиментов, а также природно-климатическими и производственными условиями.

Толщина круглых лесоматериалов, являясь случайной величиной, характеризуется средним значением диаметра ствола и описывается вероятностным распределением. Средние значения толщин сырья, поступающего в цеха изменчивы. Коэффициент разброса значений среднего диаметра 8-11%.

Сбег, как структурная характеристика, оказывает существенное влияние на качество конечной продукции. Установлено, что тонкоствольные бревна больше подвержены сбегу, чем толстоствольные: при длине бревен 6 м и толщине 15 см зона сбega составляет 24,2 % объема, тогда как при толщине 25 см той же самой длины – 19,4, и при толщине 40 см – 16,7% [2].

Основными климатическими факторами, влияющими на показатели длины древостоя, принято считать следующие климатические параметры: плодородность почвы, наличие лесных пожаров в регионе, продолжительность сезона роста. Ученые из американского экологического общества в ходе исследования пришли к выводу, что максимальная высота дерева сильно коррелирует с относительной влагообеспеченностью, скоростью фотосинтеза, обеспеченностью питательными веществами и диаметром ксилемы. Так же в зависимости от морфологических особенностей разных пород деревьев по-разному проходит процесс распределения полезных веществ. Так некоторые кряжистые деревья с развитой корневой системой в первую очередь питают и увеличивают ее массу, другие ориентированы на скорейший рост ствола или фитомассы [4].

Качественные параметры устанавливают сортность сырья. Отмечено, что бревна с гнилью в комлевой части имеют статистическую зависимость от толщины гнили на торце комля. Для бревен, полученных из верхней или средней части хлыстов, определить наличие гнили сложно, в связи с чем используют равномерный закон.

Статистически выявлено, что доля бревен с сучками уменьшается с увеличением среднего диаметра ствола. Концентрация сучков на стволе зависит от породы дерева. Число сучков на 1 м длины определяют логарифмически нормальным распределением. Среднее количество сучьев у сосны – 4,34 шт./м, у березы и осины колеблются в диапазоне 1,8 – 2,15 шт./м [2], а среднее число сучьев в мутовках, для ели – 3,53 шт./м [5].

Значительная часть круглых лесоматериалов обладает кривизной. Кривизну классифицируют на простую кривизну, если по длине ствола встречается один изгиб, и сложную, если по длине ствола имеется более одного изгиба.

На основании ключевых размерных характеристик древесного ствола строилось математическое описание древесного ствола В.С. Петровским. Математическая модель уравнения образующей древесного ствола была основана на параметрах диаметр на середине ствола ($d_{0,5}$) и относительного расстояния до шейки корня ($\frac{l}{H}$). В общем виде математическая модель древесных стволов имеет выражение, представленное в формуле 1.1.

$$2x = d_{0,5} \left[\sqrt{\left(1 - \frac{l}{H}\right)} + A\left(\frac{l}{H}\right)^4 + B\left(\frac{l}{H}\right)^3 + C\left(\frac{l}{H}\right)^2 + D\left(\frac{l}{H}\right) + E \right], \quad (1.1)$$

где A, B, C, D, E – коэффициенты для породы дерева.

Результат математического моделирования представляет собой фигуру параболической формы в двумерном пространстве. Автор исследования утверждал, что математическое моделирование деревьев открывает перспективу теоретических исследований в области статики, динамики древесного ствола, сопротивления стволовой древесины разного рода нагрузкам. Однако, не совсем ясна природа получения коэффициентов породы дерева для расчета образующей под конкретный ствол. Сам автор утверждает, что сложность проблемы заключается в том, что в природе деревья даже одной породы имеют различную форму по среднему сбегу, коэффициенту формы, диаметрам и высотам. При этом весь широкий диапазон изменения размеров стволов необходимо охватить каким-то одним уравнением образующей [6]. Позже А.С. Торопов в своем исследовании разрабатывал универсальную математическую модель предмета труда, основанную на совокупности регрессионных зависимостей [7].

Исследование основных размерных и качественных параметров сортиментов позволяет заключить, что эти величины являются случайными. Параметры сортообразующих пороков зависят от природно-климатических и производственных условий [8]. В этом случае поток лесоматериалов и некоторые его параметры могут быть описаны статистически.

1.3 Анализ использования отечественных и зарубежных информационных технологий в лесопромышленном комплексе

Перед каждым государством стоят проблемы контроля и сохранения лесного фонда, эффективного проектирования разработки участков леса, построения разумных логистических решений, обоснованного принятия управленческих мер лесопромышленного комплекса, максимально продуктивной обработки дерева и т.д. По этой причине необходимо учитывать подходы, методы и технологии, применяемые в других странах для решения аналогичных задач. Изучение и анализ зарубежного опыта в области актуальных проблем, а также возможность адаптации и модернизации ранее разработанных решений, являются ключевыми факторами успешного развития лесной промышленности и общего экономического благополучия.

В данном контексте целесообразно рассмотреть наиболее эффективные и распространенные технические решения, касающиеся контроля, освоения, переработки и транспортировки леса, которые применяются как в Российской Федерации, так и в других странах в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Информационные технологии в ЛПК

Автор технологии	Наименование технологии	Технология	Страна	Отрасль ЛПК
1	2	3	4	5
Metsä	Сервис «виртуальные леса» [9]	Трехмерная виртуальная модель леса	Финляндия	Лесозаготовительная промышленность
Metsä Group	Мобильное приложение «Лесная сеть» [9]	Трехмерная модель с геолокацией и буфером памяти	Финляндия	Лесозаготовительная промышленность
Министерство лесного хозяйства республики Беларусь	ЕГАИС [10]	Информационная система электронного документооборота	Беларусь	Лесозаготовительная промышленность

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
Cargo Tracck[10]		Модуль сотовой связи	Бразилия	Лесное хозяйство
Metsä	Trestima [8]	Облачный сервис с аналитикой по участку леса по фото	Финляндия	Процесс планирования рубки леса
John Deere	Система JDLink [12]	Модуль удаленного контроля лесозаготовительной техники	США	Лесозаготовительная промышленность
John Deere	TimberMatic Maps [12]	Геолокационная система для операторов лесозаготовительной техники	США	Лесозаготовительная промышленность
John Deere	TimberManager [12]	Информационная система	США	Лесозаготовительная промышленность
Einride	Беспилотный лесовоз T-log[13]	Система дистанционного управления	Швеция	Лесозаготовительная промышленность
Weinig	Сканер древесины Luxscan CombiScan Sensev[14]	Сканирование/искусственный интеллект	Германия	Деревообрабатывающая промышленность
WoodEye и Microtec	Сканеры Microtec Golden Eye и Microtec WoodEye [15]	Сканирование/искусственный интеллект	Финляндия и Италия	Деревообрабатывающая промышленность
«АГМ Системы»	Сканер АГМ-МС7 [11; 16]	Лазерное сканирование/ 3D-модель	Российская Федерация	Лесозаготовительная промышленность
«Аэрогеоматика» [17]		БПЛА/ воздушное лазерное сканирование	Российская Федерация	Лесозаготовительная промышленность

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
Ботанический сад-институт ДВО РАН	Нейросеть распознавания участков поврежденных лесов [18,19]	Технология глубокой сверточной нейронной сети (DCNNs)/БПЛА/снижки со спутников	Российская Федерация	Лесное хозяйство
Сколковский институт науки и технологий	Нейронная сеть для определения пород леса [20]	Нейронная сеть	Российская Федерация	Лесное хозяйство
WWF России	Система «Кедр» [11]	Информационная система автоматического мониторинга	Российская Федерация	Лесное хозяйство
Федеральное агентство лесного хозяйства	ИСДМ-Рослесхоз [20]	Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров	Российская Федерация	Лесное хозяйство
ООО "Формоза-Софт"	Система видеонаблюдения «Лесохранитель» [20; 21]	Информационная система автоматизированного контроля над лесными участками	Российская Федерация	Лесное хозяйство
«ДиСиКон»	«Лесной Дозор» [11]	Информационная система автоматизированного контроля над лесными участками	Российская Федерация	Лесное хозяйство
Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края	Информационная система «Умный лес» [22]	Информационная система автоматизированного контроля над лесными участками	Российская Федерация	Лесное хозяйство
«Опти-Софт»	Информационная система Opti-Wood [23]	Система поддержки принятия управленческих решений	Российская Федерация	Лесозаготовительная промышленность

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
ООО "Свеза СмартЛайн"	Сканеры дефектов лущения/ламинирования [24]	Искусственный интеллект	Российская Федерация	Деревообрабатывающая промышленность
ООО "Свеза СмартЛайн"	Приложение для подсчета листового материала Plycounter [25]	Искусственный интеллект	Российская Федерация	Деревообрабатывающая промышленность
«Интерфейс»	Комплекс «Скан Трек» [26]	Искусственный интеллект	Российская Федерация	Лесозаготовительная промышленность
NeuroWood	Мобильное приложение NeuroWood [27]	Искусственный интеллект	Российская Федерация	Лесозаготовительная промышленность
Forestscanner	Информационная система Forestscanner.net [28]	Дроны/3D-модель участка леса	Российская Федерация	Лесозаготовительная промышленность
ООО "Эвоматикс"	Система вибромониторинга уровня вибрации производственных линий [29]	Автоматизированная система управления технологическим процессом	Российская Федерация	Деревообрабатывающая промышленность
УНЛ ИТА	Система автоматического управления сушильными конвективными камерами пиломатериала [30]	Автоматизированная система управления технологическим процессом	Российская Федерация	Деревообрабатывающая промышленность
ЦБК Segezha Group	Сервис для измерения объема заготовленного леса [31]	Нейросеть	Российская Федерация	Лесозаготовительная промышленность
Finnos	Навигационная система Log Yard Control [32]	Автоматизированная система управления технологическим процессом	Финляндия	Лесозаготовительная промышленность

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
RemaSawco	Лесопильное производство [33]	Искусственный интеллект	Швеция	Деревообрабатывающая промышленность

Рассмотрим подробнее представленные выше технологии, применяемые в различных процессах лесопромышленного комплекса по отраслям лесопромышленного комплекса.

Работа с лесопромышленным предметом труда начинается с планирования рубки леса. В этом направлении наиболее развиты финские технологии, где господствует идея «цифрового лесоводства», представляющая собой процесс планирования рубки леса на основании статистических данных о территории и моделировании полученных показателей, включая дистанционное зондирование территорий. Информационный сервис «виртуальные леса» производства компании Metsä Group предлагает хозяину участка леса проверить подконтрольную ему площадь, запланировать мероприятия и увидеть будущий доход с помощью технологий виртуальной реальности. Сервис представляет собой трехмерную виртуальную модель леса с указанием местоположения и размерно-качественных характеристик на основе данных, представленных Лесным центром Финляндии в открытом доступе. Другим вариантом «виртуального леса» является мобильное приложение «Лесная сеть» того же производителя. Данное приложение имеет похожий функционал с предыдущим сервисом, позволяя владельцам участков эффективно контролировать ситуацию на выделе, оценивать и распоряжаться. В отличие от предыдущей системы в продукт добавлены геолокация и буфер памяти для заметок и фотографий.

Другим инновационным финским мобильным приложением является Trestima. Пользователь приложения фотографирует интересующее его дерево, снимок отправляется в облачный сервис, где обрабатывается и выдается

информация о стоимости древесины, ее количестве на участке в 1 га и объеме деревьев разных пород на данном участке [9].

В наибольшей степени популярностью в России пользуется технология воздушного лазерного сканирования леса, позволяющие планировать легальную рубку леса и пресекать незаконную. Так, краснодарская компания «АГМ Системы» производит лазерные средства для мобильных и авиационных систем. Данные технологии предоставляют широкий набор инструментов сбора, обработки и анализа данных воздушного и мобильного картографирования [11]. Эта технология позволяет снимать данные по трем осям и составлять трехмерные модели объектов [16].

Компания «Аэрогеоматика» использует БПЛА для съемки средних и малых объектов, где использование пилотируемого носителя является не рентабельным из-за небольшого объема работ. На сегодняшний день с помощью БПЛА можно производить не только цифровую аэрофотосъемку, но и воздушное лазерное сканирование. Использование на борту БПЛА легкого лазерного сканера АГМ-МСЗ и цифровой аэрофотокамеры позволяет получить по результатам съемки цифровой ортофотоплан и истинный рельеф местности даже при наличии густой древесно-кустарниковой растительности, что невозможно сделать при использовании только аэрофотосъемки на основе фотограмметрических методов [17].

Беспилотные летательные аппараты получили свою популярность, как в ряде коммерческих предприятий, так и среди наземных служб лесной охраны и сотрудников служб Министерства по чрезвычайным ситуациям. Они позволяют увеличивать эффективность борьбы с лесными пожарами за счёт высокой скорости обнаружения очага возгорания и возможности отслеживать развитие пожара.

В местах лесных пожаров используют навигационно-пилотажные системы, позволяющие контролировать аппараты. Применение данных систем расширяет границы возможностей по контролю пожарной ситуации на обширных

территориях природоохранных зон. Данная система призвана решать ряд следующих задач:

- Определение траекторий полетов.
- Указание параметров информационных и командных линий связи.
- Решение вопросов на удаленных расстояниях.

Система «Кедр» была разработана WWF России на основе российской платформы «Циторус» и была протестирована в Дальневосточном федеральном округе. Данная технология представляет собой автоматический мониторинг лесоизменений по оперативным космическим снимкам планеты. Результаты анализа поступают напрямую на мобильные устройства лесников. Эффективность системы была показана на уровне 80% [11].

Во Владимирской области используется система дистанционного мониторинга ИСДМ-Рослесхоз и система видеонаблюдения «Лесохранитель». Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) — федеральная государственная информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров. Главной особенностью «ИСДМ-Рослесхоз» является комплексный анализ информации, связанной с лесными пожарами, которая поступает из разных источников (метеорологическая информация, данные о результатах наземного и авиационного мониторинга, поступающие от региональных лесопожарных служб и данные космического мониторинга) [21; 22].

Система видеонаблюдения «Лесохранитель» представляет собой единую платформу автоматизированного контроля над лесными участками, что позволяет отслеживать пожары, вырубки и заболевание деревьев. В арсенал системы входят такие виды мониторинга как наземный (видеокамеры, тепловизоры, звуковые и дымовые датчики, патрули), авиационный (самолёты, вертолеты, БПЛА) и космический (космические аппараты дистанционного зондирования).

В системах видеомониторинга пожарной обстановки в лесах используются поворотные IP-видеокамеры, устанавливаемые на антенно-мачтовые сооружения в лесах. Данные о событии с указанием точных координат, полученные тем или

иным методом мониторинга поступают на сервер системы, откуда следуют в диспетчерскую службу и в лесоохранные службы (МЧС, лесничество). Радиус действия одной камеры заявлен до 35 км, точность определения координат до 200 м. Модуль автоматического распознавания лесных пожаров "Пожарный сторож" выявляет пожар с помощью приложения, работающего непосредственно на камере. Первичная обработка видеокadra с максимальным разрешением без сжатия производится в полевых условиях специализированным процессором, входящим в состав камеры. При обнаружении подозрительной области кадра (дым/огонь) модуль «Пожарный сторож» генерирует событие с камеры для дальнейшего анализа любым программным обеспечением [21; 22].

Нижегородская компания «ДиСиКон» разработала систему «Лесной дозор», аналог платформы «Лесоохранитель». Система «Лесной Дозор» представляет собой сеть подключенных к интернету вращающихся тепловизоров и IP-видеокамер, установленных на вышках, и определяющих координаты мест задымлений и возгораний в радиусе 30 км. Данные обрабатываются на месте в самих устройствах, после чего передаются на сервер. Принцип работы схож с представленным выше [11].

Другая геоинформационная система запущена в Пермском крае. Информационная система «Умный лес» дает возможность цифровизации задач всего цикла управления лесной отраслью данного региона: контролировать и учитывать оборот древесины, поддерживать актуальность данных и сделать процесс лесозаготовки более прозрачным, а при помощи актуальной и полной информации более взвешенно и своевременно принимать управленческие решения на уровне министерства края [22].

Другим активно развивающимся направлением информационных технологий в отрасли лесной промышленности являются нейронные сети, позволяющие быстро и эффективно обрабатывать полученные массивы данных об участках леса. Учёными Ботанического сада-института ДВО РАН была создана сверхточная нейросеть распознавания участков поврежденных лесов. В данном исследовании использована технология глубокой сверточной нейронной сети

(DCNNs) для распознавания повреждений леса, вызванных ветроходами и короедами. Для анализа нейросети предлагаются снимки высокого разрешения спутников Landsat и Sentinel и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Технология глобального мониторинга основана на сравнении яркости пикселей на снимках. В источнике заявлено, что нейросеть имеет расширение менее одного метра на один пиксель и обладает точностью анализа до 94%. [18,19].

Для контроля и актуализации таксационных данных создана нейронная сеть для определения пород леса. Создателями данной системы являются сотрудники Центра по научным и инженерным вычислительным технологиям для задач с большими массивами данных CDISE и Космического центра Сколтеха [20].

Данная система позволяет решить одну из важнейших задач лесопользования - категоризировать лесной массив, определив доминирующие виды деревьев. Анализ нейронной сети был основан на данных с многоспектральных спутниковых снимков WorldView. В ходе работы изображения сегментировались и выделялись регионы с определенными доминирующими видами деревьев. Для каждой иерархической декомпозиции была экспериментально разработана индивидуальная сетевая архитектура. В ходе данного исследования авторами был сформирован маркированный набор данных для классификации доминирующих видов Ленинградской области, разработан иерархический конвейер для сегментации нейронных сетей и сделаны выводы о влиянии данных о высоте на точность результатов анализа [20].

Важными и популярными областями применения информационных технологий являются направления лесозаготовки и деревообработки. Так, компания John Deere представила рынку систему JDLink, позволяющую удаленно контролировать и отслеживать в режиме реального времени ряд параметров лесозаготовительной машины (местоположение, состояние, расход топлива и т.п.), что позволяет избежать непредвиденных поломок и простоя техники, тем самым снижая издержки обслуживания транспорта. Технологический прорыв в сфере лесозаготовительного машиностроения совершила шведская компания Einride, предложившая систему дистанционного управления беспилотного

лесовоза T-log. Контроль над машиной осуществляется оператором, находящимся на расстоянии до 190 км, благодаря внедрению технологии Teleoperation Phantom Auto.

В последние годы наблюдается явная тенденция к развитию технологий, направленных на снижение влияния человеческого фактора в процессе лесозаготовок, с целью достижения полной автоматизации данного процесса. Развитие автоматизации процессов лесозаготовки коснулось не только работ на делянках, но и на складах. Сегежский ЦБК Segezha Group представляет технологию машинного обучения для измерения плотного объема круглого леса и коэффициента полндревесности с точностью до 99%. Принцип работы системы состоит в том, что на раме контрольно-пропускного пункта происходит фиксация множества снимков груза прибывшего лесовоза. Затем снимки поступают в нейронную сеть для анализа изображений. В итоге оператору поступает информация о конкретных пачках с указанием данных (породы, качества, диаметра), полученных в автоматизированном режиме [31]. С другой стороны, финская навигационная система Log Yard Control предлагает инструментарий для управления складом лесоматериала. Программное обеспечение основывается на изображении карты и схемы площадки круглых лесоматериалов, также отражает актуальную информацию об уровне заполнения отсеков бревнами. Кроме того, система анализирует движения погрузчика и оптимизирует маршрут, что увеличивает эффективность работы склада [32].

Правительство Беларуси так же, как и западные коллеги, ориентировано на автоматизацию процесса лесозаготовки, но путем цифровизации документооборота. В Беларуси реализована система электронного учета древесины (ЕГАИС). На смену традиционному бумажному учету предлагается электронный документооборот регистрации древесины. Информационная система полностью интегрирована в процесс лесозаготовки и охватывает все виды работ.

После погрузки водителю лесовоза выдается чек, напечатанный на мобильном термопринтере. В нем содержится полная информация о перевозимом грузе: дата и время погрузки, лесхоз, лесничество, квартал и выдел, количество,

длина, диаметр и порода перевозимых сортиментов, GPS-координаты склада загрузки, данные о водителе и машине, пункт выгрузки. С помощью функции ЕГАИС «Контроль» проверяющие могут уточнить информацию о грузе, либо отследить маршрут лесовоза, так как каждая машина снабжена системой GPS-навигации. Большое внимание при разработке системы было уделено защите от человеческого фактора, так при введении некорректной информации ЕГАИС автоматически выявляет ошибку. Помимо этого, многие поля документов заполняются автоматически, например, цены на разные виды лесопродукции. Таким образом, экономится рабочее время специалистов, снижается человеческий фактор и сокращаются простои большегрузной техники [10].

Так же к системам электронного документооборота можно отнести информационную систему Opti-Wood для планирования и управления лесозаготовительными предприятиями от фирмы «Опти-Софт». Она позволяет управленческому звену компании принимать решения, с учетом влияния факторов всей производственной цепи на различных горизонтах планирования [23].

В области производства пиломатериалов выбран курс на внедрение искусственного интеллекта. На этой технологии базируются немецкие разработки сканера древесины Luxscan CombiScan Sensev и итальянско-финские сканеры Microtec Golden Eye и Microtec WoodEye. Таким образом, вниманию производителей пиломатериалов представлено программное обеспечение для обнаружения дефектов древесины и прогрессивные сканирующие устройства в сфере обработки древесины. Немецкая компания Weinig выпустила сканер древесины Luxscan CombiScan Sense - сканер с элементами искусственного интеллекта, базирующегося на использовании метода обработки изображений, основанном на «глубоком обучении». Применение данной технологии позволяет повысить точность распознавания и повторяемость его результатов. Данная модель располагает так же модулями Angle Crack Modul для распознавания косых трещин, представляющих собой размещенные под разными углами лазеры. Для определения разности плотности древесины разработчики используют рентген

малой мощности, не требующий специальной системы охлаждения. Скорость работы сканера CombiScan Sense заявлена 60 досок в минуту [14].

Для поддержания конкурентоспособности два передовых предприятия систем сканирования - WoodEye и Microtec объединили свои усилия в одном проекте разработки продольных сканеров. Представлены модели двух линеек: сканеры Microtec Golden Eye для хвойных пород древесины и сканеры Microtec WoodEye для лиственных пород.

Таким образом, вниманию производителей пиломатериалов представлен ряд передовых программных обеспечений для обнаружения дефектов древесины, а с другой прогрессивные сканирующие устройства в сфере обработки древесины [15].

Системы сканирования, базирующиеся на технологии искусственного интеллекта, успешно развиваются и в России. Например, ООО "Свеза СмартЛайн" предлагает линейку сканеров дефектов, позволяющих в режиме реального времени контролировать качество выпускаемой продукции (лущеной ленты шпона и ламината). Помимо этого, производитель выпустил мобильное приложение Plycounter для автоматического подсчета листового материала по изображению пачки [25].

Другое мобильное приложение от фирмы NeuroWood позволяет на основе снимка, используя технологию ИИ, с точностью 97% измерить объем древесины, измерить диаметр каждого бревна и определить его сортность [27]. Конкурирующая система, базирующаяся на данных, полученных с 2D-сканеров, автоматически определяет диаметр и длину бревен по периметру штабеля древесины, либо по изображению торца штабеля [26, 34]. Производительность системы автоматизированного учёта круглых лесоматериалов 30 лесовозов в час с погрешностью не более 3% [26].

Представителем автоматизации процессов сушки пиломатериалов является учебно-научная лаборатория измерительной техники и автоматизации из города Томска. Отечественная лаборатория представляет систему полного автоматического управления сушильными конвективными камерами

пиломатериала. Система предусматривает библиотеку режимов автоматической сушки разных пород деревьев и ведение архива проведенных сушек. Присутствует алгоритм действий при самопроизвольном возгорании камеры сушки, а также самодиагностика оборудования [30].

Санкт-петербургская фирма ООО «Эвоматикс» предлагает к рассмотрению систему вибромониторинга уровня вибрации машин, узлов производственных линий, а также станков. На оборудование устанавливаются специальные датчики, отслеживающие ритм, громкость и другие акустические характерные параметры хода работы оборудования. Полученная информация обрабатывается с помощью программного обеспечения и поступает оператору в виде заключения о текущем состоянии техники, а также прогноз ее службы. Таким образом, предотвращается безвозвратный износ деталей, устраняются аварии на линии производства и уменьшаются плановые проверки по тестированию [29].

Следует отметить, что направления развития цифровизации в лесной промышленности представленных стран разнообразны. При этом наиболее популярными областями применения информационных технологий являются области лесозаготовки и деревообработки. Особенно часто применяют такие технологии как лазерное сканирование и обработка материалов с помощью алгоритмов нейронной сети.

В Российской Федерации наблюдается тенденция к цифровизации лесопромышленного комплекса, как со стороны коммерческого сектора экономики, так и государственного. Наиболее активно развивается направление, связанное с лесопользованием: увеличивается степень контроля над лесными пожарами, устанавливается мониторинг лесоизменений и отцифровывание участков лесного фонда. По этой причине, для сбора информации наиболее популярны такие технологические средства, как камеры, датчики, беспилотные летательные аппараты, квадрокоптеры, дроны и космические спутники. В следствие чего формируются большие объемы однотипной информации, которые эффективно систематизируют и категоризируют нейронные сети. Данные, полученные разнообразными способами, часто интегрируются в сложных

информационных системах, таких как «Умный лес», «Лесохранитель» или ИСДМ-Рослесхоз. Системы искусственного интеллекта так же являются и наиболее популярным техническим решением производственных задач лесной промышленности. Мы это видим в технологии Luxscan CombiScan Sense (немецкого сканера с элементами ИИ), оборудовании для лесопиления фирмы RemaSawco или технологии машинного обучения для измерения плотного объема круглого леса от сегежского ЦБК Segezha Group и мобильного приложения от фирмы NeuroWood, определяющего в режиме реального времени объем древесины, диаметр каждого бревна и его сортность на основе изображения торца штабеля. Помимо этого, производители пиломатериалов стараются снизить издержки за счет защиты оборудования от посторонних предметов и своевременной диагностики, которую предлагают обеспечить металлодетекторы на раме или вибромониторинг. К сожалению, многие описания информационных технологий, используемых в производстве пиломатериалов, довольно скудные и ограничены упоминанием о том, что используется программное обеспечение. Поэтому сложно давать развернутую оценку применению той или иной технологии в производстве продуктов деревообработки. Но даже по имеющейся в открытом доступе информации можно заключить, что использование нейронных сетей, больших данных, систем мониторинга и автоматизации способствуют повышению эффективности использования сырья, увеличению скорости приемки, классификации и обработки лесоматериала, снижению человеческого фактора и минимизации прямого участия сотрудников во всех этапах производства, а также сокращение амортизационных издержек за счет усиленного контроля за оборудованием [35].

Так же пользуется популярностью технологии по построению 3D-моделей. Некоторые фирмы привлекают технологии виртуальной реальности. Построение 3D-моделей является заключительным этапом целого ряда систем: сервиса «виртуальные леса» и мобильного приложения «Лесная сеть» финской фирмы Metsä, работы сканера АГМ-МС7 отечественной компании «АГМ Системы» [36]. Все приведенные программные продукты представляют конечную информацию в

виде 3D-модели, позволяя оценить вид, состояние, породу, объем и др. характеристики интересующего участка леса. Таким образом, технологии моделирования заслуживают более детального рассмотрения.

1.4 Анализ исследований, посвященных моделированию процессов производства в лесном секторе

1.4.1 Анализ методов моделирования для объектов лесного сектора

Как было изложено выше, информационные технологии прочно вошли во все аспекты лесопромышленного комплекса. Многие программные продукты представляют результат работы системы в графическом формате. Кроме того, производители лесопромышленной продукции часто выбирают методы компьютерного моделирования для имитации реальных производственных процессов или целых участков леса, что позволяет сократить затраты на производство, улучшить качество планирования работ и конечного продукта. Данный метод исследования популярен среди разработчиков и учёных для решения различных задач прикладного характера, изучения взаимосвязей событий, нахождения конструктивных решений и выполнения лабораторных испытаний.

Так, ученые математической лаборатории Технологического университета Тампере и Института природных ресурсов Финляндии провели совместное исследование, в ходе которого разработали новый метод распознавания древесных пород на основе измерений лазерного сканирования. В этом методе отдельные деревья могут быть извлечены из данных облака точек уровня лесного участка с помощью сканера. После чего информация передается в приложение, где структура крон отсканированных деревьев воспроизводится в виде комплексных 3D-моделей. Полученные модели деревьев состоят из последовательных цилиндров, определяющих структуру ствола и ветвей дерева, а также структуру ветвления. Авторы работы заявляют, что данная технология

позволяет различать отдельные ветви и анализировать характеристики их диаметров, объемов и углов ветвления. В ходе работы над распознаванием вида исследователи разработали базу данных, в которой выделили 15 признаков для классификации. Для сбора сведений о дереве одного вида были собраны данные о параметрах 30 деревьев данного вида. Этой информации стало достаточно для распознавания деревьев системой с точностью более 95%. В дальнейшей перспективе метод автоматического распознавания деревьев может быть применен для автоматизации процесса рубки древесины, определения делянок, подлежащих рубке, и оптимизации нежелательной рубки [37].

В процессе разработки конструкции рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом авторами следующего исследования была создана математическая модель движения лесовозного автомобиля с прицепом по неровной опорной поверхности. Разработанная модель легла в основу программного обеспечения, предназначенного для анализа взаимосвязи между конструктивными параметрами рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом и внешними условиями эксплуатации. В ходе исследования было установлено, что рекуперативная мощность возрастает пропорционально квадрату скорости движения автомобиля по грунтовым лесным дорогам, а также что при увеличении высоты неровностей опорной поверхности до 0,4 м наблюдается квадратичная зависимость роста рекуперированной мощности и продольного ускорения прицепа. На основании проведенных исследований авторы установили параметры диаметра гидроцилиндра для максимизации мощности в заданных условиях [38].

Продолжает тенденцию по имитации процессов лесозаготовительных процессов исследование, посвященное реализации виртуальной лесосеки средствами имитационного моделирования. Авторы исследования разрабатывают цифровой прототип участка, отведенного под рубку в графической среде MATLAB. В ходе построения модели лесного массива определяется его размер, параметры древостоя (полнота насаждения, координаты деревьев, значения толщины и высоты деревьев), параметры рельефа (координаты, длина и ширина,

проверка выхода на границы участка), разметка волоков и координация перемещения харвестера. Цифровой прототип лесосеки позволяет заранее симитировать различные лесозаготовительные этапы, оценить эффективность технологий, используемых на рубках, прогнозировать процессы по лесовосстановлению участка [39].

Автоматизации лесозаготовительных процессов в условиях реальных лесосек посвящено исследование доктора технических наук Н.В. Казакова. В рамках данной диссертационной работы были разработаны методы геоинформационно-математического моделирования лесосеки для автоматического управления технологическими операциями и позиционированием лесозаготовительных машин в реальных условиях леса. В процессе построения виртуальной копии лесосеки автор исследования строит рельеф местности на основании дистанционных данных со спутниковых спектральных снимков и моделирования древостоя в виде облаков точек лазерного локационного аэросканирования системы LIDAR в локальных координатах лесосеки. После чего используются методы и технологии виртуальной реальности, где в информационной среде визуальной и математической модели лесосеки и её элементов разрабатывается система автономного автоматического управления производственными процессами лесозаготовки на примере управления движением лесозаготовительных машин и их оборудования (на примере харвестера) [40]. Методы моделирования и синтеза процессов лесосечных работ и их систематизация базируются на работах А.К. Редькина, С.Б. Якимовича [41].

Другое исследование, посвященное цифровому прототипированию направлено на разработку цифрового прототипа короснимателя. Основываясь на чертеже короснимателя модели ОК-63, автор создает трёхмерную копию изделия, позволяющую на этапе проектирования произвести виртуальные испытания, тем самым существенно снизить расходы на проведении опытных испытаний и ускорить вывод продукции на рынок [42].

На разработку методологии создания и практического применения цифрового двойника объекта технологических воздействий в деревообработке направлен следующий ряд исследовательских работ [43, 44]. Авторы предлагают внедрить в процесс раскроя дерева использование цифрового двойника предмета труда, чтобы с помощью корректирующих действий с 3D-моделью круглого лесоматериала уточнить выполнение продольного раскроя с наибольшей эффективностью [43]. В следующей работе предлагается трёхмерное моделирование внутреннего строения натурной модели круглого лесоматериала. Предлагаемый метод предполагает построение трехмерной модели круглого лесоматериала путем обработки изображения годичных колец на торце и компьютерной реконструкции его внутреннего строения. Данный подход позволяет визуализировать структуру годичных слоев, что повышает эффективность продольного раскроя за счет оптимизации распила. В результате достигается увеличение объема конечной продукции (строганого шпона, пиломатериалов) с предсказуемыми показателями качества [44].

Автор следующего исследования предлагает технологию динамического расчета объема ствола дерева и методику автоматического распознавания породы ствола дерева. Модель формы ствола изображена в двумерной плоскости, где представлен продольный срез ствола дерева, имеющий информацию о диаметре, длине и объеме с учётом сбега. Предложена методология автоматического определения породы ствола дерева при работе многооперационных лесных машин, основанная на использовании метода машинного обучения и отличающаяся возможностью замены ручного способа задания породы на автоматический в процессе лесозаготовки [45].

Другим примером использования компьютерного моделирования для решения прикладных задач лесозаготовительной отрасли является разработка программы, оптимизирующей процесс сушки пиломатериалов. На основании методов математического и нечёткого моделирования разработана имитационная система, устанавливающая корреляцию между влажностью древесины, продолжительностью сушки, температурой нагрева и равновесной влажностью

воздуха в камере. Экспериментально подтверждено, что управление процессом требует учёта нелинейных зависимостей, что обосновывает необходимость разработки интеллектуальных систем автоматизации [46].

Аналогичный подход применён для моделирования сушки древесной коры — ключевого этапа утилизации отходов лесопереработки. В рамках исследования решены задачи оптимального периода прогрева сырья и предложена методика параметризации процессов сжигания коры в слоевых топках котлов [47].

Среди коммерческих решений выделяется система Valmatics 4.0, использующая мультиплатформенный симулятор для оптимизации сушки. Для камер периодического действия реализован алгоритм, имитирующий динамику процесса с возможностью калибровки параметров [15]. Технология Valusim обеспечивает высокую точность моделирования, позволяя адаптировать режимы сушки к реальным условиям [48].

Отдельного внимания заслуживает платформа Forestscanner.net, предоставляющая услуги 3D-моделирования лесных массивов с применением БПЛА и алгоритмов искусственного интеллекта. В процессе построения 3D-модели участка собираются данные по высоте, диаметру, породе и объёму древостоя данного участка. Разработчики онлайн сервиса заявляют о готовности оценить стоимость леса до рубки, опираясь на результаты измерений [28].

Можно резюмировать, что компьютерное моделирование доказало эффективность как в научных исследованиях, так и в коммерческих решениях. Широта применения охватывает задачи от таксации лесов до оптимизации переработки вторичного сырья. Многочисленные исследования подтверждают потенциал имитационных методов для решения узкоспециализированных проблем лесопромышленного комплекса [49]. Отдельно стоит выделить появление исследований, направленных на цифровизацию предмета труда в лесопромышленных технологиях, коренным образом влияющих на производственные и лесозаготовительные процессы.

1.4.2 Анализ средств моделирования, применительно к объектам лесного комплекса

Для реализации любого исследования необходимо использование соответствующей программной среды разработки информационной системы. В академической и инженерной средах наибольшую популярность получили системы компьютерного моделирования. Широкое применение указанных программных комплексов обусловлено универсальностью математического аппарата, лежащего в основе их функционирования. По этой причине программные комплексы были неоднократно использованы для изучения объектов и процессов лесопромышленного комплекса.

Условно программные средства моделирования можно разделить на два класса:

- Пакеты прикладных программ для выполнения инженерных и математических расчетов.
- Программные комплексы для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, используемые для автоматизированного проектирования (САПР) и 3D моделирования.

Нас интересуют оба направления развития программных средств моделирования. С учетом стремительного прогресса вычислительной техники и сопутствующего увеличения вычислительных ресурсов наблюдается значительный рост востребованности обозначенной области информационных технологий. Данное обстоятельство обусловило формирование обширного спектра программных средств, предназначенных для математического моделирования. Представляется целесообразным произвести обзор наиболее распространенных из них.

Рынок инструментов, предназначенных для компьютерного моделирования различного функционального назначения, характеризуется высоким уровнем

развития и конкуренции. В таблице 1.2 приведен сравнительный анализ пакетов прикладных математических программ.

Таблица 1.2 – Сравнительная характеристика систем математического моделирования

Критерии	MATLAB	Mathematica	Scilab	Maxima	Maple	STATISTICA	GNU Octave
Страна	США	США	Франция	США	Канада	США	–
Мультиплатформенность	+	+	+	+	+	–	+
Графическое представление	+	+	+	+	+	+	+
Интеграционные инструменты	+	+	+	+	+	+	+
Открытое ПО	–	–	+	+	–	–	+
Цена лицензии	Средняя [50]	Средняя [51]	Бесплатно [52]	Бесплатно [53]	Высокая [54]	Средняя [55]	Бесплатно [56]

Рассмотрим подробнее каждый представленный в таблице 2 критерий. Все комплексы программ, кроме STATISTICA, независимы от операционной системы. Разработчики всех представленных систем для выполнения инженерных и математических расчетов уделили внимание графическому функционалу и расширению возможностей программы за счёт внедрения актуальных языков программирования. Бесплатное программное обеспечение, такое как Scilab, GNU Octave и Maxima, распространяется свободно, в то время как платные системы моделирования используют закрытый исходный код. Стоимость лицензии указана в качественных показателях, таких как высокая – более 2000 долл./г., средняя – до 1500 долл./г. и бесплатная. Свободно распространяемыми являются Scilab, GNU Octave и Maxima. Среди представленных платных программных решений наиболее высокой ценой отличается продукт компании Maple, тогда как наиболее доступным по стоимости является MATLAB.

Прежде всего, следует отметить, что количество информации о рассматриваемых в данном материале системах различается. Системы свободно распространяемого ПО имеют малоинформативное описание, тогда как компании,

представляющие коммерческие продукты очень подробно описывают функции системного комплекса для моделирования. Потому есть вероятность, что некоторые возможности описанных выше систем Scilab, GNU Octave и Maxima не упомянуты, либо раскрыты не в полной степени.

После рассмотрения систем моделирования обнаруживается общность ключевых критериев, определяющих их характеристики. Системы могут быть классифицированы по ценовой категории: на платные и бесплатные программные решения. И платные, и бесплатные системы предлагают во многом аналогичный друг другу инструментарий. Бесплатные системы обладают открытым исходным кодом, что обуславливает доступность расширяемой библиотеки, в то время как платные работают с закрытым кодом. Однако у GNU Octave присутствует существенный недостаток, критичный для разработки имитационных моделей: отсутствие библиотеки блоков. Работа с программой предполагает использование консоли, что увеличивает трудоёмкость в освоении программы. Это также лишает имитационную модель важного качественного аспекта — наглядности. В работе с одним лишь кодом взаимосвязи между компонентами моделируемой системы не так очевидны, как при использовании блочной системы.

Стоит так же отметить специфику и ориентированность компьютерных систем на целевую аудиторию. MATLAB, Scilab и GNU Octave наиболее ориентированы на инженерные расчёты, Mathematica, Maple и Maxima на математические расчёты, а STATISTICA на аналитику статистических данных. Для образовательных целей наиболее подходят бесплатные аналоги Scilab, Maxima, тогда как в промышленности доминируют коммерческие решения MATLAB или Mathematica [57].

Самым распространенным средством разработки в технических компаниях и научной среде является программный комплекс MATLAB. Система обладает обширной коллекцией пакетов программ и большим количеством обучающих материалов различной направленности.

В ходе исследования было принято решение использовать для моделирования размерно-качественных показателей цифрового прототипа круглого лесоматериала продукты фирмы MATLAB.

1.4.2.1 Программные комплексы, используемые для систем автоматизированного проектирования (САПР) и 3D моделирования

На сегодняшний день графические продукты становятся всё более популярны, как среди пользователей, так и среди разработчиков. Изначально трёхмерная графика интенсивно развивалась в игровой индустрии, но сейчас используется повсеместно: строительство, наука, медицина, реклама, СМИ, промышленность, образование. Благодаря большому спросу на данную технологию, у разных программ появилось специальное назначение с быстроразвивающимся функционалом. Программные среды разработки, предназначенные трёхмерного моделирования, обладают большим разнообразием выбора для работы. Рассмотрим наиболее востребованные программные комплексы, используемые для систем автоматизированного проектирования и трёхмерного моделирования. Сравнительная характеристика систем трёхмерного моделирования представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сравнительная характеристика систем 3D моделирования

Критерии	3ds Max	Blender	Cinema 4D	Creo	Winds 3D	Компас 3D	SolidWorks
1	2	3	4	5	6	7	8
Мультиплатформенность	—	+	+	+	+	—	—
Эргономичный интерфейс	—	+ / —	+	—	+	—	—
Открытое ПО	—	+	—	—	+	—	—
Расширения	+	+	+	+	+	—	—
Назначение	Интерьер/Архитектура	Универсальный	Анимация	Промышленное моделирование	Моделирование объекта	Инженерное моделирование	Инженерное моделирование

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Демоверсия	Демоверсия	+	+	Демоверсия	+	+	Демоверсия
Страна	США	Нидерланды	Германия	США	—	РФ	Франция
Цена лицензии	87108 руб./г. [58]	— [59]	46638.13 руб./г. [60]	2780 долл./г. [61]	— [62]	194000 р./г. [63]	от 467 000 руб. /г. [64]

Рассмотрим подробнее результаты сравнительной характеристики, приведенной в табл. 3. Не все системы поддерживают мультиплатформенность. Например, такие программы, как Компас 3D, SolidWorks и 3ds Max ориентированы исключительно на ОС Windows. Это ограничивает их использование в средах, где требуется гибкость выбора операционной системы. Удобство интерфейса варьируется в зависимости от целевой аудитории. Cinema 4D и Winds 3D отличаются интуитивным управлением, что делает их подходящими для начинающих пользователей. Однако Blender, несмотря на продуманную структуру интерфейса, требует времени для освоения из-за широкого функционала и универсальности. Традиционно открытое программное обеспечение заявлено у некоммерческих программных продуктов - Blender и Winds 3D. Тогда как платные программы предоставляют исключительно закрытое программное обеспечение. Данная позиция разработчиков напрямую влияет на развитие плагинов и расширений для программ. Наиболее развито пользовательское сообщество у свободно распространяемых систем Blender и Winds 3D. Специализированные инженерные системы Компас 3D, Creo и SolidWorks имеют ограниченные возможности расширения функционала. Выбор программной среды определяется задачами пользователя. Для инженерного проектирования наиболее подходят Компас 3D, Creo и SolidWorks, так как они обеспечивают техническую точность для промышленных изделий. Создатели продуктов мультимедиа и визуальных эффектов чаще выбирают Cinema 4D, так

как функционал данной программы ориентирован на создание анимации, игр и рекламы. Система 3ds Max демонстрирует эффективность в моделировании пространств. Среда разработки Blender охватывает широкий спектр функций, но уступает узкоспециализированным программам в качестве результата [65, 66]. Так же Blender и Winds 3D подходят для образовательных целей, так как не отличаются повышенной сложностью освоения, универсальны и общедоступны.

Blender и Winds 3D доступны без ограничений. Программные комплексы 3ds Max, SolidWorks и Creo предоставляют временный доступ к базовому функционалу. Отличительной особенностью Компас 3D является бессрочная лицензия, тогда как Cinema 4D, Creo и SolidWorks требуют ежегодной оплаты лицензии [67].

Подводя итог, можно сделать вывод, что рынок программных сред для автоматизированного проектирования и трёхмерного моделирования достаточно обширен, что свидетельствует о его динамическом развитии. Поэтому ключевыми критериями выбора системы являются соответствие предлагаемого функционала программы целям проекта, техническая совместимость и финансовая целесообразность, а также доступность учебных материалов [65].

Отдельно следует отметить, что универсального решения в выборе системы 3D моделирования не может быть, а на практике часто комбинируют использование нескольких программ в одном проекте для достижения оптимального результата.

Для реализации задач исследования было принято решение использовать для разработки цифрового прототипа хлыста ели программный комплекс для трёхмерного моделирования Blender.

1.4.3 Анализ применения технологии цифровых двойников

Благодаря процессам компьютеризации и цифровизации в конце XX – начале XXI вв. многие производства лесного сектора получили возможность

собирать и хранить базы данных, содержаие информацию об основных характеристиках используемого сырья и выпускаемой продукции. На основе этих баз появилась идея создания виртуального эквивалента физического продукта. Она была представлена в 2002 г. ученым М. В. Гривзом. Он выделил три основных компонента цифрового двойника (digital twin). Во-первых, реальный физический объект, копию которого будут создавать. Во-вторых, виртуальный объект, созданный по образу и подобию реального. В-третьих, система взаимодействия между физическим и виртуальным объектом [68-70].

Технология цифровых двойников (ЦД) уверенно завоевывает сферу промышленности в различных отраслях экономики. За счет использования виртуальных систем на промышленных объектах снижаются производственные затраты, повышается эффективность производства, контролируется состояние оборудования, что снижает риск аварий и задержек, улучшается качество продукции [71-77].

Лидером по интеграции технологии цифровых двойников в производство является автомобилестроение. Так, компания Maserati внедрила ПО Siemens при производстве модели Ghibli, сократив время разработки на треть [68]. Компания Tesla также активно интегрирует технологию ЦД при изготовлении электромобилей. Производитель размещает на машине датчики, которые позволяют дистанционно контролировать состояние автомобиля и предотвращать будущую поломку [79]. Ведущей российской разработкой является проект по созданию серии автомобилей Aurus. В основе данной серии автомобилей заложены технологии ЦД, позволившие провести большое количество виртуальных испытаний. Благодаря этому образец модели Aurus Senat прошел натурные испытания с первой попытки [80]. После успешной реализации проекта внутри России, сотрудники Центра компетенций НТИ СПбПУ и компании CompMechLab успешно выполнили обновление кузова автомобиля китайской фирмы BAIC Group. Российские инженеры оптимизировали элементы конструкции и материалы деталей, проведя более 1500 виртуальных испытаний на цифровом двойнике автомобиля и достигли снижения массы кузова на 30 кг,

сокращения натуральных испытаний в 25 раз и как следствие, уменьшение временных затрат на разработку и вывод продукции на рынок [81, 82].

В авиационной промышленности активно внедряют технологию ЦД на стадиях проектирования, изготовления и обслуживания двигателей. Отечественные организации «Ростех» и «ОДК» разрабатывают двигатели с применением ЦД линейку двигателей ПД-14, SaM146, а также Су-57, что позволяет сократить сроки производства опытных образцов и позволяет быстрее ввести новое изделие в эксплуатацию без потери качества [83].

В судостроении заявлен проект разработки «цифровой верфи» Средне-Невским Судостроительным Заводом (СНСЗ). Целью проекта является проведение виртуальных испытаний цифровых двойников судов, что снизит финансовую нагрузку на предприятие и позволит оптимизировать конфигурацию образцов [84].

Технология цифровых двойников успешно зарекомендовала себя в сфере энергопотребления. Например, фирма Priva ECO (Нидерланды) в кооперации с Microsoft Azure разработала систему оптимизации расхода потребления электроэнергии при эксплуатации здания с учётом занятости помещений, характера использования помещения и погодных условий [83].

Отдельным направлением развития технологии ЦД служат урбанистические проекты. Первым цифровым городом на базе французского ПО Dassault Systemes стал Сингапур. Цель проекта заключается в планировании инфраструктурных и строительных работ, учитывающих множество факторов текущей и будущей инфраструктуры. С помощью цифровых моделей городов проигрываются сценарии чрезвычайных ситуаций, например, пожаров, природных катаклизмов, выхода из строя энергетических объектов и прочее. Цифровые аналоги также имеют такие города как Роттердам, Стокгольм и Бостон [83, 85, 86].

В нефтегазовой области цифровые двойники применяются повсеместно: для добычи сырья, его транспортирования и обработки. Российские нефтяные компании «Лукойл», «Роснефть», «Татнефть», «Газпром нефть» активно внедряют данную технологию. Компания «Роснефть» запустила проект

«цифрового месторождения» в Башкирии (Илишевское месторождение), а «Татнефть» - Ромашкинского месторождения [87]. Значительные достижения в технологических решениях достигло предприятие «Газпром нефть». Ими реализован Центр управления добычей, позволяющий контролировать работу скважин, анализировать данные, поступающие с различных объектов предприятия, оперативно устанавливать сбои в работе оборудования. На этапе переработки нефти запущены проекты цифровой установки гидроочистки бензина (Московский НПЗ) и установки первичной переработки нефти (Омский НПЗ). Отдельным направлением развития можно выделить проект BitumPlant (Шимкент, Казахстан), представляющий собой роботизированный завод по производству битума с удаленным управлением [83, 88]. Компания «Сибур» внедряет цифровую модель нефтехимического производственного комплекса в Тобольске. Цифровая модель оцифровывает производственные линии по изготовлению полипропилена и полиэтилена [89].

С каждым годом примеров применения технологии цифровых двойников становится всё больше. Если изначально данная концепция развивалась в рамках аэрокосмической отрасли, то сейчас данная технология многократно доказала свою эффективность в большинстве направлений человеческой деятельности: строительстве и урбанизации, добывающей и перерабатывающей промышленности, автомобилестроении и энергетике. Применение технологии цифровых двойников способствует:

- проведению глубокой аналитики разных конфигураций системы;
- оперативной модификации параметров изделий;
- проведению виртуальных испытаний на любом этапе разработки, что существенно снижает производственные издержки [90].

Однако, в ходе исследования не было найдено примеров применения технологии цифровых двойников в секторе лесной промышленности. В коммерческом сегменте есть фирмы имитирующие отдельные процессы с использованием ИИ [15]. А среди научных публикаций встречаются работы, которые направлены на развитие процессов цифрового прототипирования в

лесозаготовке и деревообработке [38-44]. Что свидетельствует о наличии запроса на цифровизацию лесной промышленности. Однако следует отметить, что наиболее часто исследования посвящены отдельным элементам и процессам деревообработки, единичны работы по цифровому представлению лесоматериала в том или ином виде. Однако до сих пор не разработано технологии цифрового прототипирования формы ствола обрабатываемого дерева, то есть сырья, на котором базируется вся лесная промышленность. Известно, что на качество лесоматериала влияет множество факторов, таких как природно-климатический и наличие пороков. Кроме того, большую роль играет породный состав и особенности формы хлыста. Ранее инженеры сталкивались с невозможностью системного учета всех этих факторов для определения точной нагрузки на рабочие органы лесопромышленных станков. В условиях цифровизации и развития средств обработки больших данных такая опция стала считаться реальной. Исследователи приступили к моделированию более совершенного оборудования, созданию виртуальных объектов для получения исходных данных по процессам заготовки и обработки лесоматериала.

1.5 Выводы по первой главе

Анализ научных и практических проблем в лесном секторе позволил сделать следующие выводы.

1. В настоящее время основным направлением совершенствования технологий лесного сектора, как и любых отраслях, является массовое использование информационных технологий.

2. Лесопромышленные технологии, в силу своей специфики наиболее полно и достоверно описываются методами имитационного моделирования, а с учетом современных тенденций должны дополняться методами искусственного интеллекта, нейронных сетей, цифрового прототипирования, что необходимо использовать в научных исследованиях.

3. Первостепенное значение в лесопромышленных технологиях имеет предмет труда – лесоматериал, с которого начинается проектирование любого оборудования, поэтому для интеграции в современные имитационные модели технологических процессов и оборудования необходимы аналогичные модели предмета труда, что сводится к созданию цифрового прототипа лесоматериала.

4. На данный момент цифровой прототип древесного ствола, отражающий размерно-качественные характеристики реального хлыста дерева не создан, что не позволяет в полной мере использовать достижения информационных технологий при проектировании оборудования, следовательно, такая задача является чрезвычайно актуальной для современных научных исследований.

5. Сравнительный анализ компьютерных средств моделирования, показал, что для дальнейшей разработки системы моделирования размерно-качественных характеристик лесоматериала в наибольшей степени подходит программный комплекс MATLAB, а для реализации трёхмерного представления прототипа лесоматериала рекомендуется программный комплекс BLENDER.

Таким образом заключительные выводы по первой части позволяют конкретизировать задачи, решению которых посвящены последующие главы диссертации.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРНО-КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОМАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ ХЛЫСТА ЕЛИ

2.1 Обоснование входных параметров для моделирования хлыста ели

В технологических процессах лесотехнического сектора экономики в настоящее время рассматривается вопрос не только создания новых эффективных машин и технологий, но и переработки предмета труда – лесоматериала. Это придает свою специфику данной отрасли. Характеристики предмета труда определяют параметры технологических линий оборудования, а также вид готовой продукции. Отсюда следует определяющая роль предмета труда для лесопромышленных технологий. В распоряжении проектных организаций имеется огромное количество различных размерно-качественных характеристик лесоматериалов, однако для реального использования в цифровом прототипировании требуются не столько разрозненные данные, сколько их закономерности, чтобы строить адекватные цифровые прототипы предмета труда для различных целей.

Любому лесному производственному процессу, помимо валки деревьев и обрезки сучьев, предстоит работа с первичным круглым лесоматериалом. К круглым лесоматериалам и дальнейшей продукции лесозаготовительной промышленности предъявляется ряд требований, изложенных в государственных стандартах, устанавливающие назначение, нормы, размеры и пороки древесины [91-100]. В отечественном производстве наиболее популярны хвойные породы деревьев, а именно ель и сосна. Поэтому в ходе данной работы исследовались размерно-качественные показатели хвойного круглого лесоматериала, в частности хлыста ели. Хлыстами называют очищенные от сучьев, обезвершиненные и

отделенные от пня стволы поваленных деревьев [101]. Потому характерными чертами хлыста являются в первую очередь толщина и длина.

Параметры диаметра ели на высоте 1,3 м даны в ГОСТ Р 57737-2017, где предложены в диапазоне от 8 до 72 см [91], однако в других источниках, например, в табл. 140 Лесотаксационного справочника диаметр ели на высоте 1,3 м представлен в диапазоне от 8 до 56 см, а диаметр нижнего торца соответственно от 10 до 70 см [102]. Нетрудно заметить, что согласно ГОСТ Р 57737-2017 максимальный диаметр ели на высоте груди 72 см больше, чем максимальный диаметр нижнего торца ели, представленный в Лесотаксационном справочнике, где максимальное значение указано 70 см. Очевидно, что совместное применение таких данных приведет к ошибке.

Отдельной проблемой исследования служило то, что авторы чаще всего дают описание показателей «хвойных пород», либо живых деревьев ели, как например, Н.П. Анучин «Лесная таксация» [103] или В.К. Захаров «Таблицы сбег и объема стволов ели по бонитетам» [104]. ГОСТ 9463-88 определяет соответствие круглых лесоматериалов в зависимости от их назначения в диапазоне длин от 0,75 до 13 м [92], тогда как своей работе В.К. Захаров указывает длину стволов ели от 4 до 37 м [104], характеризуя объем и сбеги стволов ели в зависимости от бонитета. Очевидно, что такая разница значений параметра длины обусловлена разницей предмета описания, в случае государственного стандарта подразумеваются лесоматериалы различного назначения, а в случае проф. В.К. Захарова живые стволы ели в насаждениях разного типа бонитета. Однако именно такие разобщенные источники представляют проблему при формировании размерно-качественных характеристик хлыста ели.

Длина сортиментов обуславливается различными причинами (наличием пороков и расположением их по хлысту, сортиментным планом, наличием перерабатывающих производств, действующими стандартами). Длина круглых лесоматериалов, поступающих в цеха лесопромышленных предприятий, распределяется по нормальному закону [105]. В последних исследованиях по

вопросу устойчивой зависимости длины хлыста ели от нижнего диаметра ствола установлены слишком большие разбросы в данных, исходя из этого автор указывает на нецелесообразность использования данной зависимости между параметрами в практическом применении [45]. В лесной таксации толщина ствола определяется через показатель его диаметра на высоте груди и наряду с высотой дерева является основным размерно-качественным показателем ствола. С точки зрения нормативной документации значения длины круглых лесоматериалов установлены в зависимости от их назначения в диапазоне длин от 0,75 до 13 м [92].

Таким образом, не обнаружено устойчивой закономерности, устанавливающей связь между величиной толщины круглого лесоматериала и длиной хлыста. Выявлено достаточно много табличных данных в государственных стандартах и научной литературе. Чаще всего данные структурированы в таблицы объема или таблицы сбеге стволов. Но при приведении разрозненных данных в соответствие друг с другом встречаются наглядные противоречия, что приводит к некорректным расчетам. Данное расхождение можно объяснить тем, что стандартная база рассчитана на все виды хвойных пород и редко встречаются нормы исключительно для хлыста ели. То же самое наблюдается и в научной литературе, где авторы стараются дать как можно более обобщенный материал, описывая разные группы бонитета дерева, что дает значительный разброс значений, либо так же, как и государственные стандарты используют универсальную терминологию, например, «хвойные породы». Отдельной проблемой исследования служит то, что многие авторы указывают характеристики живых деревьев ели, как например, Н.П. Анучин «Лесная таксация» или В.К. Захаров «Таблицы сбеге и объема стволов ели по бонитетам», а ГОСТ 9463-88 определяет соответствие круглых лесоматериалов в зависимости от их назначения. Очевидно, что разница значений параметра длины в этих источниках обусловлена разницей предмета описания, в случае государственного стандарта подразумеваются лесоматериалы различного назначения, а в случае профессора Захарова живые стволы ели в насаждениях разного типа бонитета.

Однако именно такие разобщенные источники представляют проблему при формировании размерно-качественных характеристик хлыста ели. Поэтому в данной работе предлагается использовать статистические величины, где наблюдается соответствие между значениями длины и диаметров хлыстов на разной высоте.

Для определения параметров диаметра на высоте 1,3 м от нижнего торца и параметров диаметра нижнего торца предлагается использовать Лесотаксационный справочник табл. 140 «Диаметры стволов на высоте пня в зависимости от пня на высоте 1,3 м». Данный источник представляет особый интерес, так как приведены данные конкретно для породы ели и представлено статистическое соотношение между диаметром на высоте 1,3 м, предложенным в диапазоне значений от 8 до 56 см и диаметром на высоте пня, что эквивалентно диаметру нижнего торца, представленному в диапазоне значений от 10 до 70 см [102].

Для установления диапазона значений длины предлагается использовать данные, приведенные в ГОСТ 9463-88, который определяет соответствие круглых лесоматериалов в зависимости от их назначения в диапазоне длин до 13 м [92], так как хлыст ели интересует нас прежде всего с точки зрения его дальнейшей реализации в производственном процессе, то имеет смысл ориентироваться на государственный регламент, предъявляющий технические требования к круглым лесоматериалам хвойных пород, предназначенным для использования в различных отраслях промышленности и строительства.

2.2 Обоснование выходных параметров для моделирования хлыста ели

Хлыст обычно не является товарной продукцией, поэтому для определения его дальнейшего назначения устанавливают сортность лесоматериала в соответствии с наличием или отсутствием пороков дерева.

Согласно, ГОСТ 2140-81, параметрами, определяющими форму ствола дерева, являются кривизна, овальность, закомелистость, нарост и сбежистость. Такой порок, как нарост является нетипичным пороком для породы ель. Верифицируемых данных по наростам, встречающимся на деревьях породы ель нет. В основу процесса моделирования формы ствола приняты кривизна, овальность, закомелистость и сбежистость, которые коррелируют в той или иной степени с длиной хлыста и толщиной, измеренной на разной высоте от основания ствола [106]. Обычно выделяют три основных диаметра ствола: диаметр нижнего торца или основания, диаметр на высоте груди или высоте 1,3м и верхний, вершинный или диаметр верхнего торца. Верхний диаметр является одним из основных показателей качества круглых лесоматериалов. Верхний диаметр определяет диаметр цилиндра, который может быть вписан в бревно, размеры и выход пиломатериалов из пиловочных бревен, а также количество отходов при окорке [107]. Потому данный показатель является определяющим фактором при рассмотрении такого порока дерева, как овальность. Под овальностью принято считать значительное отклонение поперечного сечения ствола от округлой формы, сопровождающееся смещением сердцевины с центра в периферийную зону. Встречается у всех пород [107].

Овальность ствола измеряют по разности между наибольшим и наименьшим диаметрами соответствующего торца лесоматериала [96]. В формуле 2.1 отражено измерение овальности ствола. Получается, что овальность можно рассматривать, как разницу двух диаметров, так как для расчета требуется два диаметра одного верхнего торца, то можно использовать один ряд значений.

$$O = d_T - d_{T\perp}, \quad (2.1)$$

где O – степень овальности хлыста;

d_T – диаметр торца;

$d_{T\perp}$ – поперечный диаметр торца.

Однако, основанием для определения наличия овальности служит отношение преобладания большего значения диаметра к меньшему, из чего следует предположить, что расчетная формула должна иметь формулы 2.2:

$$O = dt / dt_{\perp}, \quad (2.2)$$

где O – степень овальности хлыста;

dt – диаметр торца;

dt_{\perp} – поперечный диаметр торца.

В таблице 4 ГОСТ 2708-75 Лесоматериалы круглые [94] изложены объемы круглых лесоматериалов, получаемых из вершинной части ствола для разных длин. Однако, интерес вызывает не вершинная часть ствола, как таковая, потому что хлыст является обезвершиненной зоной ствола дерева, а сам срез. Можно предположить, что толщина вершинной части ствола эквивалентна вершинному диаметру круглого лесоматериала. Однако в источнике задан диапазон значений вершинного диаметра от 6 до 15 см [94], что не согласуется с ранее установленными параметрами значений диаметра основания и диаметра на высоте 1,3 метра, формируя высокую степень сбежистости.

Сбежистость определяется, как постепенное уменьшение диаметра круглого лесоматериала в направлении от комля к вершине, приходящееся на единицу длины ствола превышающее нормальный сбег, равный 1 см на 1 м длины сортимента [108].

Методов для измерения сбега ствола дерева предложено достаточно много. Профессором В.К. Захаровым составлены массовые таблицы сбега и объема стволов ели по бонитетам на основе обмеров модельных деревьев [104].

На практике чаще всего используют средний сбег, который показывает изменение диаметра в среднем на единицу длины. Значение среднего сбега получают путем деления разности двух диаметров (верхнего и нижнего), взятых на протяжении длины ствола, на длину этой части ствола и выражают в сантиметрах на 1 м длины. Таким образом, средний сбег S_{cp} равен разности между диаметрами нижнего D_n и верхнего d_b торцов, деленной на длину бревна L , как представлено в формуле 2.3.

$$S_{cp} = \frac{D_n - d_b}{L}, \quad (2.3)$$

где S_{cp} – средний сбег хлыста, см/м;
 D_n – диаметр нижнего торца, см;
 d_b – диаметр верхнего торца, см.

Для комлевых бревен диаметр нижнего торца D_n берется на расстоянии 1 м от комля, а для всех остальных – в нижнем торце [96]. Следовательно, средний сбег S_{cp} равен разности между диаметром на расстоянии 1 метра от нижнего диаметра D_n и верхним диаметром d_b , деленной на длину бревна L , как отображено в формуле 2.4.

$$S_{cp} = \frac{d_1 - d_b}{L - 1}, \quad (2.4)$$

где S_{cp} – средний сбег хлыста, см/м;
 d_1 – диаметр на высоте 1,0 м ствола, см;
 d_b – диаметр верхнего торца, см;
 L – общая длина, м.

В виду отсутствия статистических данных о диаметре на высоте 1 метра следует преобразовать выражение, как представлено в формуле 2.5.

$$S_{cp} = \frac{d_{1,3} - d_b}{L - 1,3}, \quad (2.5)$$

где S_{cp} – средний сбег хлыста, см/м;
 $d_{1,3}$ – диаметр на высоте 1,3 м, см;
 d_b – диаметр верхнего торца, см;
 L – общая длина сортимента, м.

При дальнейшем расчёте степени сбежистости ствола будет использована формула 2.5. Расчёт среднего сбega при максимальных параметрах хлыста с

учётом значений параметра вершинного диаметра по ГОСТ 2708-75 представлен в формуле 2.6.

$$S_{\text{cp}} = \frac{56-15}{13-1,3} = 3,5 \text{ см/м} \quad (2.6)$$

Полученное значение среднего сбега (S_{cp}) превышает показатель нормального сбега в 3,5 раза, когда в норме сбега равен 1 см на 1 м длины ствола дерева. Для универсальности системы моделирования цифрового прототипа хлыста ели по формуле 2.7 приведен расчет варианта, при котором может быть смоделирован ствол ели с максимальными параметрами длины и диаметра на высоте 1,3 м, при котором сбега хлыста может быть равен норме, то есть 1 см/м.

$$S_{\text{cp}} = \frac{56-44}{13-1,3} = 1,025 \text{ см/м} \quad (2.7)$$

Таким образом, для определения параметров вершинного диаметра наиболее целесообразно использовать диапазон значений от 6 до 44 см [84]. Очевидно, что отдельно следует уточнить минимальное значение длины цифрового прототипа хлыста ели с учётом нормального сбега и с возможным наличием закомелистости. Рассмотрим вариант, предложенный в формуле 2.8, при котором может быть смоделирован ствол ели с закомелистостью и с минимальными параметрами длины и диаметров $d_{1,3}$ и $d_{\text{в}}$ при котором сбега хлыста может быть равен норме, то есть 1 см/м.

$$S_{\text{cp}} = \frac{8-6}{3,3-1,3} = 1 \text{ см/м} \quad (2.8)$$

Произведём расчёт по формуле 2.9, где может быть смоделирован ствол ели без закомелистости и с минимальными параметрами длины и диаметров $D_{\text{н}}$ и $d_{\text{в}}$ при котором сбега хлыста может быть равен норме, то есть 1 см/м.

$$S_{\text{cp}} = \frac{D_{\text{н}}-d_{\text{в}}}{L} = \frac{10-6}{4} = 1 \text{ см/м} \quad (2.9)$$

Таким образом для учёта всех возможных вариантов генерации хлыста ели следует установить диапазон значений длины в диапазоне от 3,3 до 13 м [92].

Рассмотрим следующий порок формы ствола – закомелистость. Это частный случай сбежистости на небольшом участке ствола, встречающийся у всех пород дерева [108]. Так, Полубояринов О.И. и Вакин А.Т. определяют закомелистость, как резкое увеличение диаметра комлевой части круглых лесоматериалов, когда диаметр комлевого торца в 1,2 раза и более превышает диаметр сортимента, измеренный на расстоянии 1 м от этого торца. Закомелистость выделяют округлую и ребристую. Округлую и ребристую закомелистость измеряют по разности между диаметрами лесоматериала, измеренными у комлевого торца и на расстоянии 1 м от этого торца [96].

Ребристую закомелистость допускается, если это обусловлено спецификой сортимента, измерять по разности между наибольшим и наименьшим диаметрами комлевого торца лесоматериала или отношением диаметра комлевого торца к диаметру на расстоянии 1 м от этого торца [96]. Выбран второй способ измерения ребристой закомелистости, схожий с измерением округлой закомелистости, так как достаточной выборки по наименьшему диаметру комлевого торца хлыста ели не обнаружено. Формула расчета степени закомелистости хлыста, C_3 (2.10) представлена ниже [109]:

$$C_3 = \frac{D_n - d_1}{L}, \quad (2.10)$$

где D_n – наибольший диаметр нижнего торца;

d_1 – диаметр на высоте 1 м;

L – длина, 1 м.

Так как статистические данные о диаметре на высоте 1 метра отсутствуют, а основанием для определения наличия закомелистости служит отношение диаметра нижнего торца D_n к диаметру на высоте 1 метра превышающее 1,2, то следует преобразить выражение по ГОСТ 2140-81, как представлено в формуле 2.11.

$$C_3 = D_n / d_{1,3} \quad (2.11)$$

где C_3 – степень закомелистости хлыста;
 D_n – наибольший диаметр нижнего торца, см;
 $d_{1,3}$ – диаметр на высоте 1,3 м, см.

Таким образом параметр степени закомелистости характеризуется значениями диаметра нижнего торца и диаметра на высоте 1,3 м. В дальнейшей работе принята формула 2.11 для расчета степени закомелистости хлыста.

Помимо статистического описания характеристик дерева, в различных источниках предлагаются так же и расчетные формулы для установления диаметра ствола дерева. Например, расчет диаметра ствола, предложенный Н.П. Анучиным, представлен в формуле 2.12. На основе массовых обмеров хлыстов автор учебника [103] установил, что у хвойных пород диаметр на высоте 1,3 м, равен коэффициенту 0,8 диаметра в комлевом торце.

$$D_{1,3} = 0,8D_{0,15}, \quad (2.12)$$

где $D_{1,3}$ – диаметр на высоте 1,3 м от комлевого среза, см;
 $D_{0,15}$ – диаметр комлевого торца при средней высоте пня 15 см.

Такие соотношения комлевых диаметров и диаметров на высоте 1,3 м от шейки ствола варьируют на +/-9%. Автор предлагает единый коэффициент соотношения диаметра на высоте груди и диаметра нижнего торца для любых хлыстов хвойных пород, то есть одна и та же формула для сосны, пихты, лиственницы и ели.

Для определения параметров диаметра нижнего торца предлагается использовать Лесотаксационный справочник табл. 140 «Диаметры стволов на высоте пня в зависимости от пня на высоте 1,3 м». Настоящий источник представляет информацию конкретно для породы ель и приведено статистическое соотношение между диаметром на высоте 1,3 м, предложенным в диапазоне значений от 8 до 56 см и диаметром на высоте пня, что эквивалентно диаметру нижнего торца, представленному в диапазоне значений от 10 до 70 см [102].

Следующий порок формы ствола, требующий рассмотрения, - это кривизна. Термин кривизны ствола по ГОСТ 2140-81 определяется как отклонение продольной оси сортимента от прямой линии, обусловленное искривлением ствола, или как искривление ствола сортимента по длине [96].

Выделяют простую кривизну, характеризующуюся только одним изгибом сортимента, и сложную кривизну, характеризующуюся двумя и более изгибами сортимента в одной или нескольких плоскостях. Согласно п. 4.3.4 ГОСТ 2140-81, простую кривизну измеряют по отклонению от прямолинейности сортимента в месте наибольшего искривления и выражают в сантиметрах на 1 м длины искривления или в процентах от длины искривления. Сложную кривизну характеризуют величиной наибольшего искривления, измеряемого аналогично простой кривизне.

Согласно, ГОСТ 22298-76, для лесоматериалов хвойных пород, предназначенных для экспорта, нормы допускаемого порока по кривизне составляют до 1% для первого сорта и до 1,5% для 2 и 3 сортов [95]. Кривизна встречается у всех пород [108].

Степень простой кривизны хлыста, z , определяется ГОСТ 2140-81 и рассчитывается по формуле 2.13.

$$z = \frac{a}{L}, \quad (2.13)$$

где a – величина стрелы максимального прогиба;

L – длина хлыста.

Расчет простой кривизны связан со значением параметра длины сортимента и величины стрелы максимального прогиба. Последнее источниками никак не регламентировано, из чего сделан вывод о применении к данному параметру нормального распределения.

Можно сделать вывод, что размерно-качественные характеристики лесоматериала определяют производственные процессы. Пороки древесного ствола оказывают влияние на режимы работы оборудования и качество готовой

продукции. Так, закомелистость является частой причиной заклинивания бревна в роторе станка [109], затрудняет использование круглых лесоматериалов по назначению, увеличивает количество отходов при распиловке и лущении круглых лесоматериалов и раскрое пилопродукции [96]. Ребристость комля способствует появлению ударных нагрузок при окорке, резкому снижению качества окорки, уменьшению скорости работы станка и, следовательно, его производительности [109]. Сбежистость увеличивает количество отходов при распиловке и лущении круглых лесоматериалов и раскрое пилопродукции [96]. Овальность также может затруднять использование круглых лесоматериалов и увеличивать количество отходов при лущении [96], а также приводить к неравномерной усушке и повышенной растрескиваемости [108]. Кривизна затрудняет использование лесоматериала по назначению и снижает предел прочности на сжатие для лесоматериалов, используемых в круглом виде [96]. Таким образом, каждый порок древесного ствола определяет его дальнейшую судьбу, что неминуемо влияет на качество и количество выпускаемой продукции.

Для создания алгоритма моделирования предмета труда следует разработать его принципиальную схему. Приведенная на рисунке 2.1 схема наглядно показывает последовательность процесса построения модели и основные взаимосвязи параметров.

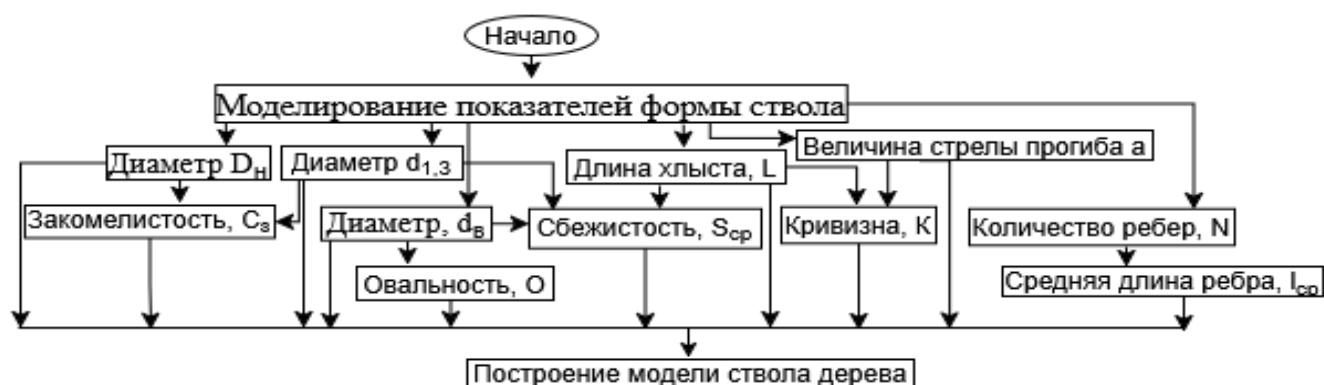


Рисунок 2.1 – Схема процесса построения модели формы ствола хлыста ели

Как видно из схемы, показатель длины L и толщины хлыста $d_{1,3}$ являются определяющими для всех показателей формы хлыста. Показатель кривизны,

оцениваемый параметром величины стрелы прогиба, коррелирует с длиной хлыста. Сбежистость зависит от длины и от толщины ствола. Важным показателем является закомелистость, которая определяется соотношением между нижним диаметром и диаметром на высоте 1,3 метра [110]. При ребристой закомелистости так же количеством ребер, а вдоль ствола - длиной ребра, до места, где высота ребра становится равной нулю. На основе схемы была разработана схема корреляционных связей для моделирования параметров формы хлыста, показанная на рисунке 2.2.

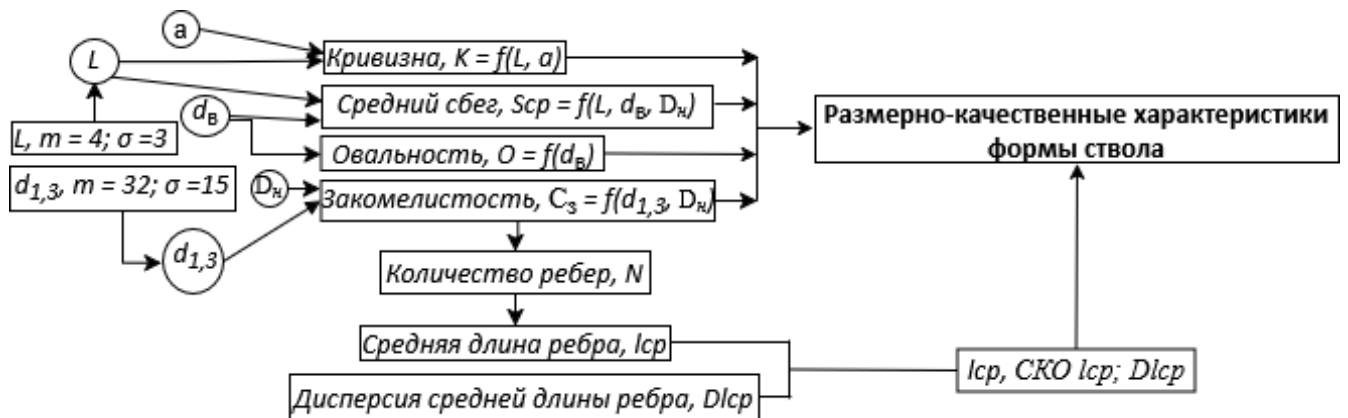


Рисунок 2.2 – Схема корреляционных связей для процесса моделирования

Таким образом, параметрами моделирования, определяющими форму ствола породы ель, являются следующие размерно-качественные показатели.

1. Длина хлыста, L , м.
2. Толщина на уровне 1,3, $d_{1,3}$, см.
3. Диаметр верхинный, $d_{\text{в}}$, см.
4. Диаметр нижний, $D_{\text{н}}$, см.
5. Сбежистость, S_{cp} , см/м.
6. Величина стрелы прогиба, a .
7. Кривизна, K .
8. Овальность, O .
9. Закомелистость, $C_з$.
10. Количество ребер, N ед.

11. Средняя длина ребра, м; $l_{cp} = f(C_3)$.

12. СКО средней длины ребра, см, Dl_{cp} .

13. Длина i -го ребра, м; l_i .

Как было определено, из приведенного списка основными и исходными параметрами для моделирования являются длина и толщина ствола хлыста. Первоначально эти параметры в прикладных задачах задаются путем статистического моделирования с заданным законом распределения случайной величины. Аналогично, методом статистического моделирования определяются параметры количества и длины i -го ребра, l_i каждого ребра закомелистой части хлыста.

2.3 Методы моделирования размерно-качественных характеристик хлыста ели

В работе использованы методы нейронных сетей, визуально-блочного имитационного моделирования. Для обработки экспериментальных данных использованы методы математической статистики. Программная реализация нейронной сети и имитационной модели выполнена в среде компьютерной математики MATLAB.

2.4 Формирование статистических данных для моделирования размерно-качественных показателей хлыста ели

На подготовительном этапе разработки нейронной сети необходимо сформировать набор обучающих выборок с перечнем определенных выше размерно-качественных показателей. В данном случае следовало собрать размерно-качественные показатели для хлыстов породы ель. В результате сформированы статистические данные размерно-качественных характеристик 100 хлыстов ели. В полном объеме банк данных по размерно-качественным

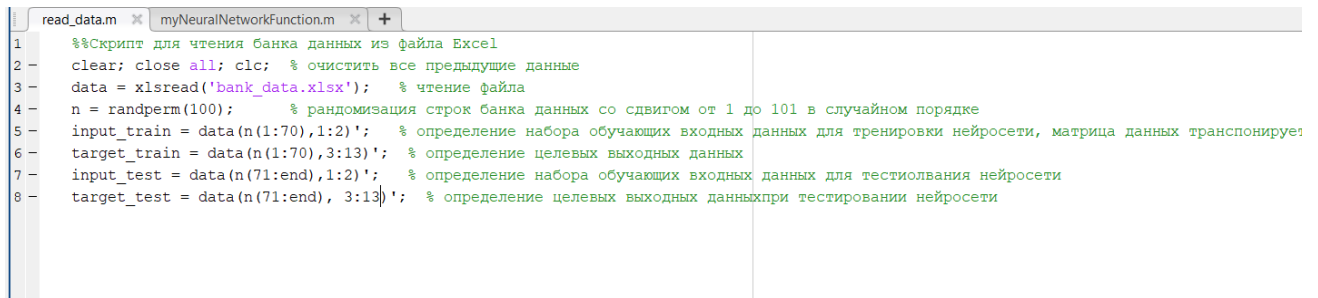
характеристикам формы хлыстов ели приведен в приложении А, сокращенно информация представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Банк данных по размерно-качественным характеристикам формы хлыстов ели

№ п.п.	d1,3, см	L, м	дв, см	d'в, см	Dн, см	a	O	K, %	Sep, см/м	C ₃	N, ед	Ср. дл. ребра, ср, см	СКО ср, Dср, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	56	10	44	42	68	0,02	1,0	0,2%	1,4	1,2	2	63	15
2	17	4,5	13	12	21	0,03	1,1	0,7%	1,3	1,2	2	61	15
3	40	6,5	35	33	51	0,02	1,1	0,3%	1,0	1,3	3	87	15
4	12	4	9	7	16	0,06	1,3	1,5%	1,1	1,3	2	100	15
5	29	8,5	22	20	38	0,07	1,1	0,8%	1,0	1,3	4	103	15
6	24	5,3	20	18	30	0,02	1,1	0,4%	1,0	1,3	5	75	15
7	48	11	36	35	60	0,06	1,0	0,5%	1,2	1,3	0	0	0
8	44	9	36	33	51	0,04	1,1	0,4%	1,0	1,2	1	77	15
9	52	11,5	42	40	62	0,1	1,1	0,9%	1,0	1,2	2	106	15
10	16	4	12	11	22	0,01	1,1	0,3%	1,5	1,4	3	74	15
11	12	3,5	9	6	16	0,04	1,5	1,1%	1,4	1,3	1	64	15
12	36	8,3	26	22	45	0,02	1,2	0,2%	1,4	1,3	1	82	15
13	20	5	16	14	26	0,05	1,1	1,0%	1,1	1,3	3	97	15
14	24	7	18	15	30	0,04	1,2	0,6%	1,1	1,3	2	100	15
15	18	4,8	14	12	24	0,07	1,2	1,5%	1,1	1,3	4	84	15
16	32	9,5	24	24	38	0,07	1,0	0,7%	1,0	1,2	5	72	15
17	28	7	22	20	35	0,03	1,1	0,4%	1,1	1,3	4	88	15
18	52	10,5	42	40	68	0,06	1,1	0,6%	1,1	1,3	5	67	15
19	36	8,3	25	22	45	0,02	1,1	0,2%	1,6	1,3	0	0	0
20	12	3,6	9	7	15	0,03	1,3	0,8%	1,3	1,3	2	85	15
21	40	8,5	32	32	49	0,04	1,0	0,5%	1,1	1,2	3	79	15
22	48	9,5	37	34	53	0,04	1,1	0,4%	1,3	1,1	4	97	15
23	50	13	38	34	64	0,07	1,1	0,5%	1,0	1,3	1	108	15
24	48	11,5	38	36	56	0,09	1,1	0,8%	1,0	1,2	0	0	0
25	12	3,9	8	6	16	0,02	1,3	0,5%	1,5	1,3	4	92	15
26	9	3,3	7	7	12	0,02	1,0	0,6%	1,0	1,3	1	65	15
27	56	13	44	40	70	0,07	1,1	0,5%	1,0	1,3	3	65	15
28	20	3,75	17	14	24	0,03	1,2	0,8%	1,2	1,2	5	102	15
29	10	4,5	7	6	13	0,03	1,2	0,7%	0,9	1,3	5	103	15
30	12	3,4	9	6	14	0,02	1,5	0,6%	1,4	1,2	3	65	15
31	20	5	16	14	28	0,01	1,1	0,2%	1,1	1,4	5	95	15
32	14	4	11	8	18	0,05	1,4	1,3%	1,1	1,3	4	95	15
33	16	4,6	13	12	20	0,08	1,1	1,7%	0,9	1,3	1	89	15
34	28	5,5	23	20	34	0,08	1,2	1,5%	1,2	1,2	1	105	15
35	32	7,8	21	19	44	0,05	1,1	0,6%	1,7	1,4	0	0	0
36	30	7	24	21	37	0,03	1,1	0,4%	1,1	1,2	2	100	15
37	38	8	31	30	46	0,05	1,0	0,6%	1,0	1,2	4	75	15
38	40	7,5	34	32	52	0,08	1,1	1,1%	1,0	1,3	5	61	15
39	36	10	26	26	44	0,07	1,0	0,7%	1,1	1,2	2	105	15
40	26	5,2	20	17	33	0,03	1,2	0,6%	1,5	1,3	4	100	15
41	30	5,2	25	24	39	0,05	1,0	1,0%	1,3	1,3	1	99	15
42	37	9,1	24	22	44	0,03	1,1	0,3%	1,7	1,2	0	0	0
43	46	10	37	36	54	0,04	1,0	0,4%	1,0	1,2	0	0	0
44	52	12,5	40	40	64	0,05	1,0	0,4%	1,1	1,2	5	95	15
45	48	9,5	38	36	59	0,05	1,1	0,5%	1,2	1,2	2	82	15
46	44	11	32	30	54	0,1	1,1	0,9%	1,2	1,2	4	77	15
47	52	11	40	39	68	0,04	1,0	0,4%	1,2	1,3	5	89	15
48	42	10,5	30	28	52	0,03	1,1	0,3%	1,3	1,2	5	100	15
49	55	12	44	42	68	0,06	1,0	0,5%	1,0	1,2	4	99	15
50	16	4	13	13	22	0,04	1,0	1,0%	1,1	1,4	2	82	15
51	11	3,8	8	7	14	0,05	1,1	1,3%	1,2	1,3	2	84	15
52	46	10	36	35	53	0,07	1,0	0,7%	1,1	1,2	3	108	15
53	32	8,2	25	23	42	0,02	1,1	0,2%	1,0	1,3	3	89	15
54	40	7	34	33	50	0,06	1,0	0,9%	1,1	1,3	5	81	15
55	26	4,8	21	18	36	0,07	1,2	1,5%	1,4	1,4	2	66	15
56	52	9,5	42	40	66	0,06	1,1	0,6%	1,2	1,3	5	88	15
57	32	8,1	24	22	46	0,09	1,1	1,1%	1,2	1,4	1	100	15
58	16	4,3	12	11	22	0,02	1,1	0,5%	1,3	1,4	0	0	0
59	22	6,0	17	16	26	0,07	1,1	1,2%	1,1	1,2	3	84	15
...
100	23	5,4	19	19	30	0,01	1,0	0,2%	1,0	1,3	0	0	0

2.4.1 Разработка программы обработки статистических данных для нейросети

Для дальнейшей обработки статистических данных был разработан следующий скрипт `read_data`, позволяющий читать и обрабатывать данные напрямую из файла Excel. Фрагмент программного кода скрипта представлен на рисунке 2.3.



```

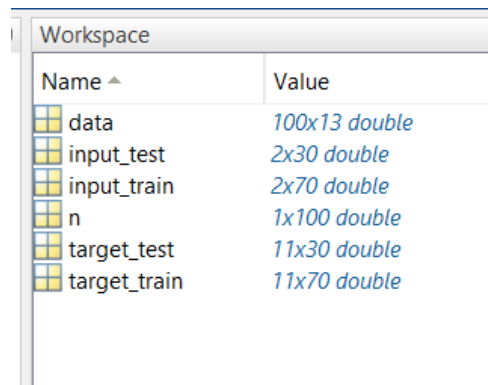
1 %%Скрипт для чтения банка данных из файла Excel
2 clear; close all; clc; % очистить все предыдущие данные
3 data = xlsread('bank_data.xlsx'); % чтение файла
4 n = randperm(100); % рандомизация строк банка данных со сдвигом от 1 до 101 в случайном порядке
5 input_train = data(n(1:70),1:2)'; % определение набора обучающих входных данных для тренировки нейросети, матрица данных транспонирует
6 target_train = data(n(1:70),3:13)'; % определение целевых выходных данных
7 input_test = data(n(71:end),1:2)'; % определение набора обучающих входных данных для тестирования нейросети
8 target_test = data(n(71:end), 3:13)'; % определение целевых выходных данных при тестировании нейросети

```

Рисунок 2.3 – Скрипт для чтения банка данных из файла Excel

Как следует из рисунка 3, в начале очищается вся рабочая область MATLAB. Затем определяется переменная для чтения стороннего файла. Далее происходит рандомизация строк банка данных от 1 до 100 при каждом запуске скрипта. На следующем этапе определяется набор обучающих входных данных, для тренировки будущей нейросети, в данном случае 1 и 2 столбец банка данных. Обучение будет происходить по первым случайно организованным 70 строкам. Далее определяется набор целевых выходных данных, а именно с 3 по 13 столбец банка данных. Те же действия повторяются для определения набора тестирования нейросети, которое формируется с 71 строки банка данных до конца. Таким образом, наборы для тренировки и тестирования отличаются друг от друга.

Перед построением нейросети необходимо запустить скрипт, чтобы он автоматически сформировал в рабочей области переменные с набором данных из файла `bank_data.xlsx`. В результате получаем список переменных в рабочей области, представленный на рисунке 2.4.



Name	Value
data	100x13 double
input_test	2x30 double
input_train	2x70 double
n	1x100 double
target_test	11x30 double
target_train	11x70 double

Рисунок 2. 4 – Список переменных в рабочей области

2.4.2 Разработка нейронной сети в среде MATLAB

Для реализации модели в системе MATLAB выбран инструмент Neural Network Fitting, позволяющий обучать нейронную сеть прямого распространения для решения задач прогнозирования. Для формирования нейронной сети требуется выбрать заранее подготовленные входные и целевые данные для обучения нейросети, что представлено на рисунке 2.5.

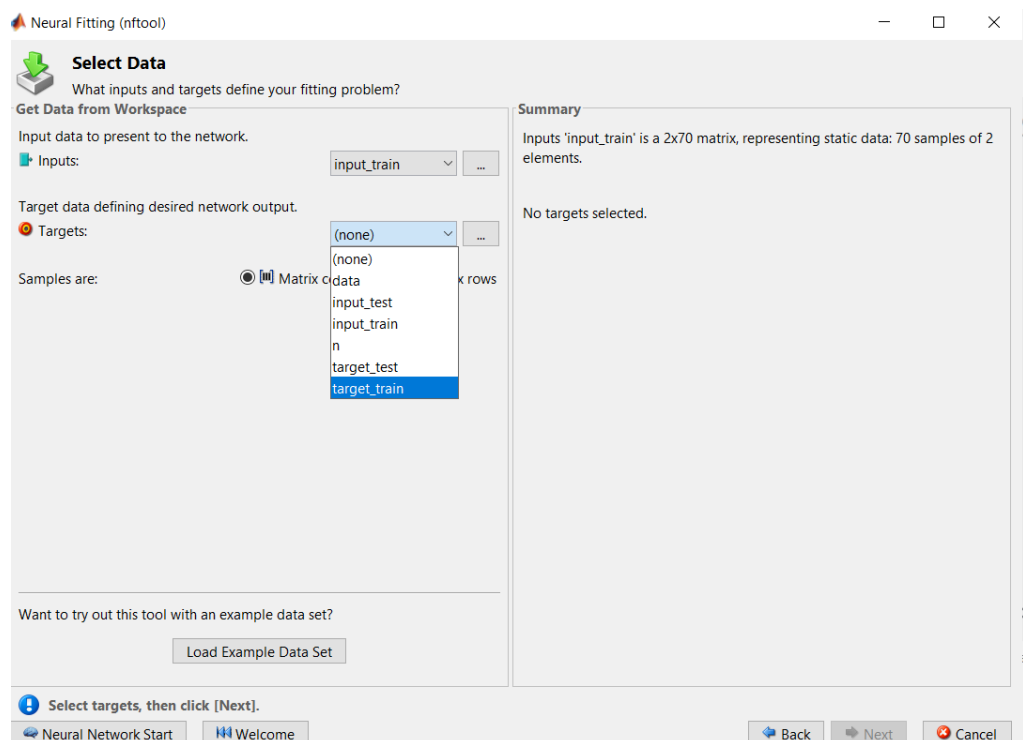


Рисунок 2.5 – Выбор входных и целевых данных для обучения нейросети

Далее предлагается распределить данные на обучение, валидацию и тестирование нейросети, как проиллюстрировано на рисунке 2.6.

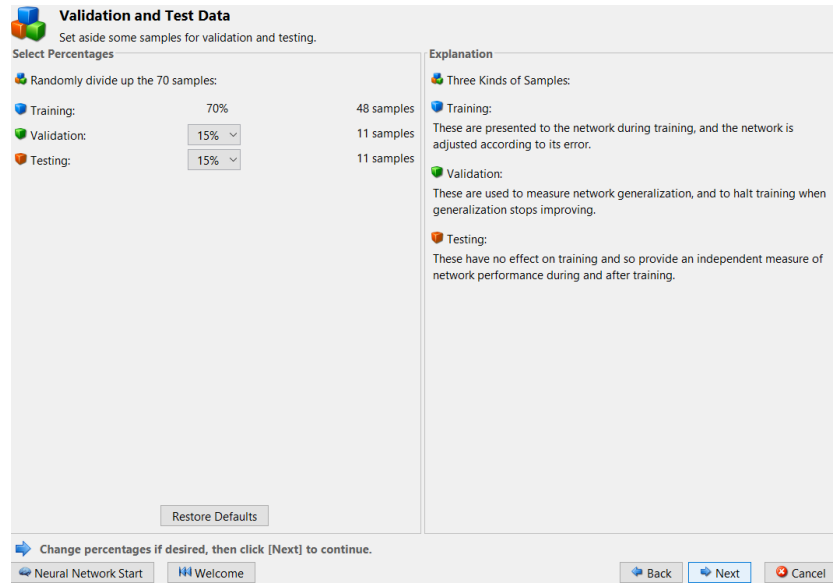


Рисунок 2.6 – Распределение данных на обучение, валидацию и тестирование нейросети

Количество скрытых слоев в нейросети установлено 10. Алгоритм обучения выбран Levenberg-Marquardt. После установления всех необходимых настроек, запускается обучение (Train). На рисунке 2.7 приведены результаты обучения нейросети.

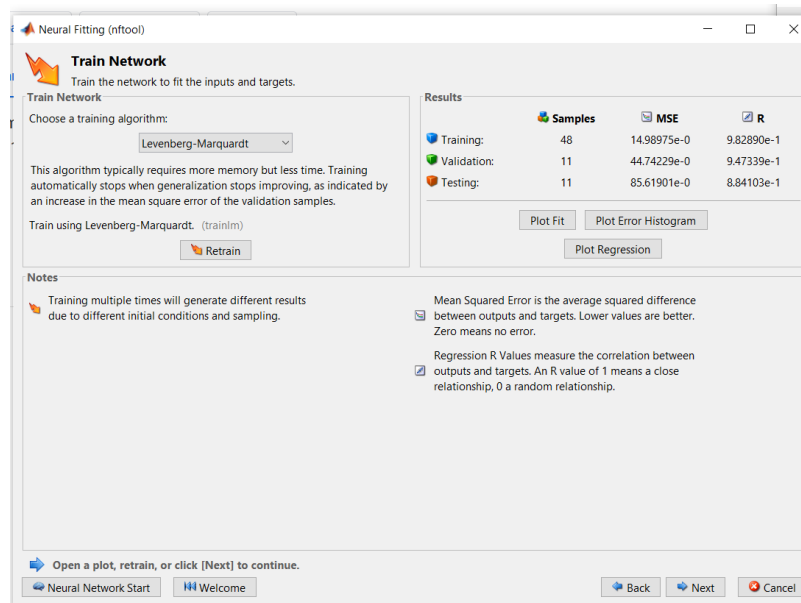


Рисунок 2.7– Результаты обучения нейросети

Ниже на рисунке 2.8 представлены регрессионные данные по результатам обучения, валидации и тестирования. Как видно, значения регрессии свидетельствуют о тесной связи между результатами работы нейросети и целевыми значениями размерно-качественных показателей.

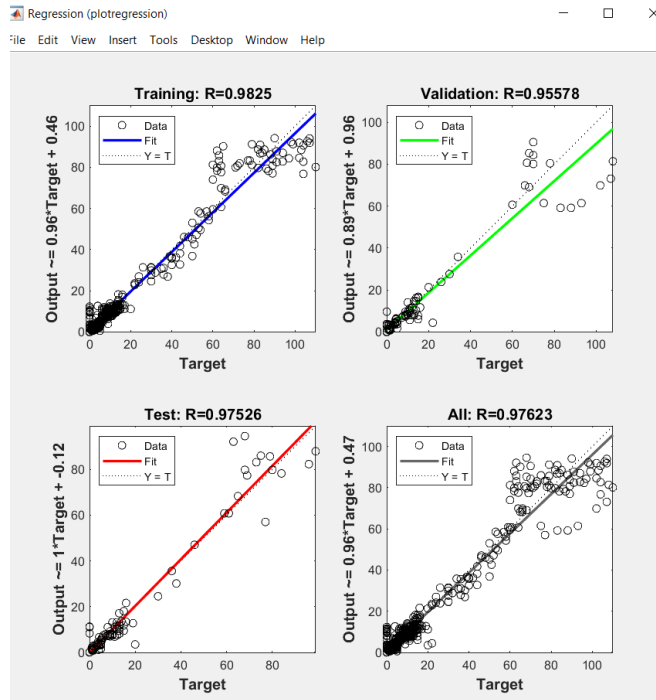


Рисунок 2.8 – Регрессионные данные по результатам обучения, валидации и тестирования

Готовую нейросеть можно сохранить в виде кода, либо экспортировать для дальнейшей работы в Simulink.

2.4.3 Структура модели размерно-качественных характеристик хлыста ели

Для практического применения и обработки выходных данных, подаваемых нейросетью, требуется интегрировать её в общую имитационную Simulink-модель, представленную на рисунке 2.9.

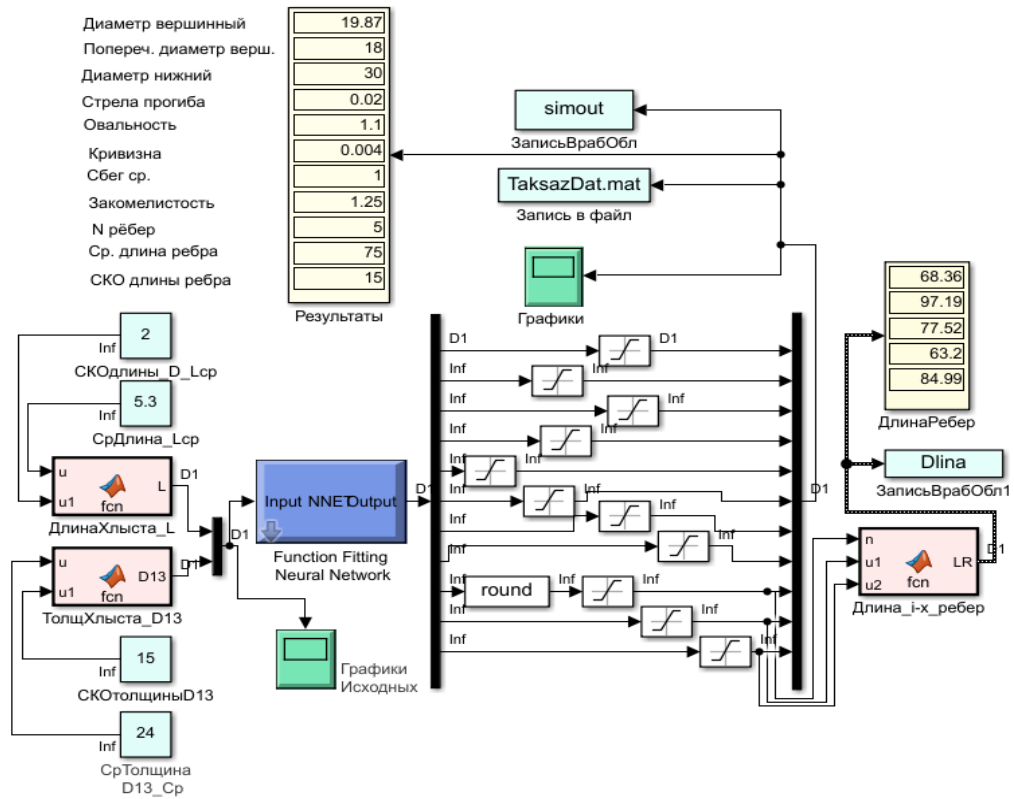


Рисунок 2.9 – Структура имитационной Simulink-модели

Для настройки нейросети необходимо задать входные данные – это длина L и диаметр на высоте груди $D_{1,3}$. В модели Simulink исходные данные следует задавать в Constant. Такие же блоки Constant используется для указания среднеквадратичного отклонения входных параметров L и $D_{1,3}$. Далее данные поступают на вход блоков MATLAB Function для L и $D_{1,3}$, где по нормальному закону распределения генерируется случайное число с учетом среднеквадратичного отклонения для входного параметра. Затем исходные переменные подаются в мультиплексор, где формируется одномерный вектор параметров для последовательной передачи на вход нейросети. Блок мультиплексор не оказывает влияния на поток данных. Данные поступающие на вход нейросети отображаются в Block Parameters, отображающем числовое значение данных. Нейросеть содержится в блоке Fitting Neural Network. Результаты работы нейросети, одиннадцать выходных параметров передаются через мультиплексор на осциллограф, дисплей, в рабочую область и в файл данных. Для защиты системы от сбоя стоят лимиты на выходных потоках в

рамках диапазонов значений, принятых в банке данных. На выход расчета количества ребер установлен параметр `round`, который предназначен округлять значение параметра N ребер до ближайшего целого числа. Далее следует обработка параметра длины каждого i -го ребра в блоке MATLAB Function. Входными параметрами для блока служат N ребер, Ср. длина ребра (l_i), СКО длины ребра ($Dlcp$). Обработка параметра LR происходит в цикле, где для каждого i -го ребра по нормальному закону распределения генерируется случайное значение длины (LR) с учетом среднеквадратичного отклонения параметра длины ребра [111, 112]. Сформированные выходные данные отражаются на дисплее в следующей последовательности:

1. Диаметр вершинный, см, d_v .
2. Поперечный диаметр вершинный, см, $d'v$.
3. Диаметр нижний, см, D_n .
4. Стрела прогиба, а.
5. Овальность, O .
6. Кривизна, K .
7. Сбег ср, S_{cp} .
8. Закомелистость, C_z .
9. Количество ребер, ед, N .
10. Ср. длина ребра, см, l_i .
11. СКО длины ребра, см, $Dlcp$.

2.5 Выводы по второй главе

Результаты исследований второй главы позволяют сделать следующие выводы.

1. Обоснованы размерно-качественные характеристики лесоматериала, которые необходимы для моделирования формы древесного хлыста.

2. Определены входные и выходные параметры для моделирования предмета труда лесопромышленных технологий и установлены связи между ними.

3. Сформирован банк данных для обучения нейронной сети и разработан скрипт по обработке данных, с использованием которых создана технология моделирования размерно-качественных показателей формы хлыста породы ель.

4. Реализована интеграция нейронной сети в обобщенную имитационную Simulink-модель.

Разработанная технология является универсальной для всех пород деревьев, так как может дополняться или корректироваться новыми данными в обучающей выборке и заново настраиваться, что обеспечивает ей большую точность и адаптивность. При этом не требуется переработки всей компьютерной модели.

Полученная обобщенная имитационная Simulink-модель должна использоваться для представления хлыста ели в виде 3-D модели и его цифрового прототипирования. Решению этой задачи посвящена третья глава диссертации.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЁХМЕРНОГО ЦИФРОВОГО ПРОТОТИПА ПРЕДМЕТА ТРУДА НА ПРИМЕРЕ ХЛЫСТА ЕЛИ

3.1 Разработка панели пользователя

Ранее полученные результаты параметров Simulink-модели применяются для цифрового прототипирования с представлением хлыста в виде геометрической трёхмерной модели. Для практической работы с кодом была разработана программа с пользовательским интерфейсом Parameters, расположенная во вкладке Generation в рабочей области. Вкладка появляется после первого запуска скрипта. Основные характеристики панели представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные характеристики панели Parameters

Переменная	Размерно-качественная характеристика хлыста	Диапазон значений	Значение по умолчанию	Тип элемента
1	2	3	4	5
dv1	Диаметр вершинный	мин. значение переменной = 6 макс. значение переменной = 44	default = 24	Поле ввода с ползунком
dv2	Поперечный диаметр вершинный	мин. значение переменной = 6 макс. значение переменной = 44	default = 24	Поле ввода с ползунком
d1,31	Диаметр на уровне 1,3 м	мин. значение переменной = 8 макс. значение переменной = 56	default = 32	Поле ввода с ползунком
d1,32	Поперечный диаметр на уровне 1,3 м	мин. значение переменной = 8 макс. значение переменной = 56	default = 32	Поле ввода с ползунком
Dн	Диаметр нижний	мин. значение переменной = 10 макс. значение переменной = 70	default = 40	Поле ввода с ползунком

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
L	Длина хлыста	мин. значение переменной = 330 макс. значение переменной = 1300	default = 640	Поле ввода с ползунком
li	Ср. длина ребра	мин. значение переменной = 60 макс. значение переменной = 120	default = 80	Поле ввода с ползунком
a	Стрела прогиба	мин. значение переменной = 0 макс. значение переменной = 10	default = 5	Поле ввода с ползунком
Закомелистость		<ul style="list-style-type: none"> — Округлая закомелистость. — Ребристая закомелистость: <ul style="list-style-type: none"> — 1 ребро. — 2 ребра. — 3 ребра. — 4 ребра. — 5 рёбер. 		Флажок
Сучки				Флажок

Конкретные значения данных параметров заносятся в панель пользователя. После установления всех значений необходимых параметров хлыста необходимо нажать кнопку Generation и в рабочей сцене программы будет автоматически сгенерирован цифровой прототип хлыста ели. Сгенерированный прототип хлыста ели по данным параметрам представлен на рисунке 3.1.

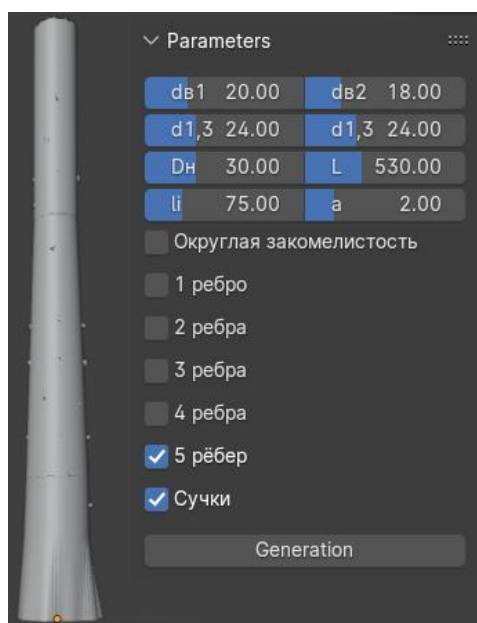


Рисунок 3.1 – Сгенерированный прототип хлыста ели

3.2 Методика построения цифрового прототипа хлыста ели

Общая схема построения цифрового прототипа хлыста ели приведена на рисунке 3.2.

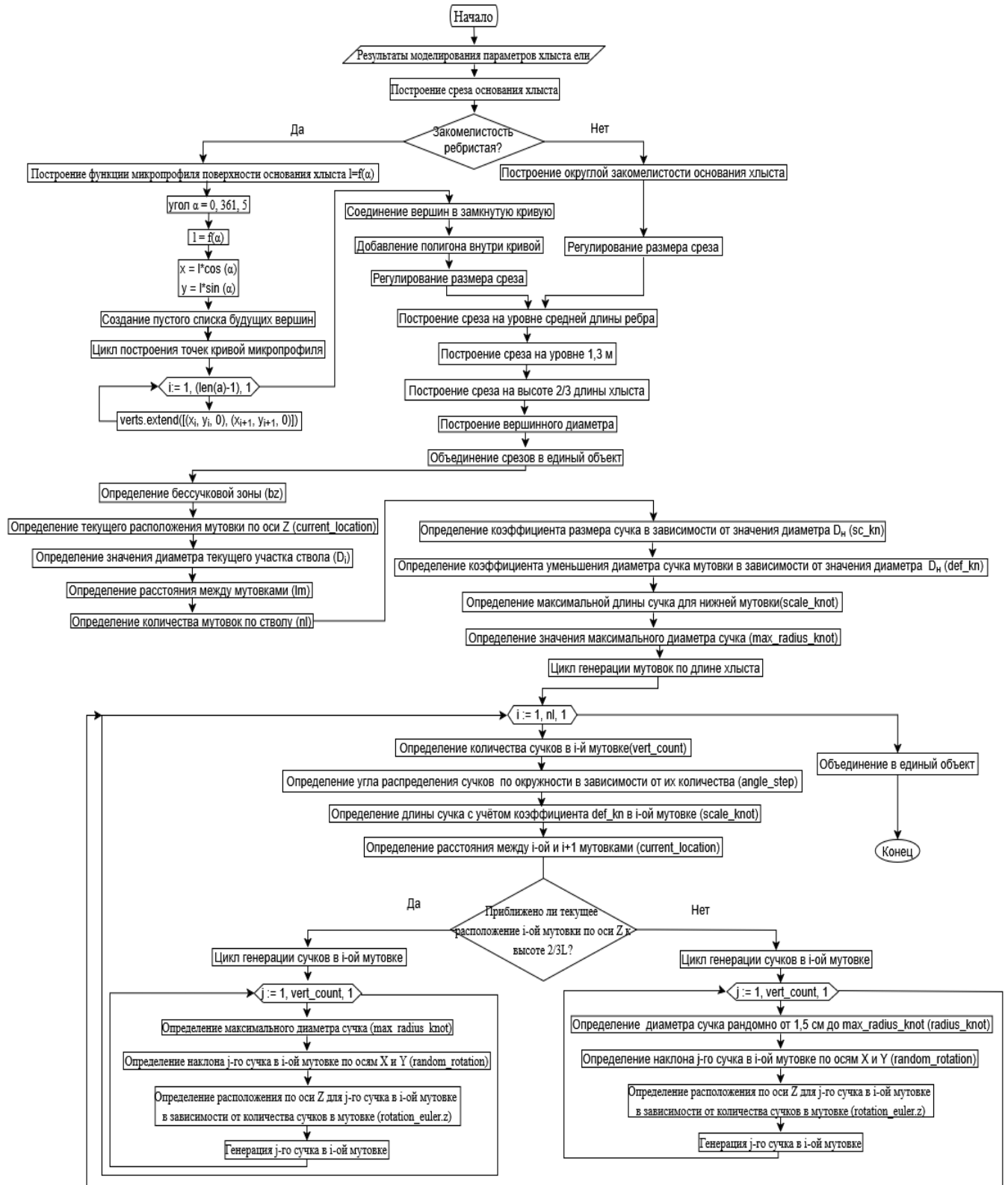


Рисунок 3.2 – Общая схема построения цифрового прототипа хлыста ели

Методика построения цифрового прототипа хлыста дерева, в частности, ели базируется на таких характеристиках данного объекта, как толщина ствола на разных уровнях высот. Выделены следующие этапы построения трехмерной модели хлыста:

1. Срез микропрофиля основания хлыста (округлая или ребристая).
2. Срез на уровне средней длины ребра.
3. Срез на высоте 1,3 м.
4. Срез на высоте $2/3$ длины хлыста.
5. Вершинный диаметр.
6. Объединение срезов в единый объект.
7. Генерация мутовок по стволу.

3.2.1 Разработка алгоритма моделирования микропрофиля закомелистости основания хлыста ели

Разработан следующий метод формирования кривой микропрофиля закомелистости основания хлыста:

1. Построение вписанной окружности на изображении реального среза основания хлыста с радиусом R , пример приведен на рис.12.
2. По месту соприкосновения окружности с кривой закомелистости определяется начальная точка отсчёта.
3. От начальной точки отсчёта по углу α , равным 5 град., производится замер расстояния l_i от центра вписанной окружности до поверхности кривой закомелистости.
4. С шагом поворота на угол α производится замер всей окружности до значения $\alpha = 360$ град.
5. Фиксируются полученные значения для переменных α_i и l_i соответственно.
6. Производится построение графика микропрофиля поверхности основания хлыста.

7. В инструменте Curve Fitting Tool программы MATLAB исходные данные аппроксимируются методом наименьших квадратов, результатом чего служит функция математического описания микропрофиля поверхности основания хлыста $l=f(\alpha)$.

8. Результирующая функция преобразуется на язык Python.

9. Генерация среза основания хлыста ели в среде трёхмерного моделирования Blender.

В исходное изображение среза основания хлыста вписывается окружность и производятся измерения кривой микропрофиля. Схема измерений приведена на рисунке 3.3.

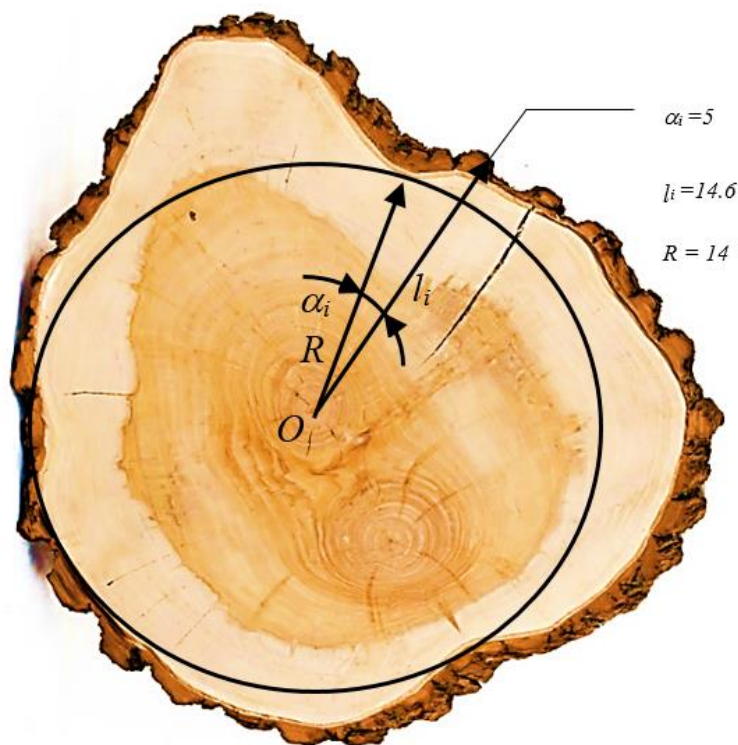


Рисунок 3.3 – Схема измерений основания хлыста

Произведены замеры среза с фиксацией на каждые 5 градусов. Вписана окружность диаметром 14 см. Результаты измерений по данной методике зафиксированы в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерений основания хлыста ели

Угол α , град	Расстояние l , см	Угол α , град	Расстояние l , см	Угол α , град	Расстояние l , см	Угол α , град	Расстояние l , см
1	15.3	95	22.5	190	22.5	285	18.3
5	15.1	100	21.7	195	24.9	290	18.3
10	15	105	20.4	200	26.1	295	18.1
15	14.8	110	20	205	26.3	300	18.1
20	14.6	115	19	210	25.5	305	18
25	14.5	120	18.6	215	23	310	18
30	14.3	125	17.7	220	20.7	315	18.1
35	14.4	130	16.2	225	18.4	320	17.9
40	15.3	135	15.1	230	17.5	325	17.9
45	16.4	140	15	235	15.6	330	18.1
50	17.2	145	14.8	240	15.7	335	18.2
55	18.4	150	14.7	245	17.6	340	18.2
60	19	155	14.6	250	18.6	345	18.2
65	20.2	160	14.4	255	18.3	350	18
70	21.4	165	14.3	260	18.1	355	16.1
75	22.7	170	16	265	16	360	15.3
80	23.4	175	17.6	270	17		
85	23.2	180	19.1	275	17.2		
90	23.4	185	20.9	280	18.3		

Результаты измерений микропрофиля основания хлыста служат исходными данными для формирования математического описания полученной кривой в среде Curve Fitting Tool программного комплекса MATLAB. Визуализация расчетов приведена на рисунке 3.4. Для наиболее точного описания полученной кривой была выбрана функция суммы синусов восьмого порядка, представленная в формуле 3.1. Вид функции подобран по минимальной сумме квадратов отклонений теоретических данных от экспериментальных [113].

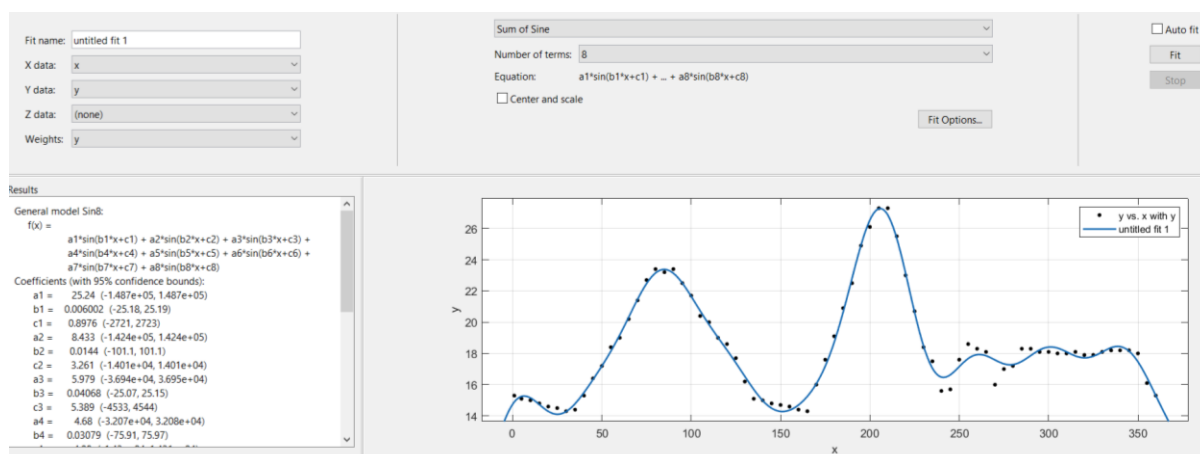


Рисунок 3.4 – Результаты вывода функции микропрофиля в среде MATLAB

$$\begin{aligned}
 l = & 25.24 * \sin(0.006002 * a + 0.8976) + 8.433 * \sin(0.0144 * a + 3.261) + \\
 & 5.979 * \sin(0.04068 * a + 5.389) + 4.68 * \sin(0.03079 * a + 4.08) + \\
 & 2.592 * \sin(0.06583 * a + 1.042) + 1.433 * \sin(0.09549 * a + 0.9069) + \\
 & 0.5001 * \sin(0.1457 * a - 4.085) + 0.6758 * \sin(0.1229 * a - 4.748)
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

После преобразования на язык Python получена формула 3.2.

$$\begin{aligned}
 l = & 25.24 * np.\sin(0.006002 * a + 0.8976) + 8.433 * np.\sin(0.0144 * a + 3.261) + \\
 & 5.979 * np.\sin(0.04068 * a + 5.389) + 4.68 * np.\sin(0.03079 * a + 4.08) + 2.592 * \\
 & np.\sin(0.06583 * a + 1.042) + 1.433 * np.\sin(0.09549 * a + 0.9069) + 0.5001 * \\
 & np.\sin(0.1457 * a - 4.085) + 0.6758 * np.\sin(0.1229 * a - 4.748)
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2.2 Программная реализация среза основания хлыста с закомелистостью в 3-D пространстве

Для построения среза основания хлыста необходимо задать вершины поверхности микропрофиля в соответствии с полученным выше уравнением. Для решения этой задачи был разработан следующий алгоритм:

1. Задается значение угла α .
2. Рассчитывается расстояние каждой точки кривой микропрофиля основания хлыста от центра координат с учетом шага угла α по полученной выше формуле 3.2.

3. Рассчитывается координата для осей x и y на основе полученного уравнения 1.
4. Создание пустого списка будущих вершин.
5. Генерация вершин на основе координат.
6. Соединение вершин в замкнутую кривую.
7. Добавление плоскости внутри кривой.
8. Регулирование размера полученного объекта в соответствии с переменной Dn, заданной в пользовательской панели.

Данный алгоритм реализован на языке Python в среде API Blender. Фрагмент скрипта представлен ниже.

```

a = np.arange(0, 361, 5)
l = 38.41* np.sin(0.005275*a+ 0.4203) + 13.89*
np.sin(0.008797*a+ 2.751) + 4.079* np.sin(0.03832*a+ 1.99) +
5.201* np.sin(0.05531*a+ 1.687) + 1.641* np.sin(0.09868*a-1.373) +
1.636* np.sin(0.1264*a-0.04853) + 2.059* np.sin(0.08041*a- 3.647)
+ 0.5027* np.sin(0.1753*a- 1.26)
x = l*np.cos(np.radians(a))
y = l*np.sin(np.radians(a))
# Список вершин
verts = []
faces = []
# Создаем вершины на основе координат
for i in range (len(a)-1):
    verts.extend([(x[i], y[i], 0), (x[i+1], y[i+1],
0)])
# Создаем сетку для фигуры
mesh = bpy.data.meshes.new(name="Srez")
obj = bpy.data.objects.new("SrezObject", mesh)
bpy.context.collection.objects.link(obj)
mesh.from_pydata(verts, [], faces)
mesh.update()
# Переключаемся в режим редактирования объекта
bpy.context.view_layer.objects.active = obj
bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
bpy.ops.mesh.select_all(action='SELECT')
bpy.ops.mesh.edge_face_add()
bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
bpy.context.object.scale[0] = self.Do
bpy.context.object.scale[1] = self.Do

```

Результат генерации среза основания хлыста с 4-мя ребрами представлен на рисунке 3.5. Получено свидетельство на программу моделирования закомелистости лесоматериала [114].

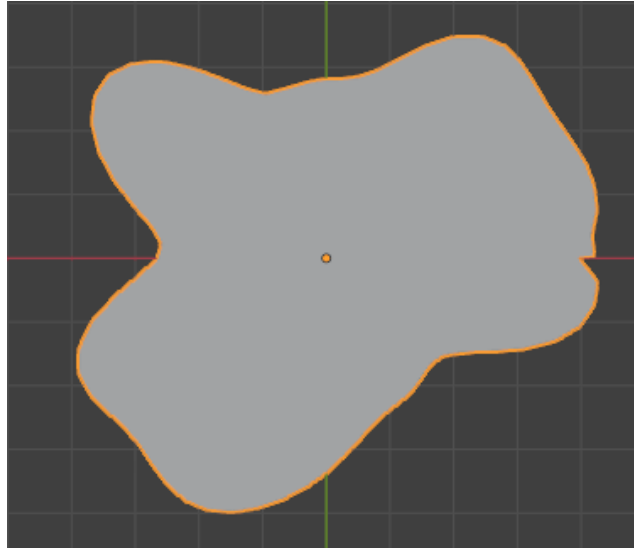


Рисунок 3.5 – Результат генерации среза основания хлыста с 4-мя ребрами

Для дальнейшей оптимизации построения цифровых прототипов хлыстов ели с разным количеством рёбер в закомелистой части ствола были разработаны шаблоны. По предложенной выше методике были так же реализованы шаблоны для построения ребристой закомелистости основания хлыста с 1-им ребром, 2 –мя рёбрами, 3-мя рёбрами и 5 рёбрами.

Для построения кривых микропрофиля основания хлыста ели были рассчитаны и преобразованы функции суммы синусов 8-го порядка, представленные в таблице 3.3.

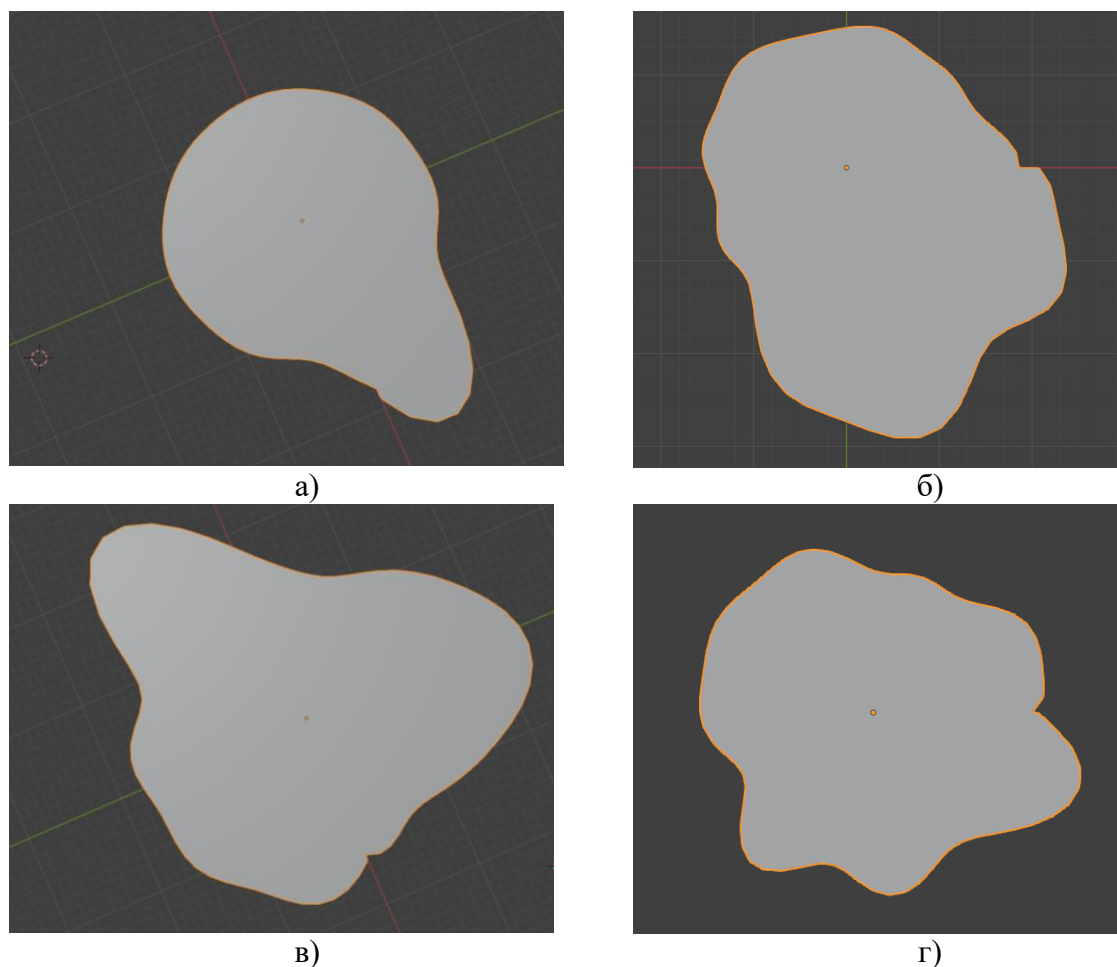
Таблица 3.3 – Преобразование функции суммы синусов 8-го порядка

Количество рёбер	Функция в виде суммы синусов 8-го порядка
1	2
1	$l = 23.45 * \sin(0.006988 * a + 0.3288) + 11.42 * \sin(0.01296 * a + 2.382) + 1.7 * \sin(0.03512 * a + 1.125) + 1.296 * \sin(0.05261 * a + 0.7046) + 3.598 * \sin(0.08069 * a - 1.659) + 8.34 * \sin(0.08999 * a - 0.3603) + 8.412 * \sin(0.09726 * a + 1.347) + 3.204 * \sin(0.1032 * a + 3.32)$
	$l = 23.45 * \text{np.sin}(0.006988 * a + 0.3288) + 11.42 * \text{np.sin}(0.01296 * a + 2.382) + 1.7 * \text{np.sin}(0.03512 * a + 1.125) + 1.296 * \text{np.sin}(0.05261 * a + 0.7046) + 3.598 * \text{np.sin}(0.08069 * a - 1.659) + 8.34 * \text{np.sin}(0.08999 * a - 0.3603) + 8.412 * \text{np.sin}(0.09726 * a + 1.347) + 3.204 * \text{np.sin}(0.1032 * a + 3.32)$

Продолжение таблицы 3.3

1	2
2	$l = 27.6 \cdot \sin(0.008668 \cdot a - 0.05194) + 14.34 \cdot \sin(0.01916 \cdot a + 1.55) + 1.235 \cdot \sin(0.05558 \cdot a + 0.7661) + 8.986 \cdot \sin(0.07464 \cdot a + 1.252) + 3.207 \cdot \sin(0.03624 \cdot a + 2.463) + 8.102 \cdot \sin(0.07697 \cdot a + 4.053) + 65.51 \cdot \sin(0.1628 \cdot a + 0.005608) + 65.38 \cdot \sin(0.1629 \cdot a + 3.137)$
3	$l = 27.6 \cdot \text{np.sin}(0.008668 \cdot a - 0.05194) + 14.34 \cdot \text{np.sin}(0.01916 \cdot a + 1.55) + 1.235 \cdot \text{np.sin}(0.05558 \cdot a + 0.7661) + 8.986 \cdot \text{np.sin}(0.07464 \cdot a + 1.252) + 3.207 \cdot \text{np.sin}(0.03624 \cdot a + 2.463) + 8.102 \cdot \text{np.sin}(0.07697 \cdot a + 4.053) + 65.51 \cdot \text{np.sin}(0.1628 \cdot a + 0.005608) + 65.38 \cdot \text{np.sin}(0.1629 \cdot a + 3.137)$
4	$l = 25.24 \cdot \sin(0.006002 \cdot a + 0.8976) + 8.433 \cdot \sin(0.0144 \cdot a + 3.261) + 5.979 \cdot \sin(0.04068 \cdot a + 5.389) + 4.68 \cdot \sin(0.03079 \cdot a + 4.08) + 2.592 \cdot \sin(0.06583 \cdot a + 1.042) + 1.433 \cdot \sin(0.09549 \cdot a + 0.9069) + 0.5001 \cdot \sin(0.1457 \cdot a - 4.085) + 0.6758 \cdot \sin(0.1229 \cdot a - 4.748)$
5	$l = 25.24 \cdot \text{np.sin}(0.006002 \cdot a + 0.8976) + 8.433 \cdot \text{np.sin}(0.0144 \cdot a + 3.261) + 5.979 \cdot \text{np.sin}(0.04068 \cdot a + 5.389) + 4.68 \cdot \text{np.sin}(0.03079 \cdot a + 4.08) + 2.592 \cdot \text{np.sin}(0.06583 \cdot a + 1.042) + 1.433 \cdot \text{np.sin}(0.09549 \cdot a + 0.9069) + 0.5001 \cdot \text{np.sin}(0.1457 \cdot a - 4.085) + 0.6758 \cdot \text{np.sin}(0.1229 \cdot a - 4.748)$
4	$l = 38.41 \cdot \sin(0.005275 \cdot a + 0.4203) + 13.89 \cdot \sin(0.008797 \cdot a + 2.751) + 4.079 \cdot \sin(0.03832 \cdot a + 1.99) + 5.201 \cdot \sin(0.05531 \cdot a + 1.687) + 1.641 \cdot \sin(0.09868 \cdot a - 1.373) + 1.636 \cdot \sin(0.1264 \cdot a - 0.04853) + 2.059 \cdot \sin(0.08041 \cdot a - 3.647) + 0.5027 \cdot \sin(0.1753 \cdot a - 1.26)$
5	$l = 38.41 \cdot \text{np.sin}(0.005275 \cdot a + 0.4203) + 13.89 \cdot \text{np.sin}(0.008797 \cdot a + 2.751) + 4.079 \cdot \text{np.sin}(0.03832 \cdot a + 1.99) + 5.201 \cdot \text{np.sin}(0.05531 \cdot a + 1.687) + 1.641 \cdot \text{np.sin}(0.09868 \cdot a - 1.373) + 1.636 \cdot \text{np.sin}(0.1264 \cdot a - 0.04853) + 2.059 \cdot \text{np.sin}(0.08041 \cdot a - 3.647) + 0.5027 \cdot \text{np.sin}(0.1753 \cdot a - 1.26)$
5	$l = 66.7 \cdot \sin(0.01215 \cdot a - 0.5552) + 65.04 \cdot \sin(0.02348 \cdot a + 0.562) + 86.27 \cdot \sin(0.0347 \cdot a + 1.721) + 56.04 \cdot \sin(0.0384 \cdot a + 4.242) + 1.734 \cdot \sin(0.1236 \cdot a - 1.185) + 2.152 \cdot \sin(0.1128 \cdot a - 1.346) + 0.8004 \cdot \sin(0.07388 \cdot a - 0.5015) + 1.159 \cdot \sin(0.156 \cdot a + 0.2392)$
5	$l = 66.7 \cdot \text{np.sin}(0.01215 \cdot a - 0.5552) + 65.04 \cdot \text{np.sin}(0.02348 \cdot a + 0.562) + 86.27 \cdot \text{np.sin}(0.0347 \cdot a + 1.721) + 56.04 \cdot \text{np.sin}(0.0384 \cdot a + 4.242) + 1.734 \cdot \text{np.sin}(0.1236 \cdot a - 1.185) + 2.152 \cdot \text{np.sin}(0.1128 \cdot a - 1.346) + 0.8004 \cdot \text{np.sin}(0.07388 \cdot a - 0.5015) + 1.159 \cdot \text{np.sin}(0.156 \cdot a + 0.2392)$

Результаты генерации шаблонов представлены ниже на рисунке 3.6.



а - срез основания хлыста с 1-им ребром; б - срез основания хлыста с 2-мя рёбрами; в - срез основания хлыста с 3-мя рёбрами; г – срез основания хлыста с 5-ю рёбрами

Рисунок 3. 6 – Результаты генерации шаблонов ребристой закомелистости основания хлыста ели с разным количеством рёбер

Шаблон среза основания хлыста выбирается с помощью элемента флажок в панели пользователя (рис.3.1). Помимо ребристой закомелистости рассмотрено построение округлой закомелистости. Принцип построения округлой закомелистости состоит из следующих этапов:

1. Добавление окружности, состоящей из 72 точек.
2. Размер среза регулируется переменной D_n .

Фрагмент скрипта программной реализации данного алгоритма представлен ниже.

```
bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius= self.Do/2,
location=(0, 0, 0))
    bpy.context.object.scale[0] = self.Do
    bpy.context.object.scale[1] = self.Do
```

Выбор по построению округлой закомелистости осуществляется таким же образом в панели пользователя, как и ребристой закомелистости. Необходимо нажать флажок под названием «Округлая закомелистость» в панели «Parameters».

3.2.3 Построение основных срезов по длине хлыста ели

После моделирования среза основания хлыста происходит построение среза на уровне средней длины ребра. Принцип построения среза на уровне средней длины ребра состоит из следующих этапов:

1. Добавление окружности, состоящей из 72 точек.
2. Координаты осей x и y для центральной точки окружности задаются случайно в диапазоне значений от 0 до установленного пользователем параметра стрелы прогиба a .
3. Координата z задается значением параметра li в панели пользователя.
4. Размер среза определяется случайно в диапазоне от значения переменной диаметра на уровне груди $dg1+1$ до значения переменной $Do-pg$. Переменная pg задана в соответствии со значением Do для оптимизации построения различных вариантов закомелистости.

Фрагмент скрипта программной реализации данного алгоритма представлен ниже.

```
ali = randint(0, (self.a))
rli = randint((self.dg1 + 1), (self.Do - pg))
    bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius=
rli/2, location=(ali, ali, self.li))
```

Далее происходит построение среза на уровне груди. Принцип построения среза на уровне груди состоит в следующих шагах:

1. Добавление окружности, состоящей из 72 точек.

2. Координаты осей x и y для центральной точки окружности задаются случайно в диапазоне значений от 0 до установленного пользователем параметра стрелы прогиба a .

3. Координата $z = 130$.

4. Размер среза устанавливается в поле $d_{1,31}$ и $d_{1,32}$ в панели пользователя.

Фрагмент скрипта программной реализации данного алгоритма представлен ниже.

```

a130 = randint(0, (self.a))
    bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius=
(self.dg1 / 2), location = (a130, a130, 130))
    bpy.context.object.scale[0] = (self.dg1)
    bpy.context.object.scale[1] = (self.dg2)

```

Последующим генерируется срез на высоте $2/3$ от длины хлыста. Данный срез необходим для дальнейшего распределения мутовок по стволу, так как установлено, что наиболее крупные сучки с наибольшим диаметром расположены на высоте $2/3$ от общей высоты деревьев [115]. Исследованию зависимости сучковатости от толщины ствола посвящена работа Л. Г. Дорофеева. [116] Автор устанавливает связь диаметра сучьев с толщиной участка ствола и предлагает следующую расчётную формулу 3.3 для вычисления диаметра сучьев ели:

$$d_c = 1,22D^{0,294}, \quad (3.3)$$

где d_c – диаметр сучка;

D – диаметр участка ствола, см.

Диаметр сучьев имеет тесную корреляционную связь с текущей толщиной ствола. Расчет текущего диаметра представлен в формуле 3.4.

$$D = d_{1,3} - \frac{S_{cp}}{100}(L-1,3), \quad (3.4)$$

где $d_{1,3}$ – диаметр на высоте груди, см;

S_{cp} – средний сбег ствола, см;

L – текущее значение длины ствола (расстояние от комлевого среза до исследуемого сечения), см.

Так как ранее было установлено, что наибольший диаметр сучка встречается на высоте $2/3$ от длины хлыста, то следует рассчитать значение текущего диаметра на высоте $2/3$ от длины хлыста, а в дальнейшем использовать полученное значение при расчете наибольшего диаметра сучка. Таким образом формула 3.5 отражает зависимость диаметра на высоте $2/3$ от длины хлыста.

$$D_{23} = d_{1,3} - \frac{Scp}{100}(l_{23}-130), \quad (3.5)$$

где $d_{1,3}$ – диаметр на высоте груди, см;

Scp – средний сбег ствола, см;

l_{23} – высота $2/3$ от длины хлыста, см.

Алгоритм построения среза высоте $2/3$ от длины хлыста состоит в следующем:

1. Координаты осей x и y для центральной точки окружности задаются случайно в диапазоне значений от 0 до установленного пользователем параметра стрелы прогиба a .

2. Координата z регулируется переменной l_{23} , которая рассчитывается, как $2/3$ от текущей переменной длины хлыста L , заданной пользователем в панели «Parameters».

3. Рассчитывается средний сбег текущего ствола, Scp .

4. Рассчитывается значение диаметра на высоте $2/3$ от длины хлыста, D_{23} .

5. Построение окружности, состоящей из 72 точек радиусом равным половине D_{23} . Центральная точка определена полученными ранее значениями a_{130} .

Фрагмент скрипта программной реализации данного алгоритма представлен ниже.

```

a130 = randint(0, (self.a))
l23 = (self.L)*2/3
Scp = (self.dg1 - self.dv1)/(self.L/130)
D23 = self.dg1 - Scp/100*(l23-130)
bpy.ops.mesh.primitive_circle_add (vertices=72, radius= D23/2,
location = (a130, a130, l23))

```

В завершении генерации формы ствола дерева строится вершинный срез хлыста. Алгоритм построения вершинного диаметра состоит из следующих этапов:

1. Добавление окружности, состоящей из 72 точек.
2. Координаты осей x и y для центральной точки окружности задаются случайно в диапазоне значений от 0 до установленного пользователем параметра стрелы прогиба a.
3. Координата z регулируется значением текущей переменной длины хлыста L, заданной пользователем в панели «Parameters».
4. Размер среза устанавливается в поле dv1 и dv2 в панели пользователя.

Фрагмент скрипта программной реализации данного алгоритма представлен ниже.

```

bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius=
(self.dv1/2), location = (self.a, self.a, self.L))
bpy.context.object.scale[0] = (self.dv1)
bpy.context.object.scale[1] = (self.dv2)

```

После генерации всех основных срезов хлыста необходимо соединить их в единый объект. Для этого был разработан следующий алгоритм.

1. Выбрать все объекты.
2. В цикле объединить все объекты.
3. Добавить плоскость внутри среза.
4. Соединить гранями срезы.
5. Сгладить объект.

Фрагмент скрипта программной реализации данного алгоритма представлен ниже.

```

bpy.ops.object.select_all(action='SELECT') # Select all objects
for o in bpy.data.objects: # Join all objects
    o.select_set(True)
bpy.context.view_layer.objects.active = o
bpy.ops.object.join()

```

```

bpy.ops.object.editmode_toggle()           # Enter edit mode
bpy.ops.mesh.edge_face_add()              # Add face
bpy.ops.mesh.bridge_edge_loops()         # Connect slices
bpy.ops.object.editmode_toggle()         # Enter object mode
bpy.ops.object.shade_smooth(use_auto_smooth=True) # Smooth
object

```

3.2.4 Программная реализация пороков формы ствола в 3-D модели цифрового прототипа хлыста ели

Во второй главе приведено подробное обоснование основных пороков формы ствола и их зависимость от размерно-качественных характеристик лесоматериала. Так, расчет простой кривизны связан со значением параметра длины сортимента и величины стрелы максимального прогиба. Хлыст, имеющий два и более изгиба сортимента в одной или нескольких плоскостях характеризуется сложной кривизной. Согласно ГОСТ 2140-81: «Сложную кривизну характеризуют величиной наибольшего искривления, измеряемого аналогично простой кривизне». Методика построения цифрового прототипа хлыста ели заключается в последовательном построении наиболее значимых срезов хлыста по длине, что позволяет смоделировать как простую кривизну, так и сложную кривизну. Как описано выше, каждый срез имеет свой диаметр, либо смоделированный ранее с помощью нейронной сети, если это позволяют статистические данные, либо рассчитан случайно в диапазоне значений, зависящих от параметров других срезов, расположенных выше и ниже по хлысту. Так же срезы характеризуются расположением по оси z и локальным расположением центральной точки среза, что можно принять за моделирование сердцевины хлыста. На основании формулы расчёта простой кривизны по ГОСТ 2140-81 основными параметрами, характеризующими кривизну ствола, являются длина хлыста L и величина стрелы максимального прогиба a . Оба параметра генерируются в Simulink-модели и вносятся в пользовательскую панель Blender. На основании этих данных для срезов на высоте средней длины ребра, на высоте 1, 3 метра, на высоте $2/3$ от длины хлыста L и вершинном срезе при генерации

формируется значение координаты расположения сердцевины среза в зависимости от величины стрелы максимального прогиба a . Например, для вычисления координат сердцевины среза на уровне груди реализуется код, фрагмент, которого представлен ниже:

```
a130 = randint(0, (self.a))
bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(location = (a130, a130, 130))
```

Из фрагмента видно, что координата z определена константой 130, т.к. это значение общепринятого измерения диаметра груди, а координаты x и y рассчитываются с помощью функции `randint` в диапазоне от 0 до заданного значения величины стрелы максимального прогиба a .

Подобным образом строятся все срезы хлыста, то есть каждый срез имеет отклонение от центра оси координат в пределах максимального значения величины стрелы прогиба a . В последующем срезы будут соединены в единый ствол, благодаря чему появятся изгибы хлыста в одной или нескольких плоскостях. Пример моделирования цифрового прототипа хлыста ели с выраженной сложной кривизной представлен на рисунке 3.7.

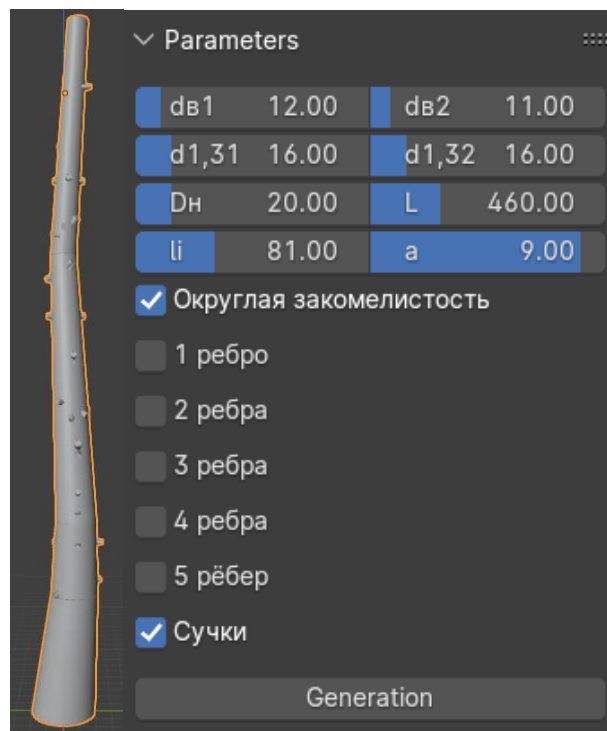


Рисунок 3.7 – Пример моделирования цифрового прототипа хлыста ели с выраженной сложной кривизной

Пример моделирования цифрового прототипа хлыста ели с выраженной простой кривизной представлен на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Пример моделирования цифрового прототипа хлыста ели с выраженной простой кривизной

Средний сбег представляет изменение диаметра в среднем на единицу длины. Пример моделирования цифрового прототипа хлыста ели с выраженной сбежистостью представлен на рисунке 3.9.

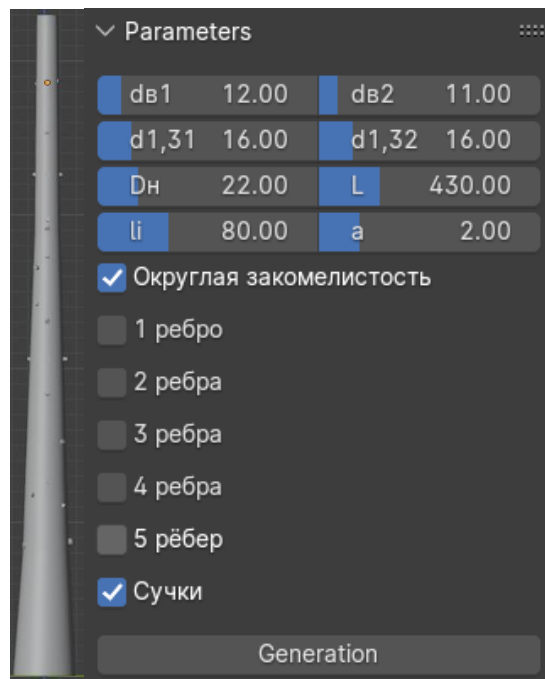


Рисунок 3.9 – Пример моделирования цифрового прототипа хлыста ели с выраженной сбежистостью

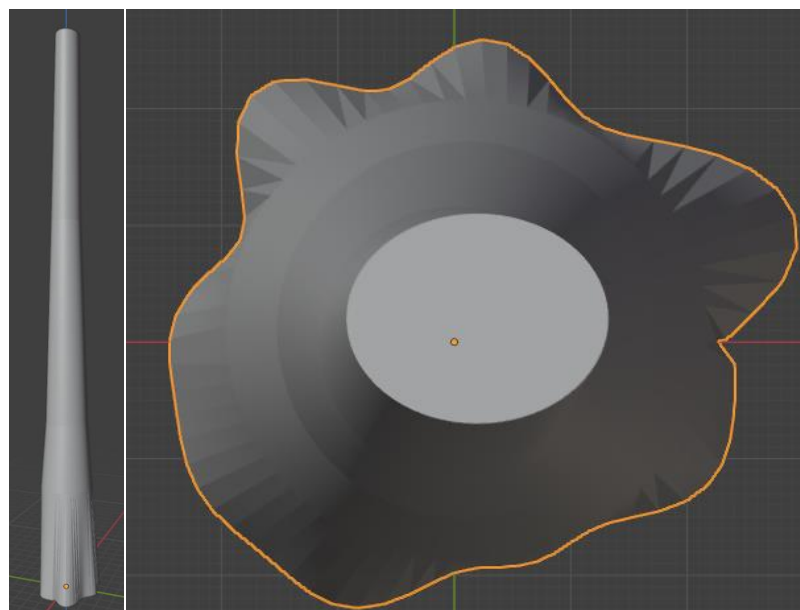
Отображение порока сбежистости при моделировании цифрового прототипа хлыста ели так же формируется в процессе методики построения объекта по срезам и отражается в разнице между диаметрами генерируемых срезов по длине ствола.

Под овальностью принято считать значительное отклонение поперечного сечения ствола от округлой формы [107]. Верхний диаметр определяет диаметр цилиндра, который может быть вписан в бревно, потому принят определяющим фактором при рассмотрении такого порока дерева, как овальность. Для отображения порока овальности ствола было реализовано 2 поля в интерфейсе пользователя $dv1$ и $dv2$, в которые вносятся ранее сгенерированные значения из Simulink-модели. С помощью данных полей происходит регулировка размера верхинного среза хлыста.

Фрагмент скрипта программной реализации данного алгоритма представлен ниже.

```
bpy.context.object.scale[0] = (self.dv1)
bpy.context.object.scale[1] = (self.dv2)
```

Пример моделирования цифрового прототипа хлыста ели с овальностью представлен на рисунке 3.10.



а) вид сбоку; б) вид сверху

Рисунок 3.10 – Пример моделирования цифрового прототипа хлыста ели с овальностью

3.2.5 Программная реализация порока сучковатости по длине цифрового прототипа хлыста ели

Сучковатость – это один из основных пороков породы ели. Обработка стволов ели затруднена из-за большой твердости сучков, что оказывает влияние на технологические деревообрабатывающие процессы и является значимым пороком древесины.

В панели пользователя дополнительно реализована опция по моделированию сучков для цифрового прототипа хлыста ели. Сучок является частью ветки, заключенной в стволе древесины [96]. Для ели свойственно мутовчатое расположение сучков по стволу, то есть данный дефект древесины проявляется в виде скопления трех и более сучков на одном уровне высоты ствола. Соответственно моделирование сучков ели в цифровом прототипе должно производиться так же мутовчато, как и в природе.

Для решения этой задачи был разработан следующий алгоритм:

1. Определить бессучковую зону.
2. Определить текущее расположение мутовки по оси Z .
3. Рассчитать значение диаметра текущего участка ствола.
4. Определить расстояние между мутовками.
5. Определить количество мутовок по стволу.
6. Определить коэффициент длины сучка в зависимости (sc_kn) от значения диаметра D_n .
7. Определить коэффициент уменьшения длины сучка (def_kn) для следующей мутовки в зависимости от значения диаметра D_n .
8. Рассчитать максимальную длину сучка с учётом коэффициента sc_kn для нижней мутовки.
9. Рассчитать наибольший диаметр сучка.
10. Определить количество сучков в i -ой мутовке.

11. Для каждой i -ой мутовки определяется угол распределения сучков по окружности в зависимости от количества.
12. Определить длину сучка с учётом коэффициента def_kn в i -ой мутовке.
13. Определить расстояние между i -ой и $i + 1$ мутовками.
14. Определить текущее расположение мутовки по оси Z .
15. Выполнить условие приближено ли текущее расположение i -ой мутовки по оси Z к высоте $2/3$ от общей высоты хлыста. Если условие выполняется, то радиус сучка будет наибольшим, иначе будет рандомно выбрано значение от 1.5 см до значения диаметра наибольшего сучка.
16. Определить наклон j -го сучка в i -ой мутовке по осям X и Y .
17. Задать расположение по оси Z для j -го сучка в i -ой мутовке в зависимости от количества сучков в мутовке.
18. Смоделировать по полученным параметрам j -е сучки в i -ой мутовке.

Для моделирования мутовок были определены следующие дополнительные параметры системы:

bz – бессучковая зона

lm – расстояние между мутовками

nl – количество мутовок по стволу

$current_location$ – текущее значение по оси Z

Рассмотрим данные параметры подробнее. Бессучковая зона находится между основанием ствола дерева и первым сучком на стволе [117]. В исследовании М.Я. Обросова [5] отмечено, что длина бессучковой зоны рассматривается как случайная величина, распределенная по нормальному закону, представлена в формуле 3.6.

$$L_i = L_{cp\ i} + \sigma_{Li}^{\delta}, \quad (3.6)$$

где L_i – длина бессучковой зоны, м;

$L_{cp\ i}$ – математическое ожидание длины бессучковой зоны, м;

σ_{Li} – среднеквадратичное отклонение, м;

δ – псевдослучайное число со стандартным нормальным распределением.

По исследованиям Э.А. Павлова зависимость длины бессучковой зоны от диаметра ствола выражена в формуле 3.7 и близка к линейной [5].

$$L_{cp\ i} = a_3 D_i + b_3, \quad (3.7)$$

где D_i – диаметр ствола на высоте груди, см;

a_3, b_3 – коэффициенты, рассчитываемые для породы дерева.

Для ели коэффициенты имеют следующие значения $a_3 = 0,1$, $b_3 = 4$, что отражено в формуле 3.8.

$$L_{cp\ i} = 0,1 D_i + 4 \quad (3.8)$$

В формуле 3.9 предложено среднеквадратичное отклонение [5].

$$\sigma_{L_i} = 0,2 L_{cp\ i} \quad (3.9)$$

Согласно исследованиям Дорофеева Л.Г., расстояние между мутовками, так же, как и диаметр сучьев, имеет тесную корреляционную связь с толщиной ствола и носит степенной характер для ели [116], что представлено в формуле 3.10.

$$l = 11,2 D^{0,36}, \quad (3.10)$$

где l – расстояние между мутовками, см;

D – диаметр участка ствола, см.

Для расчета текущего диаметра Л.Г. Дорофеев предлагает формулу 3.11 [116].

$$D = D_{1,3} - \frac{S_{cp}}{100} (L - 1,3), \quad (3.11)$$

где $D_{1,3}$ – диаметр на высоте груди, см;

S_{cp} – средний сбег ствола, см;

L – текущее значение длины ствола (расстояние от комлевого среза до исследуемого сечения), см.

Количество мутовок по стволу рассчитывается по формуле 3.12.

$$n_l = ((L - bz) / l_m) - 1 \quad (3.12)$$

где n_l – количество мутовок по стволу, шт;

L – длина ствола, см;

bz – бессучковая зона, см;

l_m – расстояние между мутовками, см.

Из формулы можно сделать вывод, что из общей длины хлыста вычитается та область, в которой сучьев нет, затем разница делится на ранее рассчитанное расстояние между мутовками. Единица вычитается, так как мутовка на $2/3$ высоты хлыста строится отдельно с учётом того, что на ней расположены сучки с наибольшим диаметром [115].

Фрагмент кода представлен ниже:

```
if self.change_even7:
    bzsr = (0.1*self.dg1+4)*10
    q = random.normalvariate(0, 1)
    qLi = 0.2*bzsr
    bz = bzsr + qLi**q
    current_location = bz
    Di = self.dg1 - Scp/100*(current_location-130)
    lm = 11.2*(Di**0.36)
    nl = ((self.L - bz)/math.trunc(lm)) - 1
```

Текущее значение расположения мутовки откладывается от бессучковой зоны, затем в цикле будет прибавляться значение переменной l_m .

Далее в цикле распределяются сучки по определенным выше мутовкам. Для формирования сучьев были приняты следующие параметры:

$scale_knot$ – размер сучка.

$radius_knot$ – наибольший радиус сучка.

$vert_count$ – определение количества сучков в мутовке.

angle_step – определение шага угла по окружности для сучка, в зависимости от их количества.

sc_kn – коэффициент размера сучка в зависимости от значения диаметра $d_{1,3}$.

def_kn – коэффициент уменьшения диаметра сучка для следующей мутовки в зависимости от значения диаметра $d_{1,3}$.

Для установления связи диаметра сучьев с толщиной участка ствола Л.Г. Дорофеев провел исследование, в результате которого с вероятностью 0,68 диаметр сучьев ели варьирует $2,7 \pm 1,2$ см [116], получается, что диаметр текущего сучка входит в диапазон значений от 1,5 см до 3,9 см. Расчёт диаметра сучьев ели представлен в формуле 3.13.

$$d = 1,22D^{0,294}, \quad (3.13)$$

где D – диаметр участка ствола, см.

Учитывая результаты работ В.П. Стяжкина [115], при построении среза на высоте $2/3$ от длины хлыста было получено значение диаметра на высоте, D_{23} . Таким образом, формула 3.14 представляет расчёт наибольшего диаметра сучка.

$$d = 1,22 D_{23}^{0,294}, \quad (3.14)$$

где D_{23} – диаметр ствола на высоте $2/3$ от длины хлыста, см.

Экспериментальным методом были подобраны коэффициенты длины сучка в зависимости от значения диаметра $d_{1,3}$ (sc_kn) и уменьшения диаметра сучка (def_kn) для следующей мутовки в зависимости от значения диаметра D_n . Далее в цикле строятся мутовки от 1 до ранее рассчитанного параметра n_l (количество мутовок по стволу). По расчетам М.Я. Обросова количество сучьев в мутовке ели варьируется от 1 до 8 [5]. В виду того, что сучок при генерации проходит ствол насквозь, то принято случайное определение количества сучков от 1 до 4, в результате моделирования на стволе в одной мутовке будет от 1 до 8 сучков. Для каждой i -ой мутовки определяется количество сучков в мутовке и угол их

распределения по окружности. Устанавливается длина сучка с учётом коэффициента `def_kn` и расположение i -ой мутовки по оси Z .

По исследованиям Стяжкина В. П. следует, что самые крупные сучки, имеющие максимальный диаметр, находятся на высоте $2/3$ от общей высоты деревьев [115]. Исходя из этого введено следующее условие для текущего расположения по оси Z (`current_location`):

```
if (l23 - lm)<= current_location <= (l23+ lm):
```

Если переменная `current_location` приближена к высоте $2/3$ от общей высоты хлыста, то радиус сучка будет наибольшим, иначе будет рандомно выбрано значение от 1.5 см до значения диаметра наибольшего сучка, `radius_knot`. Фрагмент кода описанного алгоритма представлен ниже.

```
for i in range(math.trunc(nl)):
    vert_count = randint(1, 4)
    angle_step = 2 * math.pi /vert_count # угол
    окружности мутовки
    scale_knot -= def_kn
    current_location = current_location+math.trunc(lm)
    if (l23 - lm)<= current_location <= (l23+ lm):
```

Далее запускается внутренний цикл по построению j -го сучка до значения переменной `vert_count` (количества сучков в мутовке). Для каждого j -го сучка в i -ой мутовке рандомно определяется наклон сучка в диапазоне значений от 45 до 145 радиан. По полученным ранее параметрам генерируется j -й сучок. В зависимости от количества сучков в мутовке были прописаны координаты наклона j -го сучка в i -ой мутовке. Фрагмент скрипта программной реализации данного алгоритма представлен ниже.

```
if (l23 - lm)<= current_location <= (l23+ lm):
    for j in range(vert_count):
        random_rotation = randint(45,145) #
    рандомное определение наклона сучка от 45 до 145
        bpy.ops.mesh.primitive_cylinder_add(radius
= radius_knot, scale = (1, 1, scale_knot), location =(self.a,
self.a, current_location))
        obj = bpy.context.active_object
```

```

        if vert_count == 1:
            obj.rotation_euler.x =
math.radians(random_rotation)
            obj.rotation_euler.y =
math.radians(random_rotation)
            obj.rotation_euler.z =
math.radians(180)
        if vert_count == 2:
            if j%2 == 1:
                obj.rotation_euler.x =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.y = 0
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(90)
            else:
                obj.rotation_euler.x = 0
                obj.rotation_euler.y =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(180)
        if vert_count == 3:
            if j == 0:
                obj.rotation_euler.x = 0
                obj.rotation_euler.y =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(180)
            if j == 1:
                obj.rotation_euler.x =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.y = 0
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(45)
            if j == 2:
                obj.rotation_euler.x =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.y = 0
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(145)
        if vert_count == 4:
            obj.rotation_euler.z =
math.radians(180)
            if j%2 == 1:
                obj.rotation_euler.x =
math.radians(90)
                obj.rotation_euler.y = 0
            else:
                obj.rotation_euler.x = 0
                obj.rotation_euler.y =
math.radians(90)
    else:
        for j in range(vert_count):
            radius_knot = np.random.uniform(1.5,
radius_knot)
            round_radius_knot = round(radius_knot, 2)
            random_rotation = randint(45,145)

```

```

        bpy.ops.mesh.primitive_cylinder_add(radius
= round_radius_knot, scale = (1, 1, scale_knot), location =(self.a,
self.a, current_location))
        obj = bpy.context.active_object
        if vert_count == 1:
            obj.rotation_euler.x =
math.radians(random_rotation)
            obj.rotation_euler.y =
math.radians(random_rotation)
            obj.rotation_euler.z =
math.radians(180)
        if vert_count == 2:
            if j%2 == 1:
                obj.rotation_euler.x =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.y = 0
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(90)
            else:
                obj.rotation_euler.x = 0
                obj.rotation_euler.y =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(180)
        if vert_count == 3:
            if j == 0:
                obj.rotation_euler.x = 0
                obj.rotation_euler.y =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(180)
            if j == 1:
                obj.rotation_euler.x =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.y = 0
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(45)
            if j == 2:
                obj.rotation_euler.x =
math.radians(random_rotation)
                obj.rotation_euler.y = 0
                obj.rotation_euler.z =
math.radians(145)
        if vert_count == 4:
            obj.rotation_euler.z =
math.radians(180)
            if j%2 == 1:
                obj.rotation_euler.x =
math.radians(90)
                obj.rotation_euler.y = 0
            else:
                obj.rotation_euler.x = 0
                obj.rotation_euler.y =
math.radians(90)

```

Пример хлыста ели с ярко выраженной сучковатостью представлен на рисунке 3.11.

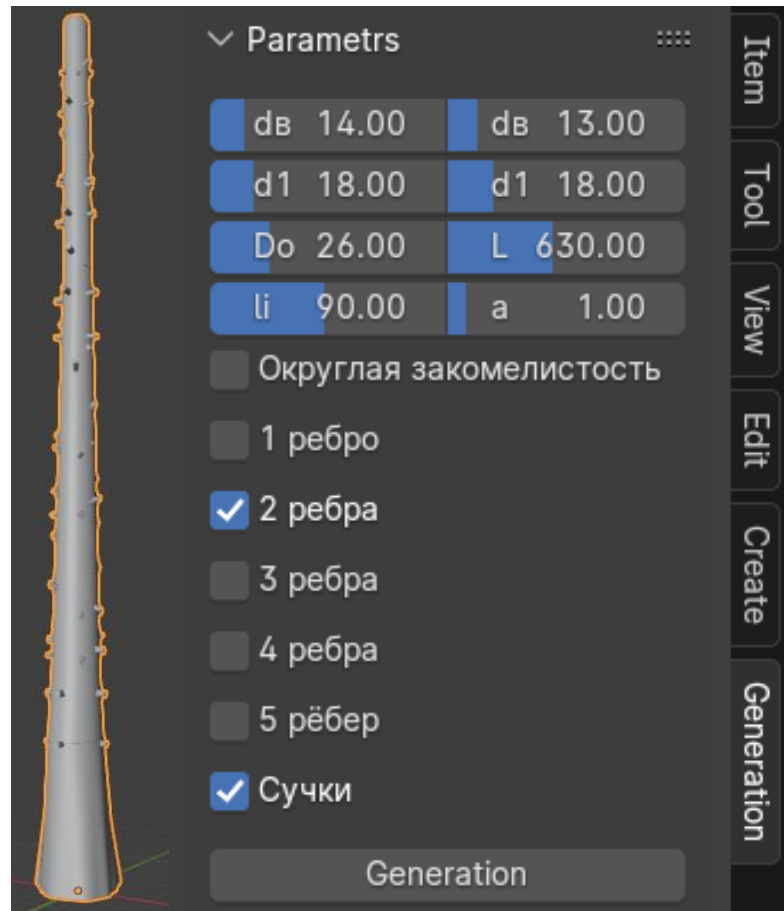


Рисунок 3. 11 – Пример прототипа хлыста ели с выраженной сучковатостью

3.3 Выводы по третьей главе

Результаты исследований, приведенные в третьей главе, позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработаны общая схема, методика и алгоритм построения цифрового прототипа хлыста ели с компьютерной реализацией и пользовательским интерфейсом Parameters, что позволяет пользователю настраивать генерацию объекта в удобном для восприятия формате.

2. Впервые разработан и программно реализован алгоритм моделирования микропрофиля закомелистости любого типа по поверхности комлевого среза

хлыста ели, что позволяет заранее спрогнозировать выход товарной продукции при распиловке, раскросе и лущении круглых лесоматериалов. Для проектирования деревообрабатывающей техники знание микропрофиля дерева позволяет анализировать динамику работы машины при воздействии неровностей, так же могут быть исследованы динамические нагрузки на оборудование еще на начальных этапах разработки деревообрабатывающего станка.

3. Для полного завершения модели цифрового прототипа хлыста ели предложена методика моделирования пороков формы ствола и построения таких параметров сучковатости, как бессучковая зона, расстояние между мутовками, количество мутовок по стволу, количество сучков в мутовке, наибольший диаметр сучка. Методика реализована в алгоритме и программном коде. В полном объеме программный код приведен в приложении Б.

4. Разработанная параметрическая модель прототипа хлыста ели может быть внедрена в проектную практику и позволить проводить расчёты и тестирование оборудования без физического прототипа. Цифровой прототип заменяет физический объект, предоставляя возможность учёным и инженерам проводить многократное моделирование различных вариантов конструктивных решений оборудования, как со стандартным лесоматериалом, так и с пороками формы ствола, наиболее близко отражающими настоящее дерево.

5. Адекватность всех разработанных моделей, цифрового прототипа требуют экспериментальной проверки, что предусмотрено в четвертой главе.

ГЛАВА 4 ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ПРОТОТИПА ХЛЫСТА ЕЛИ

4.1 Технология выполнения численного эксперимента

Для цифрового прототипирования хлыста ели определяющим фактором выступает форма ствола, которую характеризуют следующие пороки формы: кривизна, овальность, закомелистость и сбежистость. В свою очередь параметрами моделирования, определяющими форму ствола породы ель, являются следующие количественные показатели: длина хлыста, толщина на уровне 1,3 м, диаметр верхинный, поперечный диаметр верхинный, диаметр нижний, стрела прогиба, количество ребер, ср. длина ребра. Наибольшая сложность в моделировании древесного хлыста выражается в уникальности данных объектов, потому как каждый количественный показатель имеет значительный диапазон значений, что в совокупности создает множество оригинальных экземпляров прототипа елового хлыста.

В рамках численного эксперимента предлагается смоделировать отличные друг от друга экземпляры прототипа хлыста ели. Технология моделирования состоит из двух этапов:

1. Моделирование размерно-качественных характеристик для текущего образца ели с использованием нейронной сети и имитационной модели, выполненной в среде компьютерной математики MATLAB.

2. Автоматическое моделирование цифрового прототипа хлыста ели на языке программирования Python в программном комплексе Blender по данным параметрам.

Для образца хлыста ели № 1 заданы параметры длины L равной 430 см и толщины на уровне 1,3 м равной 16 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.1.

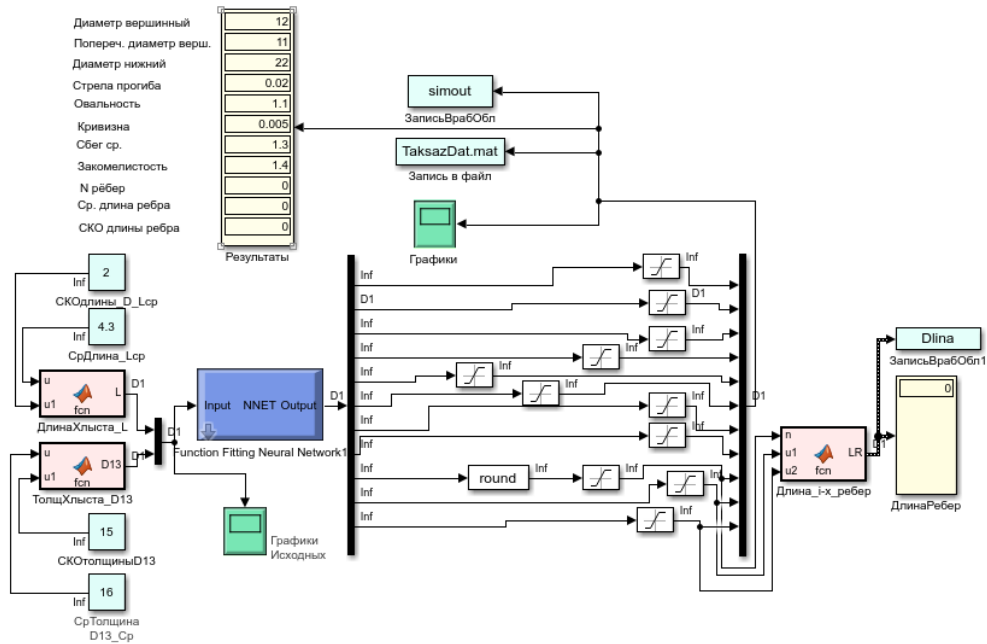


Рисунок 4.1 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №1

Полученные результаты параметров Simulink-модели применяются для цифрового прототипирования с представлением хлыста в виде 3-D модели. Значения данных параметров заносятся в панель пользователя и в рабочей сцене программы будет сгенерирован цифровой прототип хлыста ели по заданным параметрам. Образец прототипа хлыста ели № 1 представлен на рисунке 4.2.

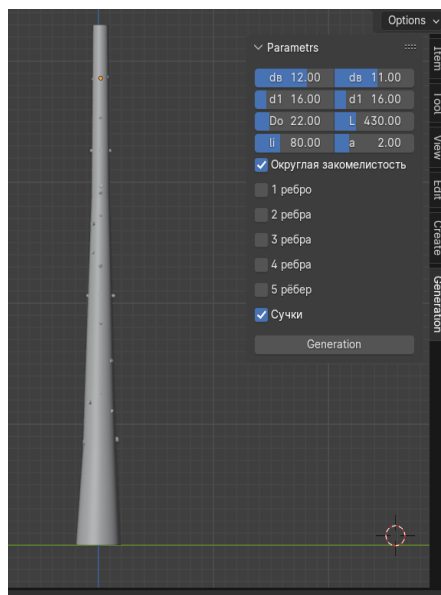


Рисунок 4.2 – Образец прототипа хлыста ели № 1

Для образца хлыста ели № 2 заданы параметры длины L равной 330 см и

толщины на уровне 1,3 м равной 10 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.3.

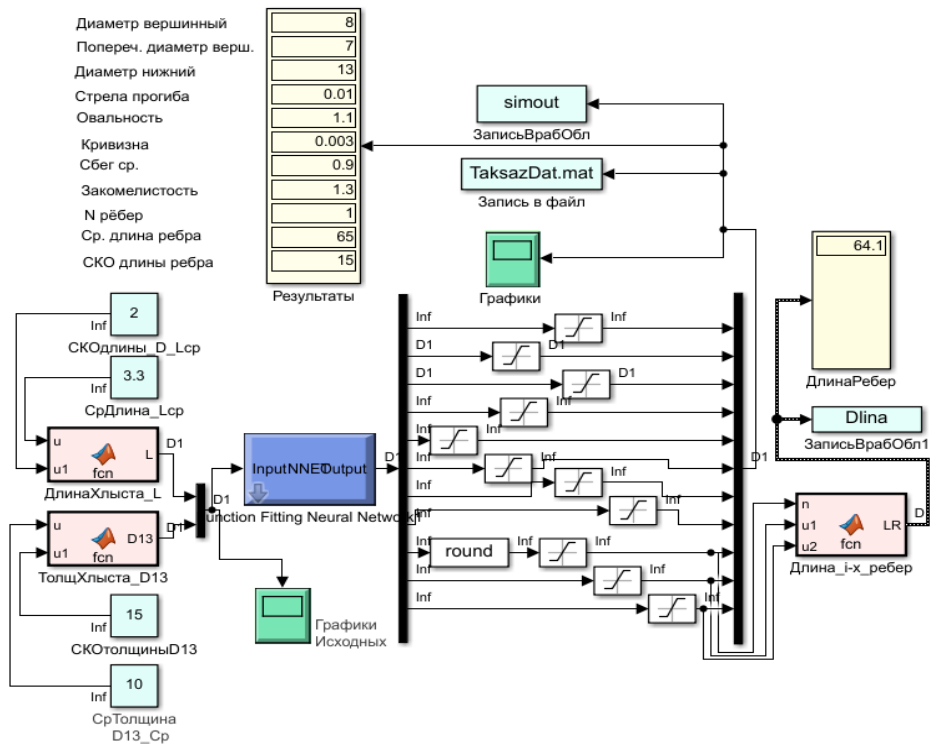


Рисунок 4.3 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №2

Результаты моделирования из Simulink-модели передаются в пользовательскую панель, после чего строится цифровой прототип хлыста ели, соответствующий заданным параметрам. Образец прототипа хлыста ели № 2 проиллюстрирован на рисунке 4.4.

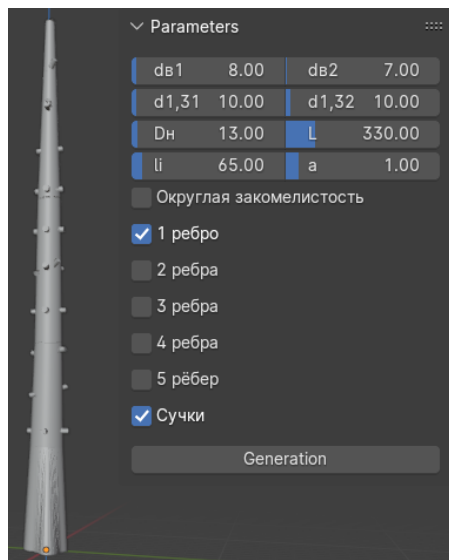


Рисунок 4. 4 – Образец прототипа хлыста ели № 2

Для образца хлыста ели № 3 заданы параметры длины L равной 700 см и толщины на уровне 1,3 м равной 30 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.5.

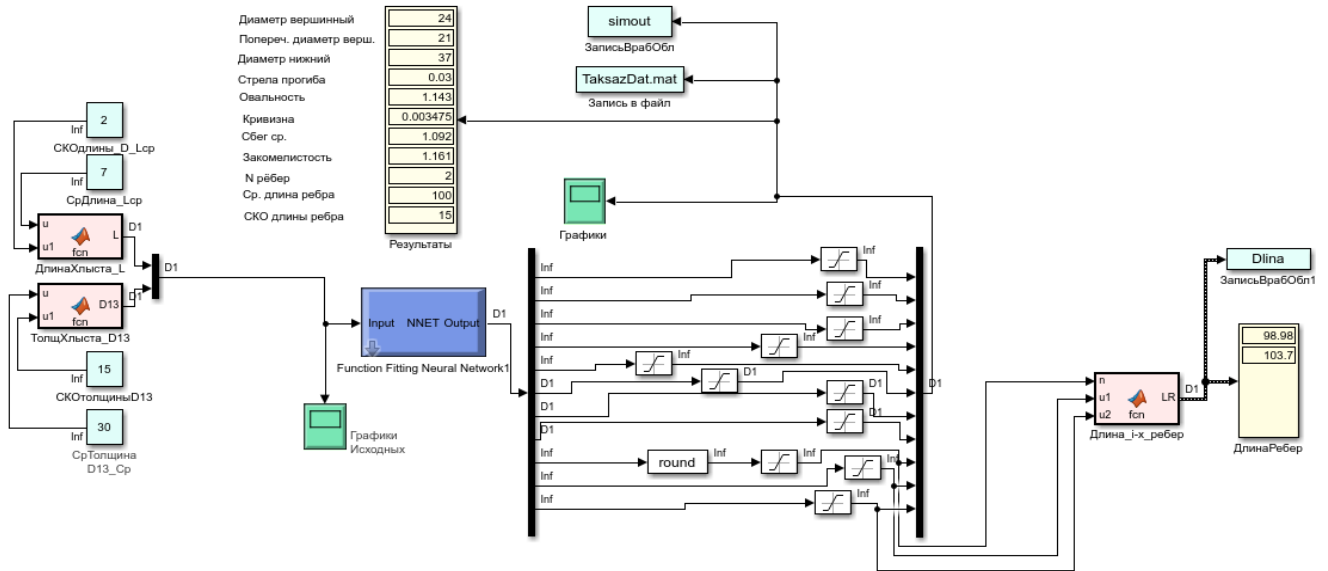


Рисунок 4.5 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №3

Данные параметров, рассчитанные в Simulink-модели, интегрируются в интерфейс пользователя. Образец прототипа хлыста ели № 3 представлен на рисунке 4.6.

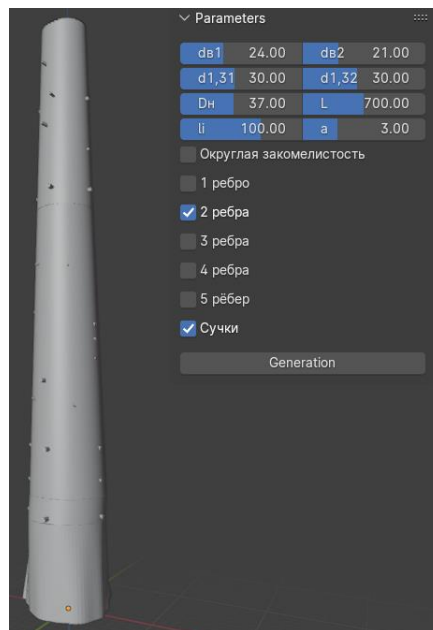


Рисунок 4.6 – Образец прототипа хлыста ели № 3

Для образца хлыста ели № 4 заданы параметры длины L равной 830 см и толщины на уровне 1,3 м равной 36 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.7.

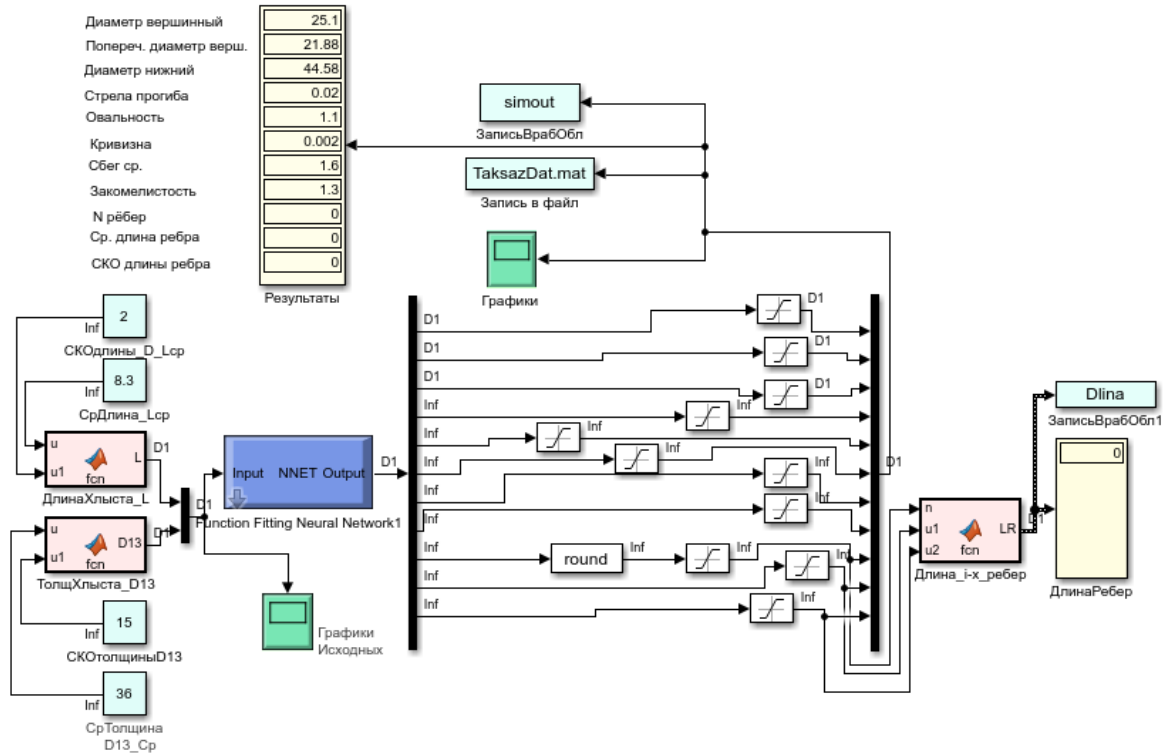


Рисунок 4.7 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №4

Выходные данные параметров Simulink-модели загружаются в панель пользователя. Образец прототипа хлыста ели № 4 изображен на рисунке 4.8.

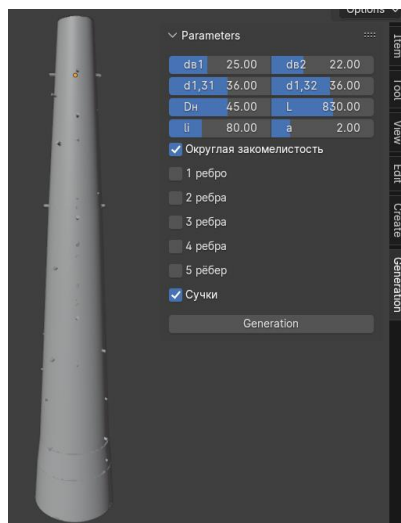


Рисунок 4.8 – Образец прототипа хлыста ели № 4

Для образца хлыста ели № 5 заданы параметры длины L равной 670 см и толщины на уровне 1,3 м равной 28 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.9.

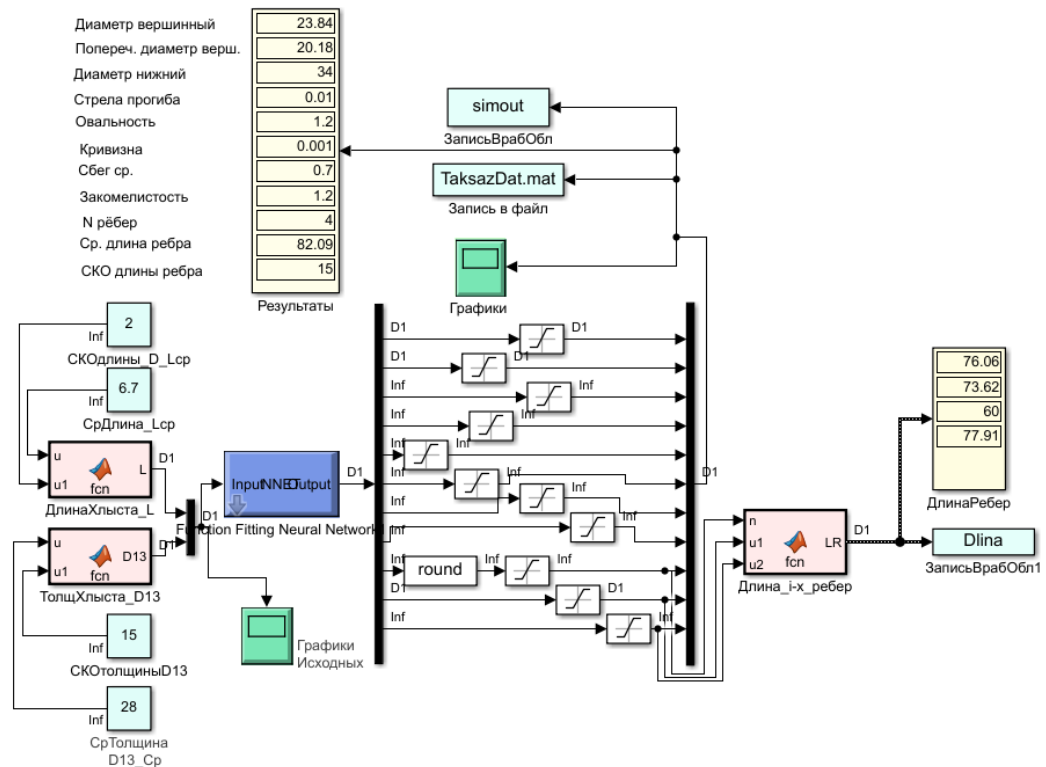


Рисунок 4.9 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №5. Параметры, экспортированные из Simulink-модели, отображаются в пользовательском интерфейсе. Образец прототипа хлыста ели № 5 представлен на рисунке 4.10.

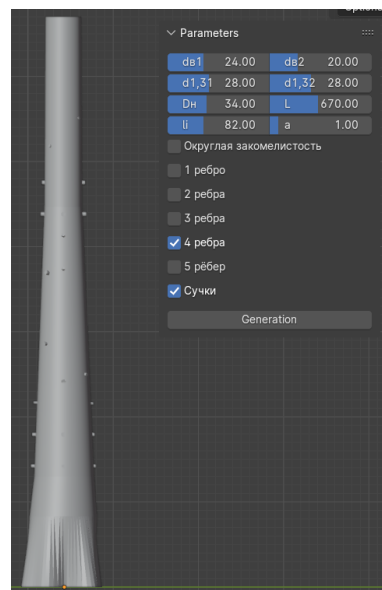


Рисунок 4.10 – Образец прототипа хлыста ели № 5

Для образца хлыста ели № 6 заданы параметры длины L равной 1050 см и толщины на уровне 1,3 м равной 42 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.11.

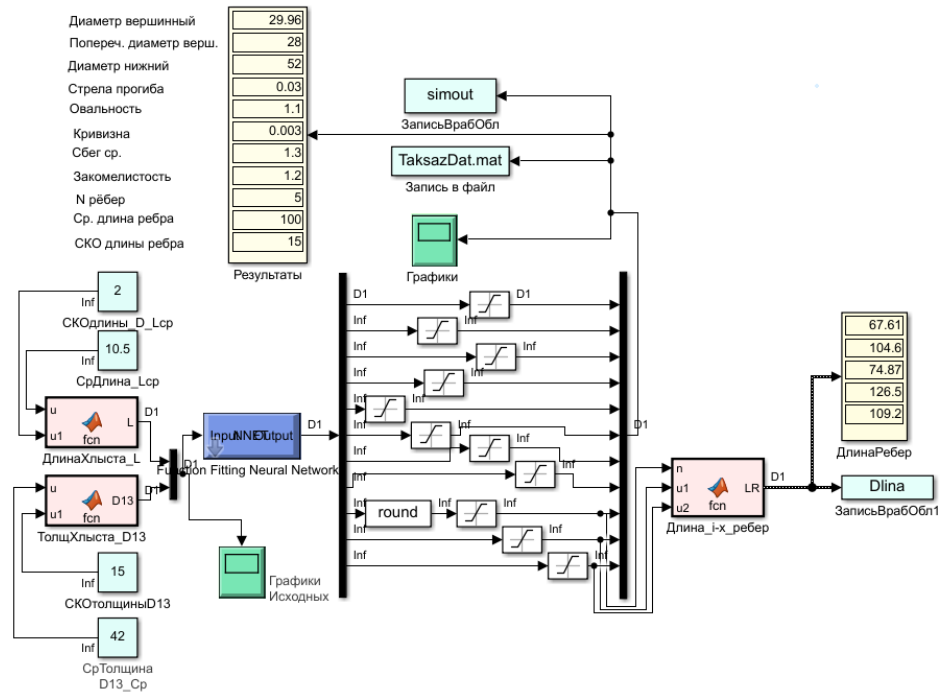


Рисунок 4.11 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №6

По полученным данным в ходе работы программы сгенерирован цифровой прототип хлыста ели. Образец прототипа хлыста ели № 6 приведен на рисунке 4.12.

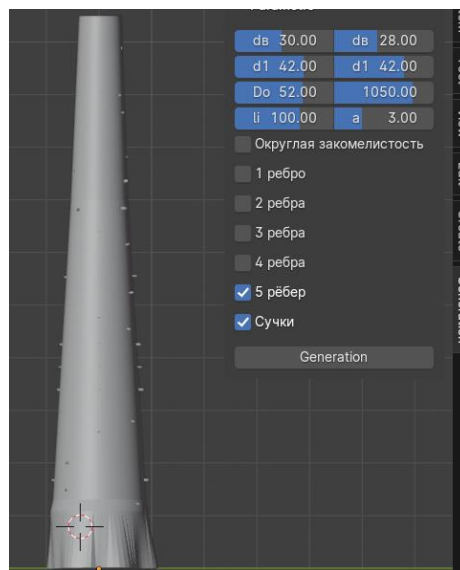


Рисунок 4.12 – Образец прототипа хлыста ели № 6

Для образца хлыста ели № 7 заданы параметры длины L равной 520 см и толщины на уровне 1,3 м равной 26 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.13.

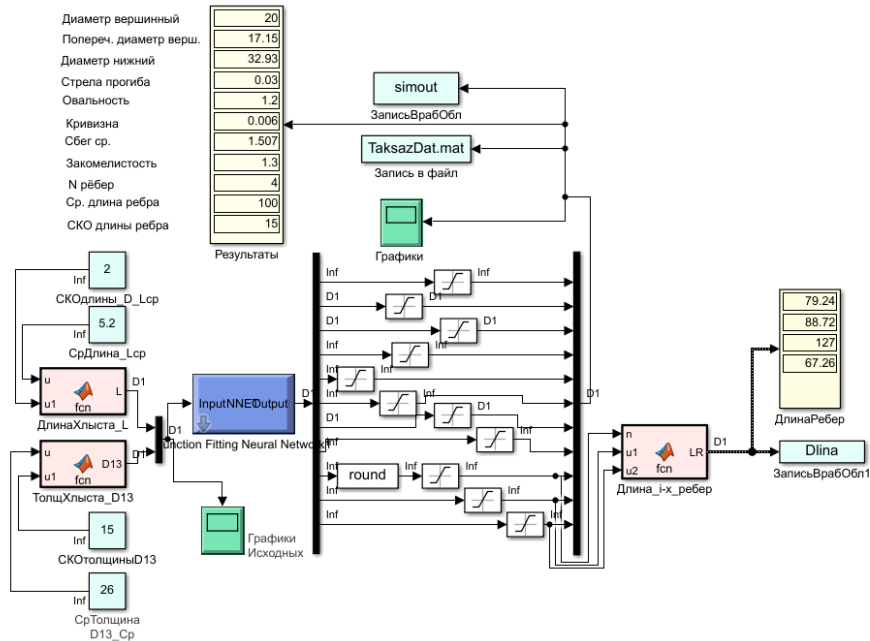


Рисунок 4.13 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №7

На основе выходных параметров Simulink-модели смоделирован цифровой прототип хлыста ели. Образец прототипа хлыста ели № 7 представлен на рисунке 4.14.

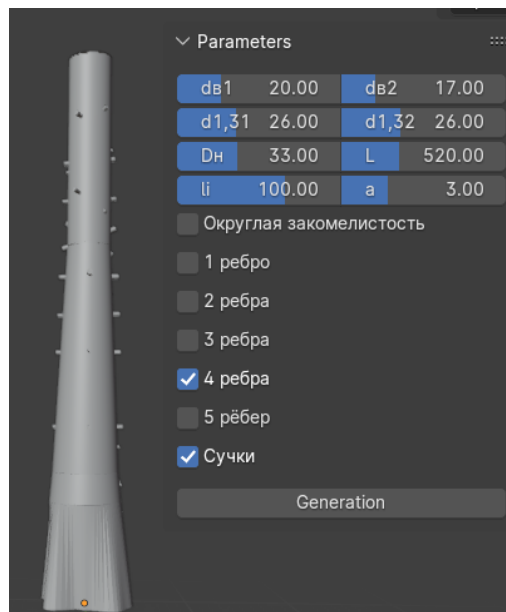


Рисунок 4.14 – Образец прототипа хлыста ели № 7

Для образца хлыста ели № 8 заданы параметры длины L равной 780 см и толщины на уровне 1,3 м равной 32 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.15.

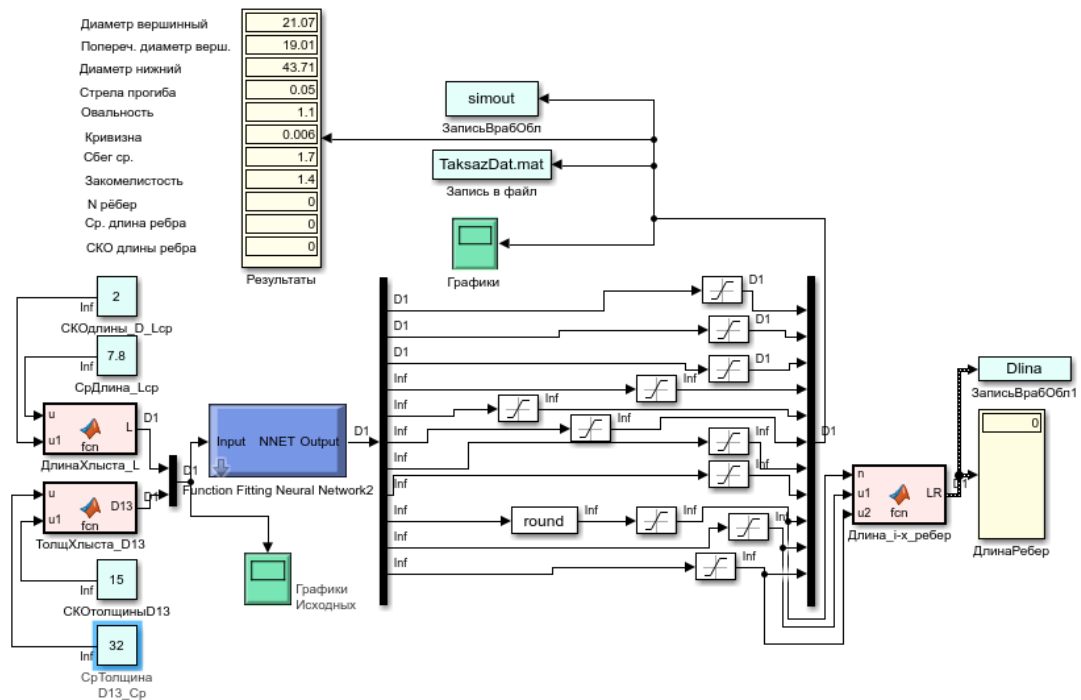


Рисунок 4. 15 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №8

Данные параметров, рассчитанные в Simulink-модели, интегрируются в интерфейс пользователя. Далее в ходе работы программы будет построен соответствующий цифровой прототип хлыста ели. Образец прототипа хлыста ели № 8 приведен на рисунке 4.16.

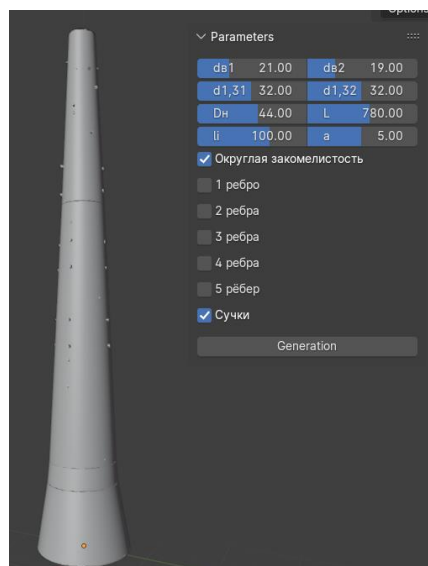


Рисунок 4.16 – Образец прототипа хлыста ели № 8

Для образца хлыста ели № 9 заданы параметры длины L равной 850 см и толщины на уровне 1,3 м равной 29 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.17.

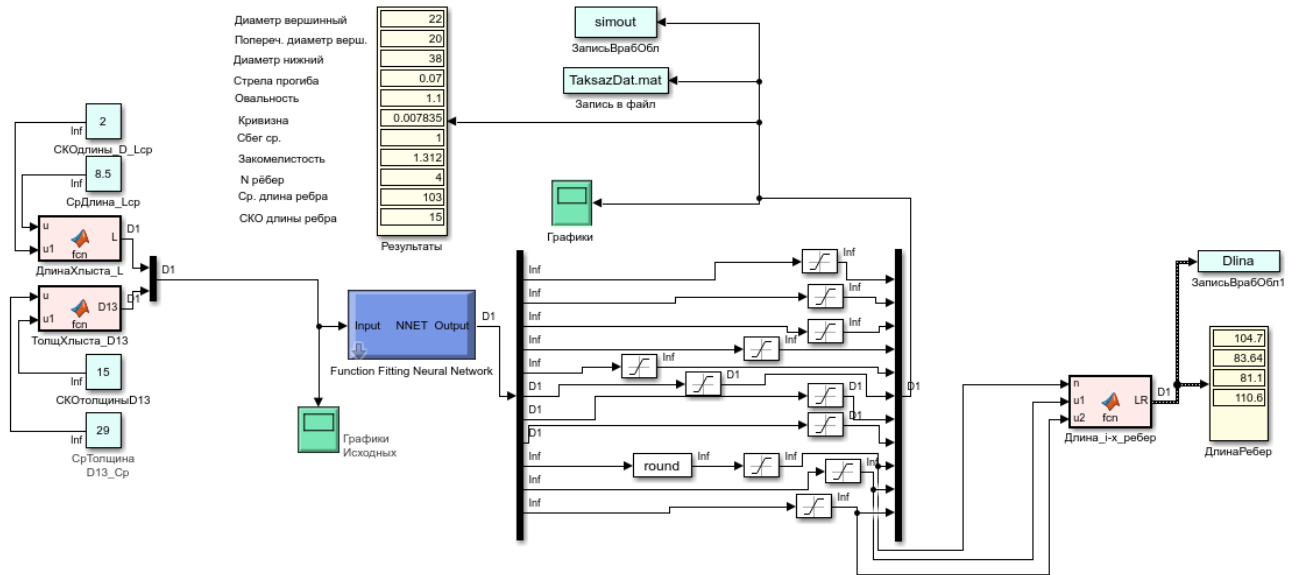


Рисунок 4.17 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №9

По результатам работы Simulink-модели в рабочей сцене Blender сформирован цифровой прототип хлыста ели. Образец прототипа хлыста ели № 9 представлен на рисунке 4.18.

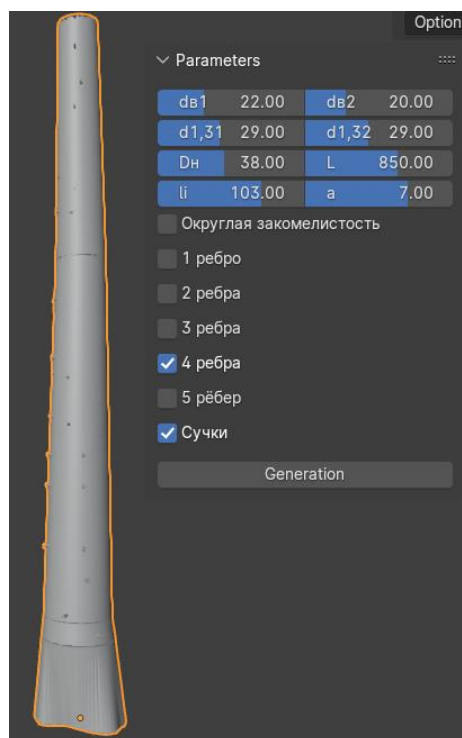


Рисунок 4.18 – Образец прототипа хлыста ели № 9

Для образца хлыста ели № 10 заданы параметры длины L равной 460 см и толщины на уровне 1,3 м равной 16 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.19.

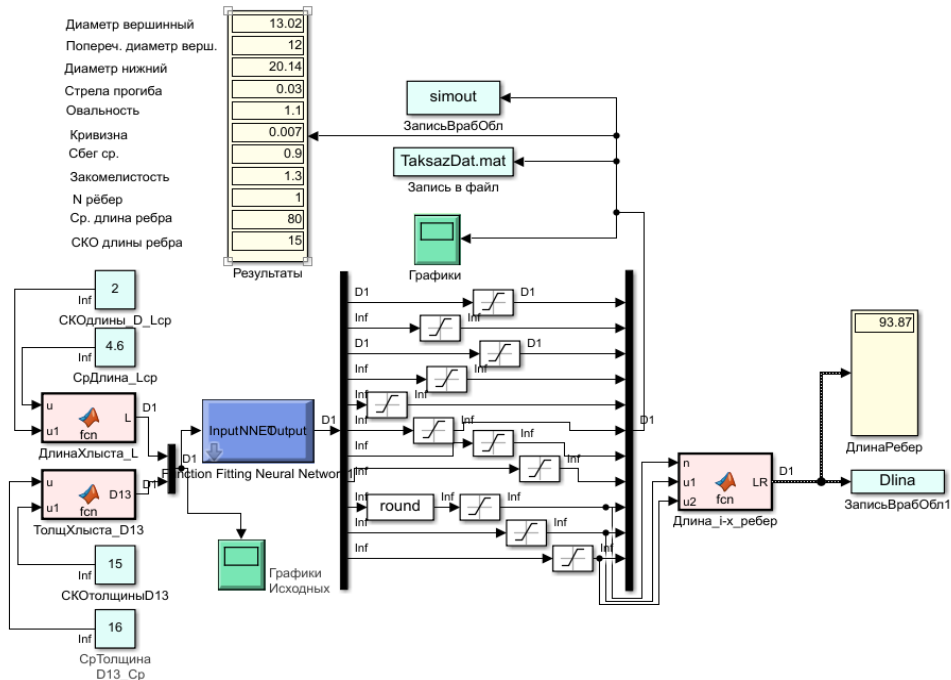


Рисунок 4.19 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №10

По результатам моделирования Simulink-модели сформирован цифровой прототип хлыста ели, соответствующий заданным параметрам. Образец прототипа хлыста ели № 10 представлен на рисунке 4.20.

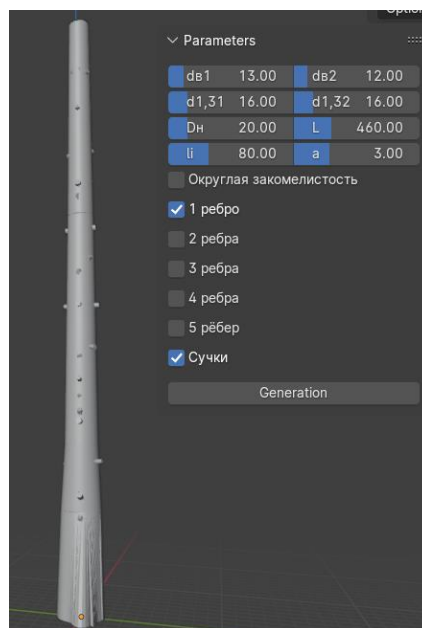


Рисунок 4.20 – Образец прототипа хлыста ели № 10

Для образца хлыста ели № 11 заданы параметры длины L равной 600 см и толщины на уровне 1,3 м равной 21 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.21.

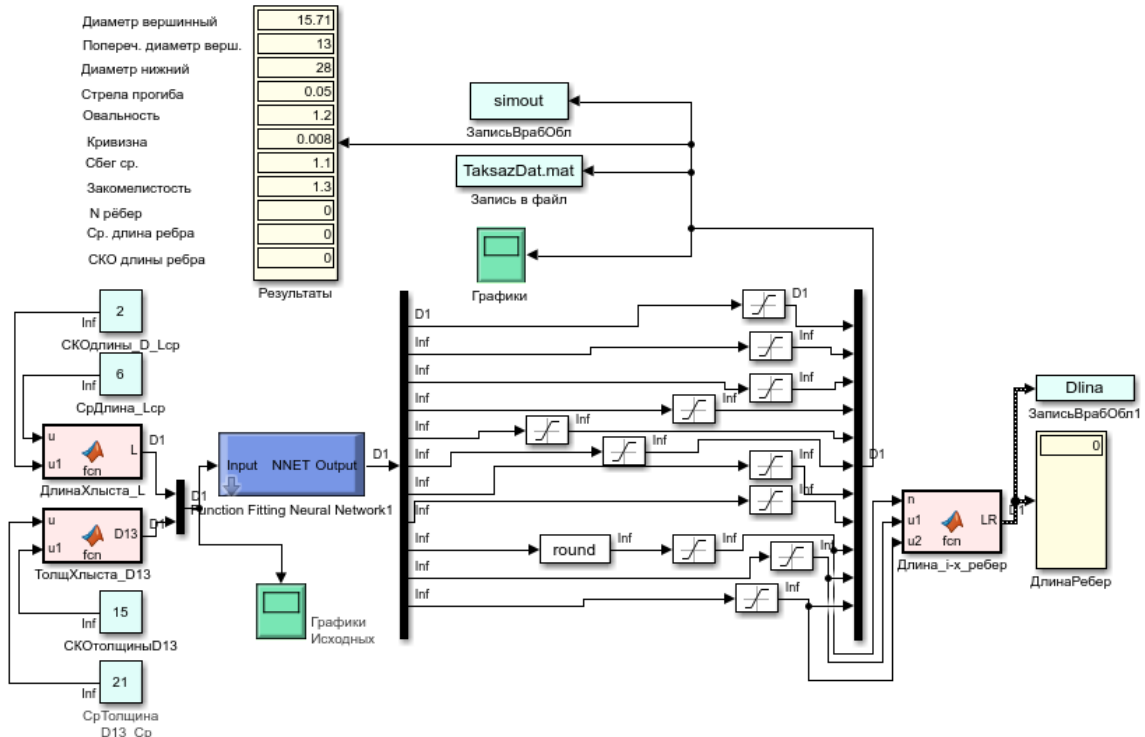


Рисунок 4.21 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №11

Образец прототипа хлыста ели № 11 представлен на рисунке 4.22.

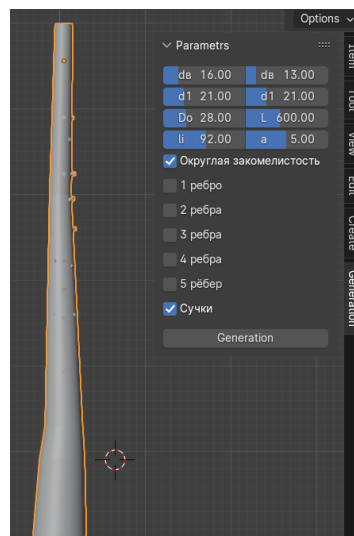


Рисунок 4.22 – Образец прототипа хлыста ели № 11

Для образца хлыста ели № 12 заданы параметры длины L равной 910 см и толщины на уровне 1,3 м равной 37 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.23.

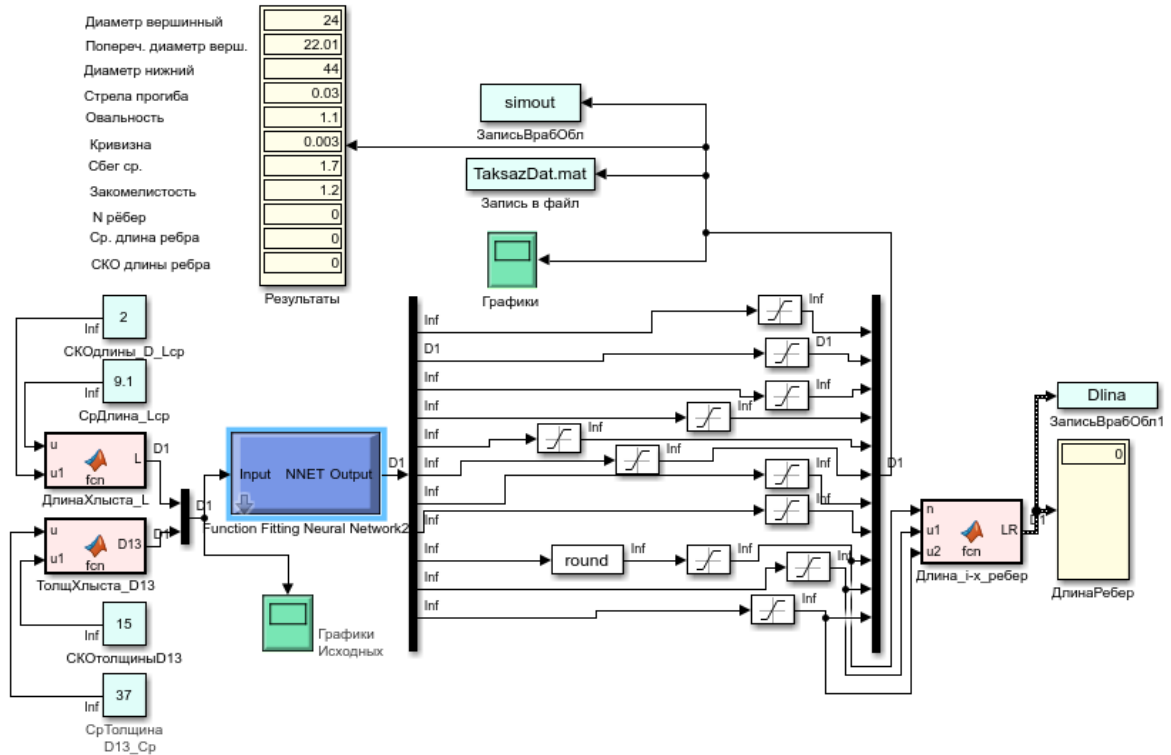


Рисунок 4.23 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №12

Выходные данные параметров Simulink-модели вносятся в панель пользователя, и на её основе в рабочей сцене программы будет сгенерирован цифровой прототип хлыста ели. Образец прототипа хлыста ели № 12 изображен на рисунке 4.24.

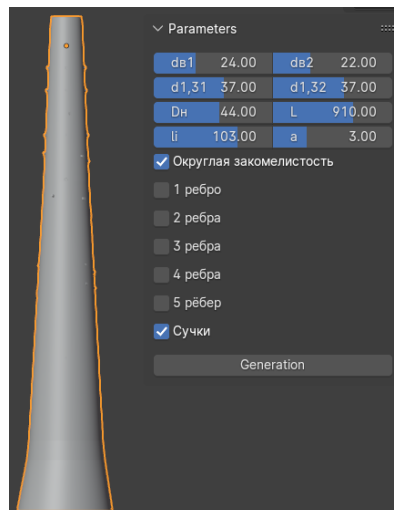


Рисунок 4.24 – Образец прототипа хлыста ели № 12

Для образца хлыста ели № 13 заданы параметры длины L равной 810 см и толщины на уровне 1,3 м равной 32 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.25.

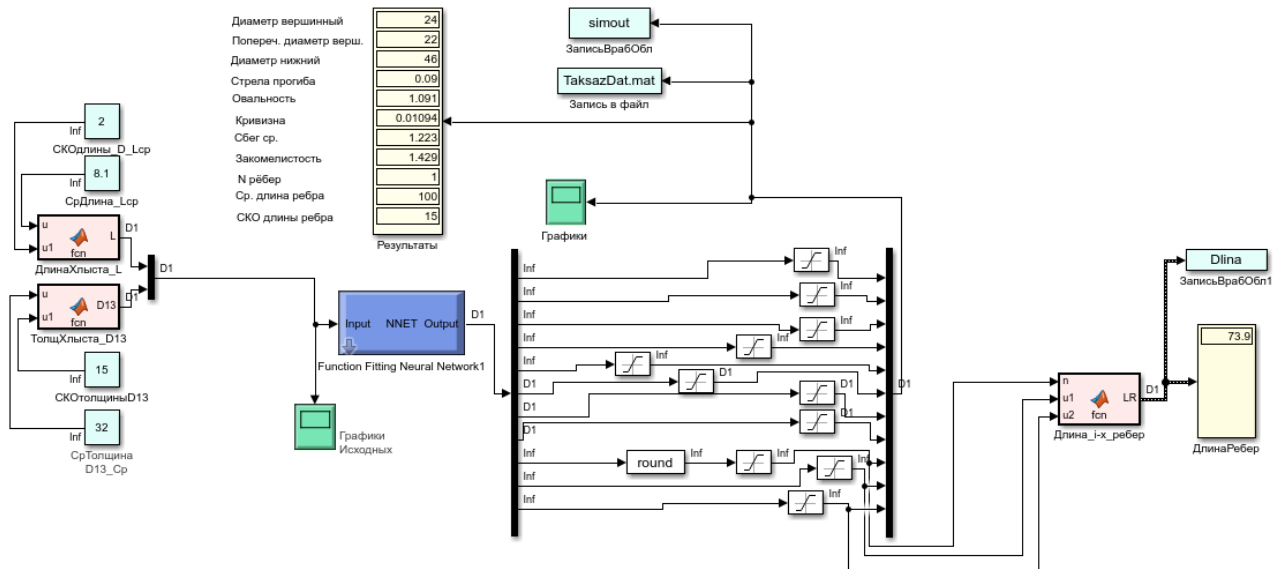


Рисунок 4.25 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №13

Параметры, экспортированные из Simulink-модели, отображаются в пользовательском интерфейсе. В ответ на эти данные программа автоматически строит цифровой прототип хлыста ели. Образец прототипа хлыста ели № 13 представлен на рисунке 4.26.

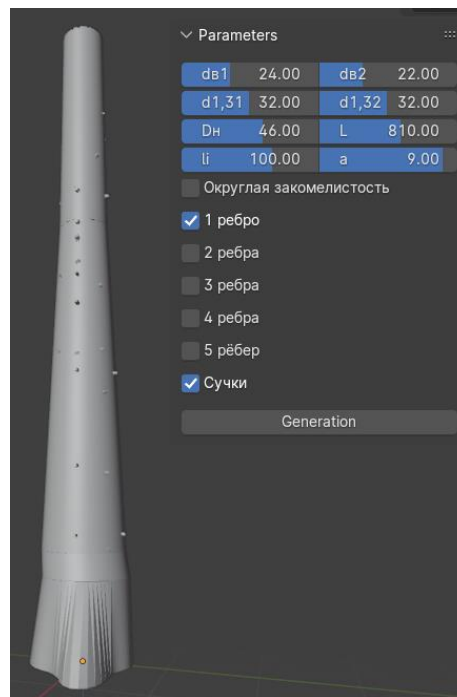


Рисунок 4.26 – Образец прототипа хлыста ели № 13

Для образца хлыста ели № 14 заданы параметры длины L равной 650 см и толщины на уровне 1,3 м равной 30 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.27.

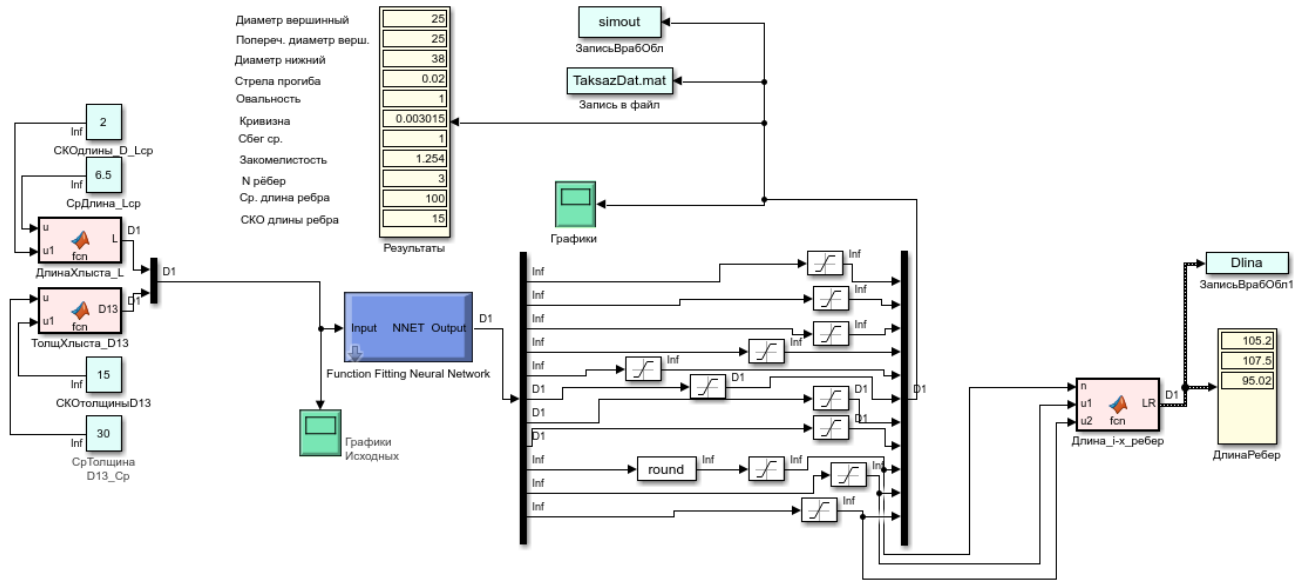


Рисунок 4.27 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №14

По данным параметрам смоделирован образец прототипа хлыста ели № 14, который представлен на рисунке 4.28.

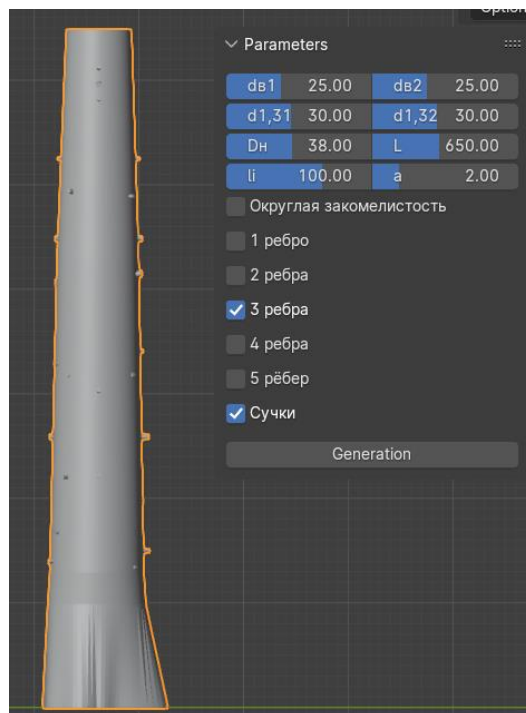


Рисунок 4.28 – Образец прототипа хлыста ели № 14

Для образца хлыста ели № 15 заданы параметры длины L равной 530 см и толщины на уровне 1,3 м равной 24 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.29.

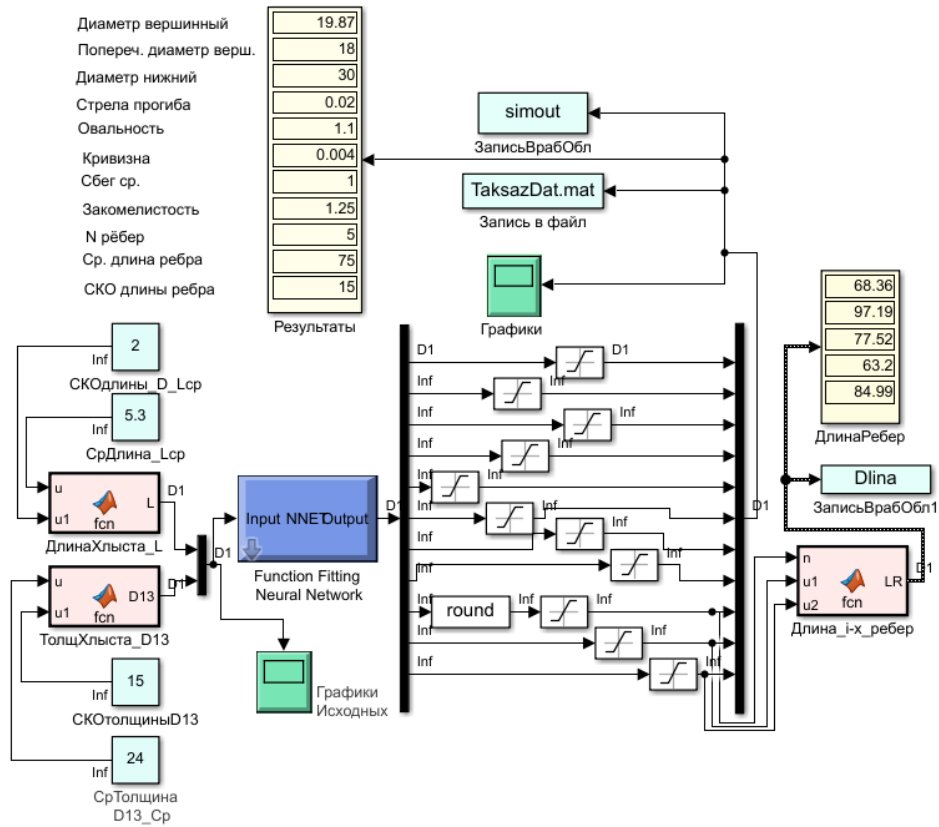


Рисунок 4. 29 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №15

На основе выходных смоделирован образец прототипа хлыста ели № 15 представлен на рисунке 4.30.

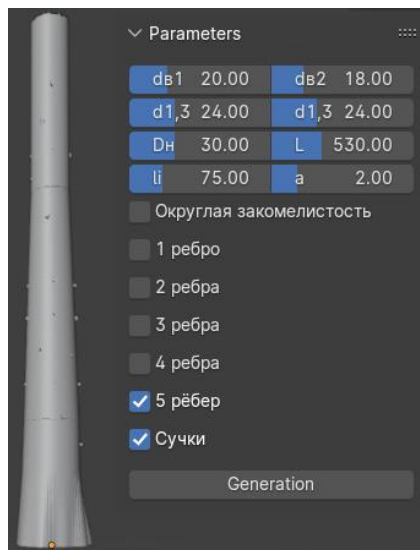


Рисунок 4.30 – Образец прототипа хлыста ели № 15

Для образца хлыста ели № 17 заданы параметры длины L равной 600 см и толщины на уровне 1,3 м равной 22 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.33.

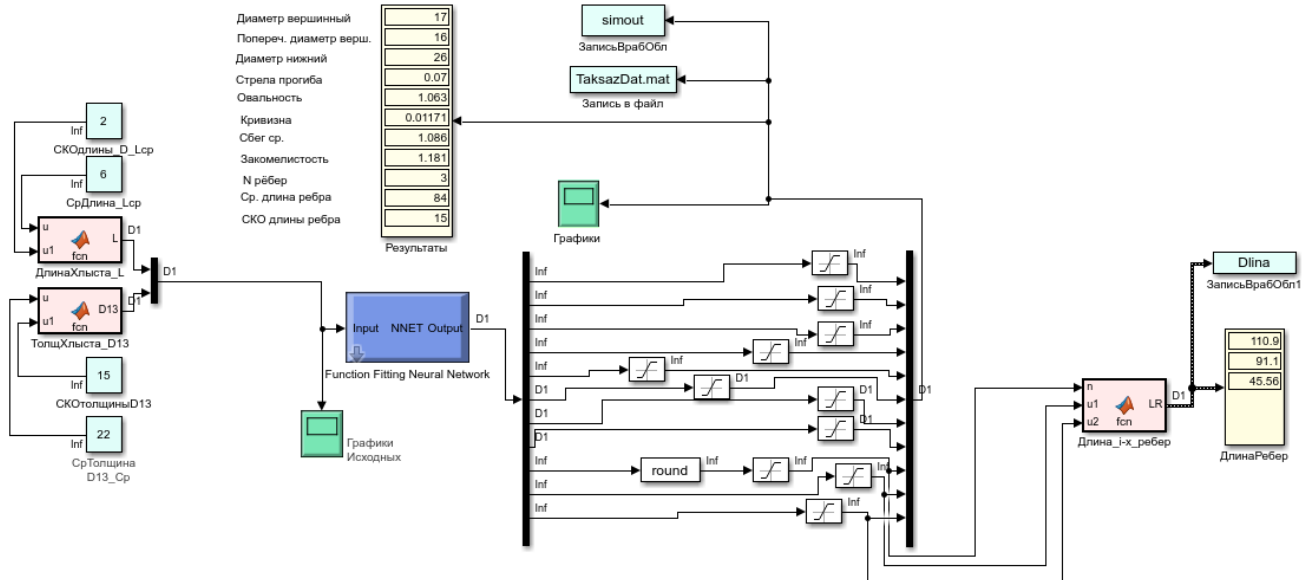


Рисунок 4.33 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №17

По полученным результатам строится цифровой прототип хлыста ели, соответствующий заданным параметрам. Образец прототипа хлыста ели № 17 представлен на рисунке 4.34.

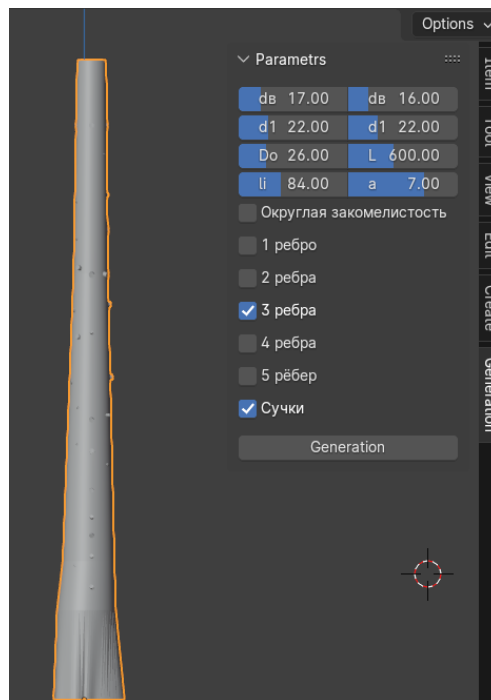


Рисунок 4.34 – Образец прототипа хлыста ели № 17

Для образца хлыста ели № 18 заданы параметры длины L равной 542 см и толщины на уровне 1,3 м равной 23 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.35.

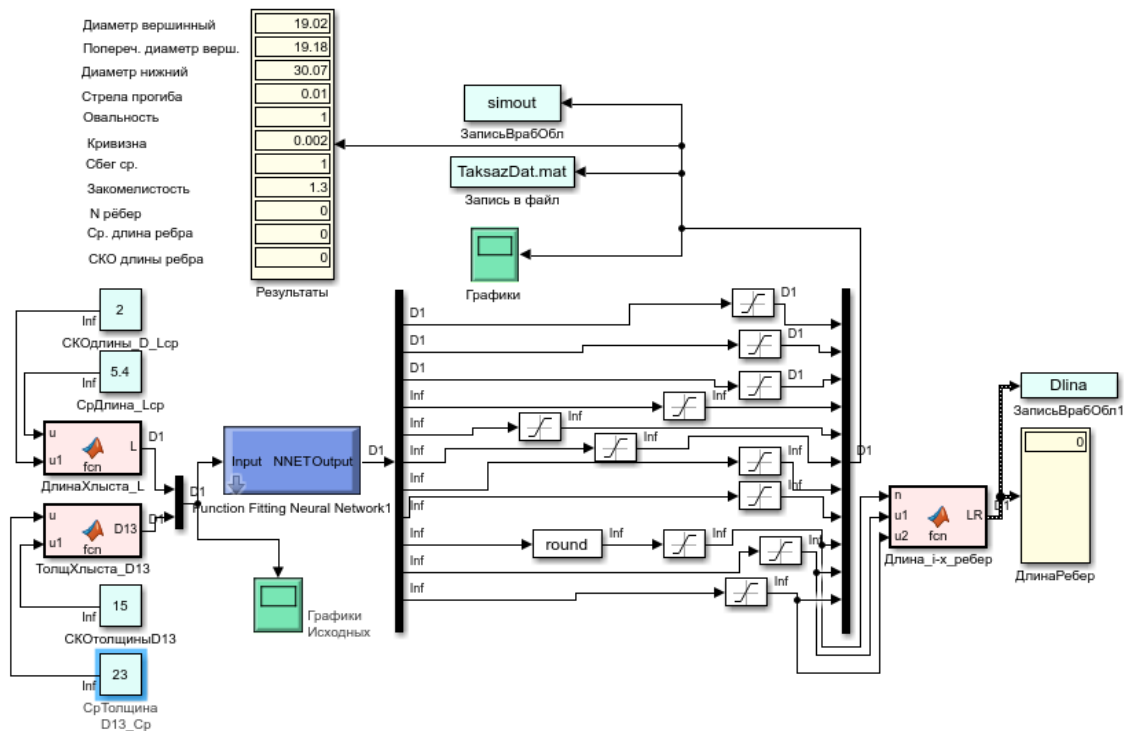


Рисунок 4.35 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №18

По данным параметрам формируется цифровой прототип хлыста ели. Образец прототипа хлыста ели № 18 представлен на рисунке 4.36.

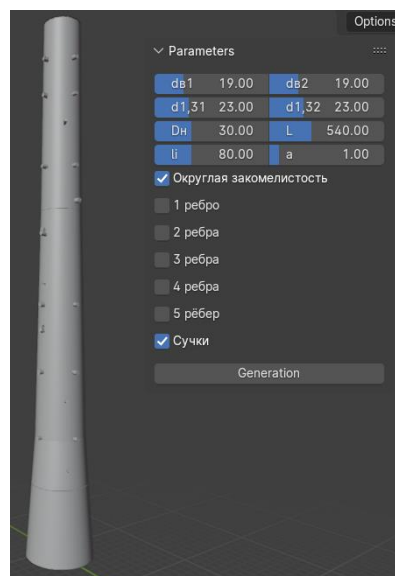


Рисунок 4.36 – Образец прототипа хлыста ели № 18

Для образца хлыста ели № 19 заданы параметры длины L равной 630 см и толщины на уровне 1,3 м равной 18 см. Результаты работы системы представлены на рисунке 4.37.

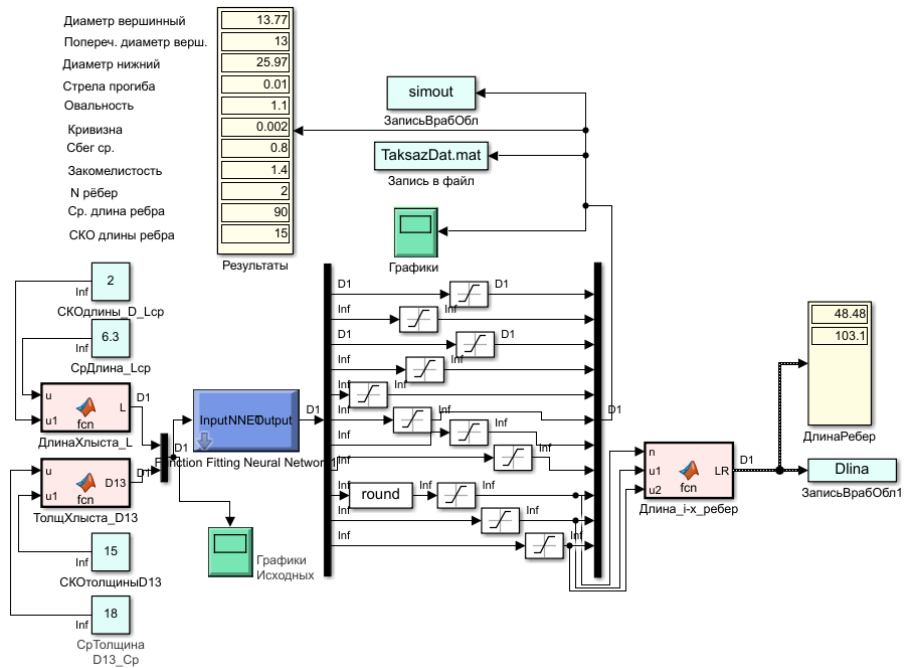


Рисунок 4.37 – Размерно-качественные характеристики для образца хлыста ели №19

На основании выходных данных Simulink-модели сгенерирован цифровой прототип хлыста ели. Образец прототипа хлыста ели № 19 представлен на рисунке 4.38.

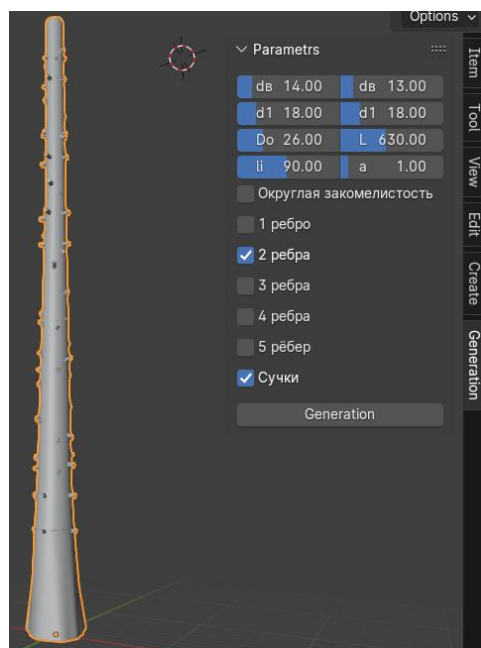


Рисунок 4.38 – Образец прототипа хлыста ели № 19

Результаты проведенных численных экспериментов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты численных экспериментов

№	Толщина на уровне 1,3 м, см	Длина хлыста, L , см	Диаметр вершинный, d_v , см	Поперечный диаметр вершинный, $d'v$, см	Диаметр нижний, D_n , см	Стрела прогиба, а	Количество ребер, N , ед.	Ср. длина ребра, l_i	Овальность, O	Кривизна, %	Сбежистость, см/м	Закомел истость
1	16	430	12	11	22	2	0	0	1,1	0,5%	1,3	1,4
2	10	330	8	7	13	1	1	65	1,1	0,3%	1,0	1,3
3	30	700	24	21	37	3	2	100	1,1	0,4%	1,1	1,2
4	36	830	25	22	45	2	0	0	1,1	0,2%	1,6	1,3
5	28	670	24	20	34	1	4	82	1,2	0,1%	0,7	1,2
6	42	1050	30	28	52	3	5	100	1,1	0,3%	1,3	1,2
7	26	520	20	17	33	3	4	100	1,2	0,6%	1,5	1,3
8	32	780	21	19	44	5	0	0	1,1	0,6%	1,7	1,4
9	29	850	22	20	38	7	4	103	1,1	0,8%	1,0	1,3
10	16	460	13	12	20	3	1	80	1,1	0,7%	0,9	1,3
11	21	600	16	13	28	5	0	0	1,2	0,8%	1,1	1,3
12	37	910	24	22	44	3	0	0	1,1	0,3%	1,7	1,2
13	32	810	24	22	46	9	1	100	1,1	1,1%	1,2	1,4
14	30	650	25	25	38	2	3	100	1,0	0,3%	1,0	1,3
15	24	530	20	18	30	2	5	75	1,1	0,4%	1,0	1,3
16	27	830	22	20	37	2	2	103	1,1	0,2%	0,7	1,4
17	22	600	17	16	26	7	3	84	1,1	1,2%	1,1	1,2
18	23	540	19	19	30	1	0	0	1,0	0,2%	1,0	1,3
19	18	630	14	13	26	1	2	90	1,1	0,2%	0,8	1,4
20	21	560	17	14	23	6	5	76	1,2	1,1%	0,9	1,1

В рамках численного эксперимента были смоделированы различные экземпляры прототипа хлыста ели. В результате моделирования получены, как единичный прототип хлыста ели, так и последовательность хлыстов. Представленным выше способом моделировались прототипы потока хлыстов по размерно-качественным характеристикам соответствующие статистическим данным, как представлено на рисунках 4.41 и 4.42.

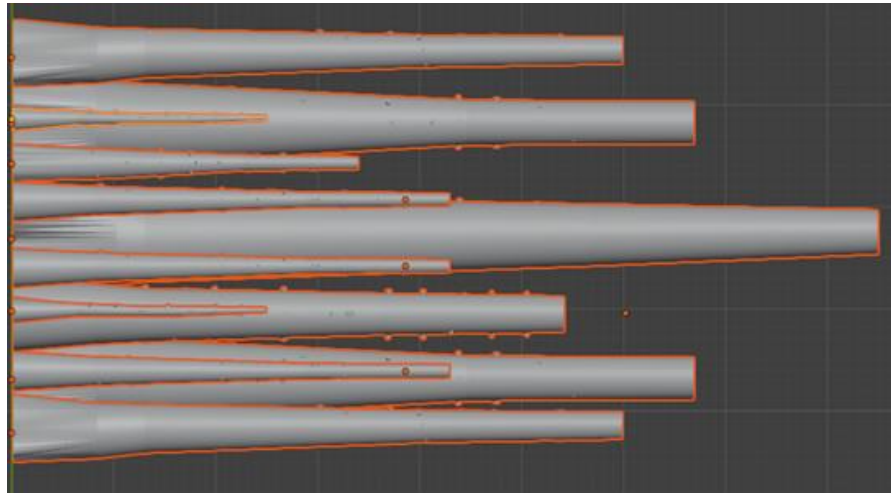


Рисунок 4.41 – Пример моделирования случайного потока хлыстов ели

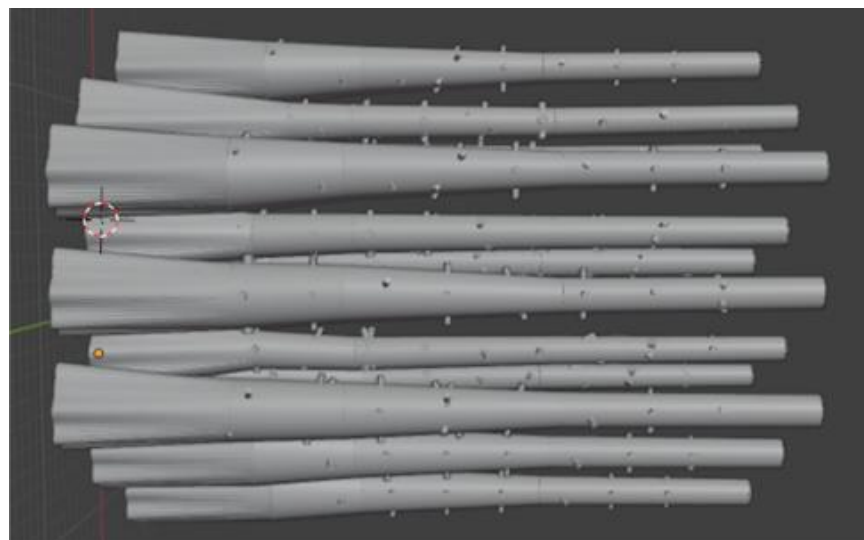


Рисунок 4.42 – Пример моделирования подсортированного потока хлыстов ели

В дальнейшем трёхмерные модели можно использовать, как в среде разработки Blender, так и в других программных комплексах трёхмерного

моделирования. Рассмотрим способ экспортирования цифрового прототипа хлыста ели между различными средами трёхмерного моделирования.

4.2 Технология экспортирования цифрового прототипа хлыста ели между различными средами трёхмерного моделирования

Возможность экспортирования трёхмерной модели лесоматериала является важным условием для практического применения данной технологии в научных исследованиях технических процессов, протекающих в оборудовании лесопромышленного производства. Для дальнейшего применения результатов работы в моделировании различных производственных операций, а также определению оценки воздействий и нагрузок на лесозаготовительное и деревообрабатывающее оборудование и было ориентировано данное исследование. Потому технологии экспортирования цифрового прототипа хлыста ели между различными средами трёхмерного моделирования является актуальным вопросом.

Технология экспортирования 3D-моделей позволяет не только применять на практике результаты исследований других учёных, но реализовывать совместные крупные разработки, распределяя задачи между исследователями вне зависимости от среды, в которой работает тот или иной специалист. Как уже было рассмотрено в первой главе, все программные комплексы 3D-моделирования имеют свои достоинства и недостатки, в связи с чем на практике востребована такая модель работы, как интеграция нескольких программных комплексов по 3D-моделированию в одном проекте, где используются преимущества нескольких наиболее подходящих для решения практической задачи систем трёхмерного проектирования. Так, например, Blender 3D не предназначен для моделирования сложных сцен, однако, данная система является свободно распространяемой и обладает обширным функционалом для решения многих практических задач, в то время как задачи анализа физических процессов сложных объектов и проведение инженерных вычислений традиционно выполняется в SOLIDWORKS.

Для связи любых двух программных комплексов по 3D-моделированию предназначено расширение .obj, позволяющее сохранить геометрию и свойства 3D-объекта. Чтобы экспортировать объект, нужно выбрать File/Export/Wavefront (.obj) и сохранить проект в этом формате. В процессе импорта необходимо зайти в File/Import и выбрать формат OBJ Scene (.obj) в списке расширений файлов [118]. Результат экспортирования цифрового прототипа хлыста ели из программы Blender в SOLIDWORKS представлен на рисунке 4.43.



а)

б)

а - цифровой прототип хлыста ели в среде Blender; б - цифровой прототип хлыста ели в среде SOLIDWORKS

Рисунок 4.43 – Результат экспортирования цифрового прототипа хлыста ели из программы Blender в SOLIDWORKS

В качестве примера использования цифрового прототипа хлыста ели с деревообрабатывающим оборудованием в процессе модельно-ориентированного проектирования технологий окорки лесоматериалов рассмотрен вариант его интеграции с трёхмерной моделью окорочного станка [119]. Условно станок изображен на рисунке 4.44.



Рисунок 4.44 – Пример применения цифрового прототипа хлыста ели с окорочным станком

4.3 Выводы по результатам экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Численные эксперименты по генерации цифрового прототипа хлыста ели достаточно достоверно выполняются по разработанной методике с использованием имитационной модели, базирующейся на технологии нейронной сети с последующим автоматическим моделированием трёхмерного цифрового прототипа хлыста ели с различными размерно-качественными характеристиками.

2. В проведенных экспериментах по созданию цифрового прототипа хлыста ели учтены все заданные пороки формы ствола и параметры сучковатости хлыста ели.

3. Результаты моделирования размерно-качественных характеристик цифрового прототипа хлыста ели демонстрируют аналогичность параметрам физического елового хлыста, что подтверждает достаточный уровень адекватности модели реальным объектам и свидетельствует о достоверности работы системы с возможностью дальнейшего использования моделей для исследований и проектирования лесопромышленного оборудования.

4. Показано, что по предложенной методике возможно формировать не только единичный цифровой прототип елового хлыста, но и моделировать прототипы потоков хлыстов, как случайные по размерно-качественным характеристикам, так и подсортированные.

5. Предложен способ экспортирования цифрового прототипа хлыста или между различными средами трёхмерного моделирования, позволяющий интегрировать 3D-модель в исследования других специалистов вне зависимости от среды разработки.

6. Разработанный пример интеграции цифрового прототипа хлыста или с трёхмерной моделью стволообрабатывающего станка наглядно показывает возможность его использования в проектной практике лесопромышленного оборудования.

ГЛАВА 5 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРАКТИКУ

5.1 Внедрение виртуальных экспериментов

В конкурентной борьбе производители вынуждены ускорять вывод сложных изделий на рынок, снижать эксплуатационные издержки для пользователя и сокращать сроки разработок опытных образцов. Помимо временных затрат, производители рискуют повредить во время проведения натуральных испытаний новое дорогостоящее оборудование. Так, окорочный станок роторного типа ВР-1206 имеет стоимость 15 153 061 руб. [120]. Соответственно проведение всего необходимого комплекса испытаний для данного оборудования может быть критическим с финансовой точки зрения для компании-изготовителя.

Цифровое прототипирование способствует значительному сокращению числа натуральных испытаний, позволяя разработчикам создавать, модифицировать и тестировать образцы цифровые копии изделия. Согласно сведениям, предоставляемым Центром компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Центр НТИ СПбПУ), тенденции глобальной автомобильной промышленности свидетельствуют о резком сокращении натуральных испытаний. Если ранее виртуальные и натурные испытания проводились в одинаковом количестве примерно равным 100 испытаниям, то в дальнейшем число необходимых натуральных испытаний было сокращено до 6, снизившись таким образом на 94%. Для того, чтобы оставшиеся натурные испытания проходили успешно при первой попытке, проводится порядка 10 000 предварительных виртуальных испытаний [83]. Важным уточнением будет установить, что виртуальные испытания не должны заменять натуральные, они должны сокращать их количество до минимального количества, тем самым сокращая расходы изготовителя на опытные образцы.

Внедрение цифрового прототипирования на начальном этапе проектирования позволяет начать виртуальные испытания системы на ранних стадиях развития, что позволяет легче вносить изменения, что экономит финансирование и сокращает время коммерческой реализации продукции. Неочевидным достоинством также может выступать повышенная материалоемкость таких изделий, так как в классическом производстве конструкторы вынуждены завышать запас прочности изделия, рассчитывая на экстремальные эксплуатационные нагрузки в будущем, что приводит к неоправданно повышенной материалоемкости, массе и стоимости оборудования. Тогда как наиболее обоснованным решением было бы проведение ряда виртуальных испытаний и определение необходимой механической прочности изделия [83].

В процессе развития и детализации модели реального устройства цифровая модель становится всё более экономически выгодной и эффективной, так как формируется большое количество ценных данных о системе, которые легко могут быть адаптированы к новым модификациям продукции при дальнейшем совершенствовании технологии.

Другим эффективным направлением по оптимизации процесса испытаний является внедрение полунатурных экспериментов, которые связывают друг с другом виртуальные и натуральные испытания образцов изделия.

5.2 Внедрение полунатурных экспериментов

Активное внедрение полунатурных испытаний позволяет соединить достоинства имитационного моделирования и реальных физических факторов воздействия существенно сократив материальную нагрузку на предприятие. Так, исследователи Московского авиационного института установили, что экономическая эффективность полунатурного эксперимента, проводимого на пилотажном стенде, в сравнении с натурными испытаниями самолета составляет 83, 77% [121].

Другим существенным преимуществом полунатурных испытаний является возможность применения на любой стадии жизненного цикла продукта, тогда как в натуральных испытаниях эксперименты возможны только на опытных образцах в заключительной стадии разработок. В общем виде процесс полунатурного эксперимента ориентирован на постепенную замену элементов модели на реальные данные, поступающие с датчиков устройств, что обогащает систему и позволяет повысить ее адекватность, скорректировав настройки.

5.3 Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследования в производство лесопромышленного оборудования

Повышение экономической эффективности при внедрении технологии полунатурных испытаний в деревообрабатывающем станкостроении доказано неоднократно. Технология цифрового прототипирования хлыста ели носит прикладной характер применительно к исследованиям технических процессов, протекающих в лесозаготовительном и деревообрабатывающем оборудовании [122, 123].

Внедрение результатов исследований в полном объеме может применяться, как в виртуальных испытаниях, так и в полунатурных экспериментах лесозаготовительного и деревообрабатывающего оборудования.

5.3.1 Расчет экономического эффекта на этапе проектирования

Определение затрат на создание программного продукта

Затраты на создание программного продукта $Z_{СПП}$ складываются из расходов по оплате труда разработчика программы $Z_{СПП}^{ЗП}$, расходов по оплате машинного времени при отладке программы $Z_{СПП}^{МВ}$ и общих затрат $Z_{ОБЩ}$ по формуле 5.1.

$$Z_{СПП} = Z_{СПП}^{ЗП} + Z_{СПП}^{МВ} + Z_{ОБЩ} . \quad (5.1)$$

Расходы на оплату труда разработчика программы

Расходы на оплату труда разработчика программы определяются как заработная плата за время работы $Z_{ЗП}$, которая складывается из основной заработной платы $Z_{ЗП}^{ОСН}$, дополнительной $Z_{ЗП}^{ДОП}$ и отчислений на заработную плату $Z_{ЗП}^{ОГЧ}$ по формуле 5.2.

$$Z_{ЗП} = Z_{ЗП}^{ОСН} + Z_{ЗП}^{ДОП} + Z_{ЗП}^{ОГЧ}. \quad (5.2)$$

Расчёт трудоёмкости создания программного продукта

Трудоёмкость разработки программного продукта можно определить из выражения, представленного в формуле 5.3.

$$t = t_0 + t_A + t_B + t_{П} + t_{ОТ} + t_{Д}, \quad (5.3)$$

где t_0 – затраты труда на содержательную постановку задачи и подготовку исходных данных;

t_A – затраты труда на разработку общего алгоритма решения задачи;

t_B – затраты труда на разработку блок-схемы алгоритма решения задачи;

$t_{П}$ – затраты труда на составление программы по готовой блок-схеме;

$t_{ОТ}$ – затраты труда на отладку программы;

$t_{Д}$ – затраты труда на подготовку документации к программе.

Составляющие затрат, в свою очередь, можно вычислить через условное число операторов Q . В данном случае число операторов в отлаженной программе $Q = 4000$.

Расчёт трудозатрат на содержательную постановку задачи

Содержательная постановка задачи имеет творческую составляющую, определить которую невозможно, поэтому можно принять показатель затрат

труда на изучение задачи с учётом коэффициентов на уточнение описания задачи и квалификации программиста по следующей формуле 5.4.

$$t_o = \frac{Q B}{(75 \dots 85 K)}, \quad (5.4)$$

где B – коэффициент увеличения затрат труда вследствие недостатка информации для описания задачи, уточнений и доработок;

$B=1,2\dots5$, сложность задачи вызвала много уточнений, доработок, поэтому коэффициент B принимается равным 4;

K – коэффициент квалификации разработчика, для работающих до 2 лет $K=0,8$.

Таким образом, из выражения 5.4 рассчитываются трудозатраты на изучение задачи, эквивалентные затратам труда на содержательную постановку:

$$t_o = \frac{4000 \cdot 4}{80 \cdot 0,8} = 250(\text{чел./ч})$$

Расчёт трудоёмкости на разработку составных частей программы

Затраты труда на разработку общего алгоритма решения задачи рассчитываются по формуле 5.5.

$$t_A = \frac{Q}{(60 \dots 75K)} = \frac{4000}{70 \cdot 0,8} = 71,4 (\text{чел./час}) \quad (5.5)$$

Затраты труда на разработку блок-схемы алгоритма решения задачи вычисляются аналогично в зависимости от условного количества операторов по формуле 5.6.

$$t_B = \frac{Q}{(60 \dots 75K)} = \frac{4000}{70 \cdot 0,8} = 71,4 (\text{чел./час}) \quad (5.6)$$

Затраты труда на разработку программного кода по готовой блок-схеме вычисляются по формуле 5.7.

$$t_{\Pi} = \frac{Q}{(60 \dots 75K)} = \frac{4000}{70 \cdot 0,8} = 71,4 \text{ (чел./час)} \quad (5.7)$$

Затраты труда на комплексную отладку программы вычисляются по формуле 5.8.

$$t_{OT} = 1,5 t_{OT}^A, \quad (5.8)$$

где t_{OT}^A – затраты труда на отладку программы при автономной отладке одной задачи, определяются из выражения, представленного в формуле 5.9.

$$t_{OT}^A = \frac{Q}{(40 \dots 50K)} = \frac{4000}{45 \cdot 0,8} = 111,1 \text{ (чел./час)} \quad (5.9)$$

По формуле 5.8 и с учетом выражения 5.9 рассчитываются трудозатраты на отладку программы

$$t_{OT} = 1,5 \cdot 111,1 = 166,6 \text{ (чел./ч)}$$

Затраты труда на подготовку документации по программе определяются по формуле 5.10.

$$t_{Д} = t_{ДР} + t_{ДО}, \quad (5.10)$$

где $t_{ДР}$ – затраты труда на подготовку материалов в рукописи, определяется по формуле 5.11.

$$t_{ДР} = \frac{Q}{(150 \dots 200K)} = \frac{4000}{175 \cdot 0,8} = 28,6 \text{ (чел./час)} \quad (5.11)$$

где $t_{ДО}$ – затраты на редактирование, нормоконтроль, печать и оформление документации, рассчитывается по формуле 5.12.

$$t_{ДО} = 0,75 t_{ДР} = 0,75 \cdot 28,6 = 21,45 \text{ (чел./ч)} \quad (5.12)$$

С учетом формул 5.11, 5.12 из выражения 5.10 определяется значение трудозатрат:

$$t_{Д} = 28,6 + 21,45 = 50,05 \text{ (чел./ч)}$$

Общая трудоёмкость программного продукта рассчитывается по формуле (5.3) с учетом выражений (5.4) - (5.12):

$$t = 250 + 71,4 + 71,4 + 71,4 + 166,6 + 50,05 = 680,85 \text{ (чел./ч)}$$

Расчёт средней зарплаты программиста

Основная заработная плата

Затраты на основную ЗП определяются из количества нормочасов, необходимых для выполнения отдельных работ (трудоемкость создания программного продукта) и тарифных почасовых ставок инженера по формуле 5.13.

$$З_{ЗП}^{ОСН} = t C_{тИ} . \quad (5.13)$$

Если работа ведется в Уральском регионе, то учитывается районный коэффициент региона в размере 15 % от величины часовой ставки. Итоговая ставка инженера ($C_{тИ}$) рассчитывается по формуле 5.14.

$$C_{тИ} = C_{т} + C_{т} \cdot 0,15 = 1,15 C_{т} , \quad (5.14)$$

где $C_{т}$ – часовая ставка инженера, руб.

Часовая ставка за рабочий месяц (22 дня) при восьмичасовом рабочем дне вычисляется по формуле 5.15.

$$C_{т} = \frac{Ок}{22 \cdot 8} , \quad (5.15)$$

где $Ок$ – оклад, руб.

Месячный оклад инженера-конструктора $Ок = 100000$ руб.

Получаем:

$$C_{т} = \frac{100000}{22 \cdot 8} = 568,2 \text{ (чел./час)}$$

Таким образом, итоговая ставка инженера составляет:

$$C_{тИ} = 1,15 \cdot 568,2 = 653,4 \text{ (чел./час)}$$

Основная заработная плата инженера на разработку компьютерной программы составляет:

$$Z_{3П}^{ОСН} = 680,85 \cdot 653,4 = 444,8 \text{ тыс. руб.}$$

Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата принимается 10 % от основной заработной платы, представлена по формуле 5.16.

$$Z_{3П}^{ДОП} = 0,1 \cdot Z_{3П}^{ОСН} = 0,1 \cdot 444,8 = 44,5 \text{ тыс. руб.} \quad (5.16)$$

Страховые взносы во внебюджетные фонды

Согласно Федеральному закону от 03.12.2011 г. № 379-ФЗ «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования» страховые взносы составляют ПФРФ – 22 %; ФССРФ – 2,9 %; ФФОМС – 5,1 %, что в общей сложности составляет:

$$N_{ОТЧ} = 22 + 2,9 + 5,1 = 30\%$$

Расчет страховых взносов во внебюджетные фонды представлен в формуле 5.17.

$$\begin{aligned} Z_{3П}^{ОТЧ} &= N_{ОТЧ} (Z_{3П}^{ОСН} + Z_{3П}^{ДОП}) = 0,3 \cdot (444,8 + 44,5) \\ &= 146,79 \text{ тыс. руб.} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Затраты на оплату труда программиста, включая страховые взносы

Затраты на оплату труда программиста состоят из зарплаты программиста и страховых взносов вычисляется по формуле 5.18.

$$Z_{СПИ}^{ЗП} = Z_{3П}^{ОСН} + Z_{3П}^{ДОП} + Z_{3П}^{ОТЧ}. \quad (5.18)$$

Отсюда затраты на оплату труда программиста включая страховые взносы, составляют:

$$Z_{СПП}^{ЗП} = 444,8 + 44,5 + 146,79 = 636,1 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на содержание оборудования (машинное время)

Затраты на оплату машинного времени при отладке программы определяются путём умножения фактического времени отладки программы на стоимость машино-часа работы оборудования по формуле 5.19.

$$Z_{СПП}^{MB} = C_{ЧАС} t_{ЭВМ}, \quad (5.19)$$

где $C_{ЧАС}$ – затраты на 1 машино-час работы оборудования, руб./ч;

$t_{ЭВМ}$ – фактическое время отладки программы на ПК.

Расчёт фактического времени отладки

Фактическое время отладки вычислим по формуле 5.20.

$$\begin{aligned} t_{ЭВМ} &= t_{П} + t_{ДО} + t_{ОГ}; \\ t_{ЭВМ} &= 71,4 + 166,6 + 21,45 = 360 \text{ ч} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Расчёт затрат на 1 машино-час

Затраты на 1 машино-час найдём по формуле 5.21.

$$C_{ЧАС} = \frac{Z_{ЭВМ}}{T_{ЭВМ}}, \quad (5.21)$$

где $Z_{ЭВМ}$ – полные затраты на эксплуатацию ПК в течение года;

$T_{ЭВМ}$ – действительный годовой фонд времени ПК, ч./г.

Расчёт годового фонда времени работы ПК

Общее количество дней в году – 365

Число праздничных и выходных дней – 117

Время простоя в профилактических работах определяется как еженедельная профилактика по 4 ч.

Итого годовой фонд рабочего времени ЭВМ составляет:

$$T_{ЭВМ} = 8(365 - 117) - 52 \cdot 4 = 1776 \text{ ч.}$$

Расчёт полных затрат на эксплуатацию ПК

Полные затраты на эксплуатацию ПК можно определить по формуле 5.22.

$$Z_{ЭВМ} = Z_{ЗП} + Z_{АМ} + Z_{ЭЛ} + Z_{ВМ} + Z_{ТР} + Z_{ПП}, \quad (5.22)$$

где $Z_{ЗП}$ – годовые издержки на заработную плату персонала, руб./г.;

$Z_{АМ}$ – годовые издержки на амортизацию, руб./г.;

$Z_{ЭЛ}$ – годовые издержки на электроэнергию, потребляемую ПК, руб./г.;

$Z_{ВМ}$ – годовые издержки на вспомогательные материалы, руб./г.;

$Z_{ТР}$ – затраты на текущий ремонт компьютера, руб./г.;

$Z_{ПП}$ – годовые издержки на прочие и накладные расходы, руб./г.

Амортизационные отчисления

Сумма годовых амортизационных отчислений определяется по формуле 5.23.

$$Z_{АМ} = C_{БАЛ} H_{АМ}, \quad (5.23)$$

где $C_{БАЛ}$ – балансовая стоимость компьютера, руб./шт.;

$H_{АМ}$ – норма амортизации, %.

Балансовая стоимость ПК включает отпускную цену, расходы на транспортировку, монтаж оборудования и его наладку, представленные в формуле 5.24.

$$C_{БАЛ} = C_{РЫН} + Z_{УСТ}; \quad (5.24)$$

где $C_{РЫН}$ – рыночная стоимость компьютера, руб./шт.,

$Z_{уст}$ – затраты на доставку и установку компьютера, руб./шт.

Компьютер, на котором велась работа, был приобретен по цене $C_{рын} = 70000$ руб., затраты на установку и наладку составили примерно 10 % от стоимости компьютера.

$$Z_{уст} = 10\%C_{рын} = 0,1 \cdot 70000 = 7000 \text{ руб.}$$

Отсюда определяется:

$$C_{БАЛ} = 70000 + 7000 = 77000 \text{ руб./шт.}$$

Согласно Постановлению Правительства № 697 № 1 от 01.01.2002 «Классификация ОС, включаемых в амортизационные группы», техника электронно-вычислительная, включая персональные компьютеры и печатающие устройства к ним, относится ко второй группе (имущество со сроком полезного использования свыше 2 лет до 3 лет включительно).

Сумма годовых амортизационных отчислений составит:

$$Z_{ам} = 77000 \cdot 0,33 = 25410 \text{ руб./г.}$$

Расчёт затрат на электроэнергию

Стоимость электроэнергии, потребляемой за год, определяется по формуле 5.25.

$$Z_{эл} = P_{эл} \cdot T_{эвм} \cdot C_{эл} \cdot A, \quad (5.25)$$

где $T_{эвм}$ – суммарная мощность ПК;

$C_{эл}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии;

A – коэффициент интенсивного использования мощности машины.

Согласно техническому паспорту ПК $P_{эвм} = 0,5$ кВт, стоимость 1 кВт·ч электроэнергии для предприятий на текущий момент составляет ориентировочно $C_{эл} = 6$ руб., интенсивность использования машины $A = 0,7$.

Тогда расчётное значение затрат на электроэнергию определится

$$Z_{эл} = 0,5 \cdot 1776 \cdot 6 \cdot 0,7 = 3730 \text{ руб.}$$

Расчёт затрат на текущий ремонт

Затраты на текущий и профилактический ремонты принимаются равными 5 % от стоимости ПК и определяются формулой 5.26.

$$Z_{\text{ТР}} = 0,05C_{\text{БАЛ}} = 0,05 \cdot 77000 = 3850 \text{ руб.} \quad (5.26)$$

Расчёт затрат на вспомогательные материал

Затраты на материалы, необходимые для обеспечения нормальной работы ПК, составляют около 1 % от его стоимости и рассчитываются по формуле 5.27.

$$Z_{\text{ВМ}} = 0,01C_{\text{БАЛ}} = 0,01 \cdot 77000 = 770 \text{ руб} \quad (5.27)$$

Прочие затраты на эксплуатацию ПК

Прочие косвенные затраты, связанные с эксплуатацией ПК, состоят из амортизационных отчислений на стоимости услуг сторонних организаций и составляют 5 % от стоимости ПК и вычисляются по формуле 5.28.

$$Z_{\text{ПР}} = 0,05C_{\text{БАЛ}} = 0,05 \cdot 77000 = 3850 \text{ руб} \quad (5.28)$$

Годовые издержки на заработную плату обслуживающего персонала

Издержки на заработную плату обслуживающего персонала складываются из основной заработной платы, дополнительной и страховых взносов от заработной платы и определяются формулой 5.29.

$$Z_{\text{ЗП}} = Z_{\text{ЗП}}^{\text{ОСН}} + Z_{\text{ЗП}}^{\text{ДОП}} + Z_{\text{ЗП}}^{\text{ОТЧ}} \quad (5.29)$$

Сумма основной заработной платы за год определяется исходя из общей численности работающих в штате, как представлено в формуле 5.30.

$$Z_{\text{ЗП}}^{\text{ОСН}} = 12 \sum Z_{\text{ОКЛ}}^i, \quad (5.30)$$

где $Z_{\text{ОКЛ}}^i$ – тарифная ставка i -го работника в месяц, руб.

В штат обслуживающего персонала должен входить системный администратор с окладом 80000 руб.

Тогда, принимая, что один системный администратор обслуживает 10 машин, получим издержки на основную заработную плату обслуживающего персонала:

$$Z_{ЗП}^{ОСН} = \frac{12 \cdot 80000}{10} = 96000 \text{ руб.}$$

Сумма дополнительной заработной платы составляет 10 % от основной заработной платы:

$$Z_{ЗП}^{ДОП} = 0,1 \cdot 96000 = 9600 \text{ руб.}$$

Страховые взносы составят 30 % от суммы основной и дополнительной заработной платы:

$$Z_{ЗП}^{ОТЧ} = 0,30 \cdot 9600 = 2880 \text{ руб.}$$

Тогда годовые издержки на заработную плату обслуживающего персонала, включая страховые взносы, составят:

$$Z_{ЗП} = 96000 + 9600 + 2880 = 108480 \text{ руб.}$$

Полные затраты на эксплуатацию ПК в течение года составят:

$$Z_{ЭВМ} = 108480 + 25410 + 3730 + 770 + 3850 + 3850 = 146,09 \text{ тыс. руб.}$$

Тогда затраты на 1 машино-час работы ПК составят:

$$C_{\text{час}} = \frac{146,09}{1776} = 82,2 \text{ руб.}$$

А затраты на эксплуатацию ПК составят:

$$Z_{СПП}^{МВ} = 82,2 \cdot 360 = 29582 \text{ руб.}$$

Расчёт общих (накладных) расходов и экономической эффективности от использования программного продукта

Общие расходы – это расходы на освещение, отопление, коммунальные услуги и т.п. При планировании затрат их можно принять укрупненно в размере 60 % основной зарплаты разработчика программы и вычислить по формуле 5.31.

$$Z_{\text{ОБЩ}} = 0,6Z_{\text{ЗП}}^{\text{ОСН}} = 0,6 \cdot 444,8 = 266,88 \text{ тыс. руб.} \quad (5.31)$$

Тогда затраты на создание программного продукта составят:

$$Z_{\text{СПП}} = 636,1 + 29,6 + 266,88 = 932,58 \text{ тыс. руб.}$$

В результате расчета затраты на создание программного продукта составят 932,58 тыс. руб.

Экономический эффект от применения новой методики в проектировании и разработке окорочного станка вычисляется по формуле 5.32.

$$\mathcal{E}_{\text{разр}} = C_{\text{раз}} - \left(\frac{C_{\text{раз}}}{\Delta t_{\text{разр}}} + Z_{\text{СПП}} \right), \quad (5.32)$$

где $C_{\text{разр}}$ – стоимость разработки узла станка типоразмера ОК63;

$\Delta t_{\text{разр}}$ – кратность изменения времени на разработку проекта узла, его отладку и доводку.

Таким образом получаем экономический эффект от внедрения новой технологии разработки:

$$\mathcal{E}_{\text{разр}} = 3600 - \left(\frac{3600}{3} + 932,58 \right) = 1\,467,42 \text{ тыс. руб.}$$

5.3.2 Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследований в научно-исследовательскую разработку

Применение трёхмерной модели хлыста дерева также повышает адекватность моделирования других научно-исследовательских разработок, направленных на модернизацию и совершенствование лесозаготовительного и деревообрабатывающего оборудования. Оценка экономического эффекта от внедрения данной технологии в научно-исследовательские разработки выполнена на основе данной методики [121].

Оценка общего времени проведения работ

Общая оценка трудозатрат по каждому этапу НИР представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Общая оценка трудозатрат

Этап	Состав работ	Исполнитель	Количество человек	Трудоемкость, чел./д
Этап 1	Разработка технического задания (ТЗ) на НИР	Инженер-конструктор	1	5
	Утверждение НИР	Руководитель НИР	1	1
	Анализ способов и методов моделирования	Инженер- конструктор	1	5
		Программист	1	5
	Патентный поиск	Инженер- конструктор	1	2
Этап 2	Сбор исходных данных для решения задач НИР	Инженер- конструктор	1	3
	Подготовка и настройка программного комплекса	Программист	1	2
Этап 3	Решение задач моделирования	Инженер- конструктор	1	30
		Программист	1	30
Этап 4	Анализ результатов моделирования. Разработка рекомендаций для практического применения	Инженер- конструктор	1	15

Общее время проведения исследования составляет 98 дня.

Расчет фонда оплаты труда

Фонд оплаты труда формируется из общей заработной платы всех участников исследований. Расчет производится исходя из трудозатрат каждого сотрудника с учетом премирования и дополнительной заработной платы (таблица 5.2).

Расчет заработной платы с учетом премии производится по формуле 5.33.

$$Z_{\text{ОСН}} = Z_i + Z_i \cdot 0,5 \quad (5.33)$$

Расчет дополнительной заработной платы выполняется по формуле 5.34.

$$Z_{\text{доп}} = \frac{Z_{\text{ОСН}} \cdot 20}{100} \quad (5.34)$$

Таблица 5.2 – Фонд оплаты труда

Должность	Оклад, руб./мес.	Дневной оклад	Трудозатраты, чел./д.	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Размер премий, руб.	Общая заработная плата, руб.
Руководитель НИР	90 000	4500	1	4500	900	2250	7650
Инженер-конструктор	80 000	4000	60	240000	48000	120000	408000
Программист	80 000	4000	37	148000	29600	74000	251000
Итого	250000	12500	98	392500	78500	196250	667250

Итого фонд заработной платы сотрудников за период НИР составляет 667250 руб.

Расчет суммы отчислений в государственные внебюджетные фонды

Отчисления в государственные внебюджетные фонды составляют:

- пенсионный фонд (ПФР) – 22%;
- фонд социального страхования (ФСС) – 5,1%;
- фонд обязательного медицинского страхования (ФОМС) – 2,9%.

Общие отчисления в государственные внебюджетные фонды составляют 30% от общей оплаты труда сотрудников.

Величина отчислений в государственные внебюджетные фонды составляет:

$$\text{ПФР} = 667250 \cdot 0,22 = 146795 \text{ руб.}$$

$$\text{ФСС} = 667250 \cdot 0,051 = 34030 \text{ руб.}$$

$$\text{ФОМС} = 667250 \cdot 0,029 = 19350 \text{ руб.}$$

$$\text{Итого: ПФР+ФСС+ФОМС} = 146795+34030 + 19350 = 200 175 \text{ руб.}$$

Расчет расходов на электроэнергию

Расход на потребление электроэнергии можно рассчитать по формуле 5.35.

$$P_{\text{Э}} = K_{\text{РД}} \cdot T_{\text{ЭВМ}} \cdot P_{\text{ЭВМ}} \cdot C_{\text{ЭЛ}}, \quad (5.35)$$

где $K_{\text{РД}}$ – количество рабочих дней;

$T_{\text{ЭВМ}}$ – длительность одной смены;

$P_{ЭВМ}$ – мощность потребления техсредствами;

$C_{ЭЛ}$ – стоимость электроэнергии.

Согласно техническому паспорту ПК $P_{ЭВМ} = 0,5$ кВт , стоимость 1 кВт·ч электроэнергии для предприятий на текущий момент составляет ориентировочно $C_{ЭЛ} = 6$ руб.

$$P_{Э} = 98 \cdot 8 \cdot 0,5 \cdot 6 = 2352 \text{ руб.}$$

Расчёт амортизационных отчислений

Для определения амортизационных отчислений требуется оценить стоимость технических средств. В исследовании заявлено два исполнителя работ: инженер-конструктор и программист. Для каждого сотрудника необходим персональный компьютер стоимостью 70000 руб. Суммарная стоимость технических средств:

$$C_{\text{общ}} = 70000 \cdot 2 = 140000 \text{ руб.}$$

Расчет амортизационных отчислений определяется по формуле 5.36

$$A_0 = \frac{C_{\text{общ}} \cdot H}{100\%}, \quad (5.36)$$

где $H = 20\%$.

$$A_0 = \frac{140000 \cdot 20\%}{100\%} = 28\,000 \text{ руб.}$$

Расчет амортизационных отчислений на период:

$$A_{\text{п}} = \frac{A_0 \cdot K_{\text{рД}}}{K_{\text{г}}} = \frac{28000 \cdot 98}{247} = 11\,109 \text{ руб.}$$

где $K_{\text{г}}$ – количество рабочих дней в году.

Расчёт суммарной себестоимости проекта

Суммарная себестоимость проекта может быть выражена суммой ранее рассчитанных статей расходов: расходы на заработную плату, отчисления в

государственные внебюджетные фонды, амортизационные отчисления и оплата электроэнергии (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Суммарная себестоимость проекта

Наименование статей	Затраты, руб.
Фонд оплаты труда	667 250
Начисления в государственные внебюджетные фонды	200 175
Амортизационные отчисления	11 109
Потребление электроэнергии	2 352
Итого	880 886

Расчет экономической эффективности

Экономическая эффективность имитационного испытания рассчитывается в сравнении с натурными испытаниями. Стоимость натуральных испытаний ОК63 составляет 3 600 000 руб. с учётом рисков поломки станка или оборудования.

Расчет экономической эффективности производится по формуле 5.37.

$$\varepsilon = \frac{C_H - C_P}{C_H} \cdot 100\%, \quad (5.37)$$

где C_H – стоимость проведения натуральных испытаний;

C_P – стоимость проведения полунатурных испытаний.

$$\varepsilon = \frac{3600000 - 880886}{3600000} \cdot 100\% = 75,53\%.$$

5.4 Выводы по пятой главе

Результаты исследований пятой главы диссертации позволяют сделать следующие выводы.

1. Мировой опыт и достаточно убедительно показывает эффективность цифровизации во всех отраслях экономики. Также в настоящих исследованиях выявлено, что эффект от внедрения цифрового прототипирования, в частности цифрового прототипа предмета труда лесопромышленных технологий проявляется в нескольких направлениях – на этапе выполнения НИР по созданию

новых образцов техники, этапе проектирования, на этапе производства и на этапе эксплуатации оборудования с более точно обоснованными параметрами.

2. Одним из важных преимуществ цифрового прототипирования является возможность еще на ранних этапах создания оборудования определять и оптимизировать его основные параметры, прогнозировать эффективность. Такие виртуальные испытания позволяют сокращать сроки создания новых, перспективных образцов и снижать экономические затраты на их производство.

3. Применение цифрового прототипа хлыста дерева повышает адекватность моделирования, следовательно, эффективность научно-исследовательских разработок, направленных на совершенствование лесозаготовительного и деревообрабатывающего оборудования. Оценка экономического эффекта от внедрения предложенной технологии имитационного испытания в научно-исследовательские работы в сравнении с натурными испытаниями, на примере роторного окорочного станка ОК63-3, составляет не менее 75 %.

4. Проведенный расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследования в проектно-конструкторскую практику составляет 1 467, 42 тыс. руб. на одну модель станка.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате проведенных диссертационных исследований разработан цифровой прототип древесного хлыста как предмета труда в лесопромышленных технологиях. На основе выполненной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. В настоящее время 4-й промышленной революции в лесном комплексе, как и в любой отрасли высокотехнологичного производства решающее значение отводится прогрессивным методам модельно-ориентированного проектирования с использованием цифрового прототипирования. Поскольку для лесопромышленных технологий не создан и не используется исходный объект – предмет труда, то одним из самых актуальных направлений в научных исследованиях и проектировании на первом этапе цифровизации является создание цифрового прототипа предмета труда – лесоматериала.

2. Для цифрового прототипа предмета труда на примере хлыста ели установлены основные параметры моделирования и корреляционные связи и предложена методика построения модели лесоматериала.

3. Впервые разработана нейросетевая технология моделирования размерно-качественных показателей формы ствола - сбежистости, сложной и простой кривизны, сбега, закомелистости, сучковатости и овальности, реализованная в среде MATLAB. Проверка на тестовых примерах и экспериментальных статистических данных показала достаточную адекватность модели. Получено свидетельство на программу нейросетевой технологии моделирования размерно-качественных показателей формы древесного хлыста. Полученная технология является универсальной для любых пород деревьев, так как может дополняться новыми данными, что обеспечивает ей широкую применимость.

4. Результаты имитационного моделирования формы ствола используются для построения трёхмерной параметрической модели цифрового прототипа предмета труда на примере хлыста ели, что является дополнительным средством проверки адекватности модели реальным объектам. Полученный цифровой

прототип древесного хлыста способствует снижению расходов на проведение эксплуатационных испытаний деревообрабатывающего оборудования с помощью частичной замены на виртуальные испытания.

5. Впервые разработана методика моделирования поверхности микропрофиля ствола по окружности комлевого среза, позволяя совершить переход от усреднённых математических моделей к точному моделированию реальной формы основания хлыста.

6. Результаты численных экспериментов по моделированию цифрового прототипа хлыста с различными размерно-качественными характеристиками свидетельствуют о достоверности работы системы. Методика экспортирования и графическое представление модели в среде Blender и системе SolidWorks позволяют рекомендовать ее для практического использования при проектировании лесозаготовительного, лесохозяйственного, деревообрабатывающего оборудования вне зависимости от программной среды разработки.

7. Предложенная методика формирует не только единичный цифровой прототип предмета труда, но способна моделировать прототипы потоков хлыстов, что может быть использовано для проектирования линий первичной обработки древесного сырья.

8. Расчетный экономический эффект от внедрения результатов исследования в проектно-конструкторскую практику на примере окорочных станков составляет не менее 1 460 тыс. руб. на одну модель станка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 года № 312-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/pFdqtWFH8y9SfQjDE0Xnwd8eXWoJJMYB.pdf>.
2. Размерно-качественная характеристика сортиментов: учебное пособие / В. В. Чамеев, В. В. Обвинцев, Б. Е. Меньшиков, Е. В. Гаева. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. – 102 с. – (Сер. : Основы проектирования лесопромышленных производств. Системный подход).
3. Обзор лесопромышленного комплекса России 2021 год // proderevo.net : сайт. – 2022. – 23 февраля. — URL: <https://proderevo.net/analytics/main-analytics/obzor-lesopromyshlennogo-kompleksa-rossii-2021-god.html>.
4. Determinants of maximum tree height in Eucalyptus species along a rainfall gradient in Victoria, Australia / Givnish, J. T, Wong [и др.] // Ecology. — 2014. — № 95. — С. 2991-3007.
5. Обросов, М. Я. Моделирование параметров сучковатости деревьев на ЭВМ / М. Я. Обросов // Механизация обрезки сучьев: труды ЦНИИМЭ. — Химки, 1978. — С. 46- 54.
6. Петровский, В. С. Автоматическая оптимальная разделка стволов в системах управления линиями первичной обработки древесины : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / В. С. Петровский; Ленингр. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова. – Ленинград, 1971. - 52 с.
7. Торопов, А. С. Интенсификация производственных процессов поперечной распиловки лесоматериалов : специальность 05.21.01. : автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук / Торопов А. С.. — СПб., 1983. — 32 с.
8. Побединский, В. В. Предмет труда в лесопромышленных технологиях / В. В. Побединский, А. Ю. Чевардина // Научное творчество молодежи – лесному

комплексу России: материалы XIX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2023. — С. 602-605.

9. Высокоточное лесное хозяйство и цифровое управление лесами: финские технологии и возможности их трансфера в Россию / Е. Лопатин, Д. Добрынин, Д. Баранов [и др.] // Бизнес и устойчивое лесопользование. - 2020. - № 1 (60). - С. 17–24.

10. Жибуль, Е. Цифровой контроль. Новая система электронного учета древесины в Беларуси / Е. Жибуль // ЛесПромИнформ. - 2021. - № 2 (156). - С. 66–68.

11. Орешкина, А. В цифровом лесу: интернет вещей для лесорубов / А. Орешкина. — URL: <https://if24-ru.turbopages.org/if24.ru/s/tsifrovoi-les-iot-dlya-lesorubov/>.

12. Чупрун, О. Эффективность на расстоянии. Инновационные решения в лесозаготовке / О. Чупрун // ЛесПромИнформ. - 2021. - № 2 (156). - С. 72–73.

13. Шведский стартап Einride представил беспилотный лесовоз T-log. — URL: <https://hightech-fm.turbopages.org/hightech.fm/s/2018/07/12/wood-track>.

14. Weinig Luxscan CombiScan Sense — сканер с элементами искусственного интеллекта // lpk-sibiri.ru : [сайт]. — URL: https://lpk-sibiri.ru.turbopages.org/lpk-sibiri.ru/s/equipment/sawmill-equipment/weinig-luxscan-combiscan-sense/?utm_source=turbo_turbo.

15. Valmatics – система управления // valutec.ru : [сайт]. — URL: <https://www.valutec.ru/products/control-system/>.

16. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев / В. Ф. Ковязин, К. П. Виноградов, А. А. Киценко, Е. А. Васильева. - DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54 // Известия вузов. Лесной журнал. - 2020. - № 6. - С. 42–54.

17. Аэрогеоматика. Точность открывает реальность // aerogeomatica.ru : [сайт]. — URL: <http://www.aerogeomatica.ru/tech/>.

18. Учёные Ботанического сада ДВО РАН исследуют разрушение лесов с помощью нейросетей // Главный портал ботанических садов России: сайт. – 2021. – 17 февраля. – URL : <https://botsady.ru/news/1613491130-uchenye-botanicheskogo-sada-dvo-ran-issleduyut-razrushenie-lesov-s-pomoschyu-neyrosetey.html?ysclid=mbkprgrwxb41416708>.

19. Kislov, D. E. Extending deep learning approaches for forest disturbance segmentation on very high-resolution satellite images / D. E. Kislov , K. A. Korznikov , P. V. Krestov. – DOI 10.1002/rse2.194 // Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2021. – Vol. 7, N 3. – P. 355-368.

20. Neural-based hierarchical approach for detailed dominant forest species classification by multispectral satellite imagery / S. Illarionova, A. Trekin, V. Ignatiev, I. Oseledets // IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing. — 2021. — № 14. — С. 1810–1820. ЛесПромИнформ. 2021. № 3 (157). С. 47–48.

21. Модуль автоматического распознавания лесных пожаров «Пожарный сторож» // Лесохранитель : [сайт]. — URL: <https://lesohranitel.ru/fireguard.html>.

22. Баранов, К. Умный лес / К. Баранов // ЛесПромИнформ. — 2021. — № 3 (157). — С. 124–125.

23. Павлов, А. Повышение эффективности работы лесозаготовительных и лесопильных предприятий / А. Павлов // ЛесПромИнформ. — 2019. — № 7 (145). — С. 80–81.

24. Автоматизация и искусственный интеллект // sveza.ru : [сайт]. — URL: <https://sveza.ru/catalog/avtomatizatsiya-i-iskusstvennyu-intellekt>.

25. Приложение для подсчета листового материала Plycounter // sveza.ru : [сайт]. — URL: <https://sveza.ru/products/prilozhenie-dlya-podscheta-listovogo-materiala-plycounter/>.

26. «СканТрек»: лазерное сканирование древесины – технологично и объективно // lpk-sibiri.ru : [сайт]. — URL: <https://lpk-sibiri.ru/logging/timber-truck/skantrek-lazernoe-skanirovanie-drevesiny-tehnologichno-i-obektivno/>.

27. NeuroWood // neuro-wood.com : [сайт]. — URL: <http://neuro-wood.com/>.

28. Измерение леса дронами // forestscanner.net : [сайт]. — URL: <https://www.forestscanner.net>.
29. Evomatics. Решения. Вибромониторинг // Evomatics : [сайт]. — URL: <https://www.evomatics.ru/solutions/evocontrol-monitoring-raboty-oborudovaniya/vibromonitoring/>.
30. Автоматизация управления сушкой древесины: автоматика для сушильных камер // УНЛ ИТА : [сайт]. — URL: <https://esd70.ru>.
31. Лесная промышленность получила компьютерное зрение // Proderevo : [сайт]. — URL: <https://proderevo-net.turbopages.org/proderevo.net/s/news/corp/lesnaya-promyshlennost-poluchila-kompyuternoe-zrenie.html>.
32. Finnos Системы управления площадками для складирования круглых лесоматериалов / Finnos // finnos.fi : [сайт]. — URL: <https://www.finnos.fi/ru/our-solutions/log-yard-control-systems>.
33. The new generation of sawmill technologies digital sawmil from RemaSawco // LesPromInform. — 2019. — № 6 (144).
34. Ключевые тренды ЛПК: цифровизация лесной отрасли // nationalforest.ru : [сайт]. — URL: <https://nationalforest.ru/news/klyuchevyie-trendyi-lpk-czifrovizacziya-lesnoj-otrasli>.
35. Чевардина, А. Ю. Информационные технологии в деревообрабатывающей промышленности / А. Ю. Чевардина // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. — Екатеринбург, 2022. — С. 26-31.
36. Побединский, В. В. Анализ иностранных и отечественных информационных технологий в лесной промышленности / В. В. Побединский, А. Ю. Чевардина // Цивилизационные перемены в России: материалы XII научно-практической конференции. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2022. — С. 128-136.
37. Новый метод распознает виды деревьев автоматически // sciencedaily.com : [сайт]. — URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/01/170120085850.html>.

38. Посметьев, В. И. Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.4.108 // Известия вузов. Лесной журнал. – 2019. – № 4. – С. 108-123.

39. Побединский, В. В. Виртуальная лесосека для имитационного моделирования / В. В. Побединский, Н. Н. Теринов, Э. Ф. Герц, А. В. Мехренцев // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий : материалы XVI Международной научно-технической конференции / Уральский государственный лесотехнический университет ; отв. за вып. Л. В. Малюткина. - Екатеринбург : УГЛТУ, 2025. – С. 374–380.

40. Казаков, Н. В. Обоснование технологии лесосечных работ на основе автоматизации операций и локального управления машинами : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.21.01 / Казаков Николай Владимирович; [Место защиты: Сев. (Арктический) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова]. - Хабаровск, 2016. - 39 с.

41. Редькин, А. К. Способ моделирования и проектирования технологических процессов лесопромышленного комплекса / А. К. Редькин, С. Б. Якимович // Лесной вестник. — 2000. — № 4(13). — С. 55–69.

42. Мандрыгин, М. В. Цифровой прототип короснимателя / М. В. Мандрыгин, В. В. Побединский // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов / Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет ; члены оргкомитета: М. В. Газеев [и др.]. – Екатеринбург, 2021. – С. 497-500.

43. Исаев, С. П. Создание цифрового двойника объекта технологических воздействий в деревообработке / С. П. Исаев // Цифровые технологии в лесном секторе : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-

Петербург, 26–27 марта 2020 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 61-64.

44. Бегункова, Н. О. Построение натурной модели круглого лесоматериала и прогнозирование качества его раскроя на ее основе / Н. О. Бегункова // Системы Методы Технологии. — 2020. — № 2 (46). — С. 76–81.

45. Жук, К. Д. Повышение эффективности лесозаготовок путем совершенствования информационных систем и программного обеспечения лесных машин: диссертация ... кандидата технических наук : 4.3.4. / Жук Кирилл Дмитриевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» ; Диссовет Д 212.220.ХХ (24.2.381.01)]. - Санкт-Петербург, 2023. - 146 с. : ил.

46. Моделирование процесса сушки пиломатериалов / А. Г. Гороховский, В. В. Побединский, Е. Е. Шишкина, Е. В. Побединский. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166 // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2020. – № 1. – С. 154–166.

47. Синицын, Н. Н. Математическое моделирование процесса сушки древесной коры / Н. Н. Синицын, Н. В. Телин // Изв. вузов. Лесн. журн.. — 2020. — № 6. — С. 159–171.

48. Valusim // valutec.ru : [сайт]. — URL: <https://www.valutec.ru/products/control-system/valusim/>.

49. Чевардина, А. Ю. Анализ применения методов моделирования для объектов лесного сектора / А. Ю. Чевардина // Современная наука и молодые учёные: сборник статей XII Международной научно-практической конференции. — Пенза, 2022. — С. 16-18.

50. MATLAB // разработчик mathworks.com : [сайт]. — URL: <https://ch.mathworks.com/products/matlab.html>.

51. Mathematica // wikipedia.org : [сайт]. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Mathematica>.

52. Scilab // wikipedia.org : [сайт]. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Scilab>.
53. Maxima // разработчик sourceforge.io : [сайт]. — URL: <https://maxima.sourceforge.io/ru/index.html>.
54. Maple // разработчик maplesoft.com : [сайт]. — URL: <https://www.maplesoft.com/>.
55. STATISTICA : комплексный программный пакет / разработчик StatSoft. – URL : <http://www.statsoft.com>. – Электронная программа. – электронная.
56. GNU Octave // разработчик octave.org : [сайт]. — URL: <http://octave.org>.
57. Чевардина, А. Ю. Анализ средств моделирования, применительно к объектам лесного комплекса / А. Ю. Чевардина // Современная наука и молодые учёные: сборник статей XII Международной научно-практической конференции. — Пенза, 2022. — С. 19-21.
58. 3ds Max // wikipedia.org : [сайт]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max.
59. Blender // docs.blender.org : [сайт]. — URL: <https://docs.blender.org/manual>.
60. Cinema 4D // разработчик maxon.net : [сайт]. — URL: <https://id.maxon.net> .
61. Creo // разработчик irisoft.ru : [сайт]. — URL: <https://www.irisoft.ru/products/creo/ptc-creo-parametric/?ysclid=mb10ha6lpx22612697>.
62. Winds 3D // wikipedia.org : [сайт]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Wings_3D.
63. Компас 3D // kompas.ru : [сайт]. — URL: <https://kompas.ru/kompas-3d/about/>.
64. SolidWorks // wikipedia.org : [сайт]. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>.

65. Чевардина, А. Ю. Применение программного комплекса для 3D-моделирования BLENDER, как инструмента цифровых технологий / А. Ю. Чевардина // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: Материалы XV международной научно-технической конференции. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2024. — С. 512-519.

66. Побединский, В. В. Применение API PYTHON в 3D-моделировании BLENDER / В. В. Побединский, А. Ю. Чевардина // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: Материалы XV международной научно-технической конференции. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2024. — С. 507-511.

67. Чевардина, А. Ю. Программные комплексы, используемые для систем автоматизированного проектирования (САПР) и 3D-моделирования / А. Ю. Чевардина // Цивилизационные перемены в России: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2023. — С. 105-112.

68. Grieves, M. W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication / M. W. Grieves. — : LLC, 2014. — 7 с.

69. Побединский, В. В. Типы цифровых двойников по уровню интеграции / В. В. Побединский, А. Ю. Чевардина // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей международной научной конференции. — Казань : ООО «Конверт», 2022. — С. 137-139.

70. Побединский, В. В. Технология прототипирования цифрового двойника / В. В. Побединский, А. Ю. Чевардина // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2021. — С. 509-511.

71. Кокорев, Д. С. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества использования для бизнеса / Д. С. Кокорев, А. А. Юрин // Colloquium-journal. —

2019. — № 10 (34). — С. 101-104. Tao F. et al. Digital twin driven product design framework // International Journal of Production Research. – 2018. – pp. 3-19.

72. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review classification / Kritzingner Werner, Karner Matthias, Traar Georg [и др.] // IFAC PapersOnLine. — 2018. — № 51-11. — С. 1016–1022.

73. Frazzon, E. M. Simulation-based optimization for the integrated scheduling of production and logistic systems / E. M. Frazzon, André Albrecht, P. A. Hurtado // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — № 12. — С. 1050–1055.

74. Массель, Л. В. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики / Л. В. Массель, Т. Н. Ворожцова // Онтология проектирования. — 2020. — № Т.10, №3(37). — С. 327-337.

75. Макаров, В. Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян // Бизнес-информатика. — 2019. — № 13(4). — С. 7–16.

76. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства / Н. В. Курганова, М. А. Филин, Д. Е. Намиот [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Vol. 7, N 5. – P. 105-115.

77. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment / Jay Lee, Edzel Lapira, Behrad Bagheri, Hung-an Kao // Manufacturing Letters. — 2013. — № 1. — С. 38–41.

78. Tom, Austin-Morgan Maserati has fused cutting-edge digitalisation methods with Italian passion to meet customer demand / Austin-Morgan Tom // eurekamagazine.co.uk : [сайт]. — URL: <https://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/interviews/maserati-has-fused-cutting-edge-digitalisation-methods-with-italian-passion-to-meet-customer-demand/161332/>.

79. Ahlam, Rais Digital twin in the automobile industry / Rais Ahlam // maschinenmarkt.international : [сайт]. — URL: <https://www.maschinenmarkt.international/digital-twin-in-the-automobile-industry-a-851549/>.

80. Боровков, А. «Кортеж» прошел 50 тысяч виртуальных краш-тестов / А. Боровков // nti2035.ru : [сайт]. — URL: <https://nti2035.ru/media/publication/aleksey-borovkov-kortezh-proshel-50-tysyach-virtualnykh-krash-testov>.
81. Оптимизация массы кузова в контексте краш-теста автомобиля класса внедорожник / А. А. Коростелкин, О. И. Клявин, М. В. Алешин [и др.] // Вестник машиностроения. – 2019. – № 9. – С. 44-50.
82. В издательстве Springer опубликована статья о проекте Центра НТИ СПбПУ по снижению массы внедорожника VAIC Group // СПбПУ Петра Великого : сайт. – 2020. – 8 апреля. – URL : <https://nticenter.spbstu.ru/news/7297>.
83. Прохоров, А. Цифровой двойник : анализ, тренды, мировой опыт : корпоративное издание / Александр Прохоров, Михаил Лысачев ; научный редактор профессор Алексей Боровков ; [Росэнергоатом, Росатом]. - 1-е изд., испр. и доп. - Москва : АльянсПринт, 2020. - 400 с. : ил., табл.
84. Костринский, Герман Средне-Невский переходит на цифру / Герман Костринский // kommersant.ru : [сайт]. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3372987>.
85. Повх, Екатерина 10 цифровых двойников городов / Екатерина Повх // РБК-Недвижимость : [сайт]. — URL: <https://realty.rbc.ru/news/5e297b079a79478024d54ff6>.
86. Rotterdam's Digital Twin Redefines Our Physical, Digital, & Social Worlds // eu-smartcities.eu : [сайт]. — URL: <https://eu-smartcities.eu/news/rotterdams-digital-twin-redefines-our-physical-digital-social-worlds>.
87. Цифровизация нефтяной индустрии. Практические кейсы и примеры ведущих компаний // sntat.ru : [сайт]. — URL: <https://sntat.ru/news/science/16-09-2019/tsifrovizatsiya-neftyanoj-industrii-prakticheskie-kejsy-i-primery-veduschih-kompaniy-5650874>.
88. 1,5% дополнительной добычи. Газпром нефть внедряет новые цифровые решения для повышения эффективности управления добычей // neftegaz.ru : [сайт]. — URL: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/196157-1-5->

dopolnitelnoy-dobychi-gazprom-neft-vnedryaet-novye-tsifrovye-resheniya-dlya-povysheniya-effektiv/.

89. Мельникова, Юлия Сибур сделал шаг к цифровым двойникам / Юлия Мельникова // COMNEWS : [сайт]. — URL: <https://www.comnews.ru/content/117968/2019-02-19/sibur-sdelal-shag-k-cifrovym-dvoynikam>.

90. Побединский, В. В. Анализ применения технологии цифровых двойников / В. В. Побединский, А. Ю. Чевардина // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей международной научной конференции. — Казань : ООО «Конверт», 2022. — С. 140-142.

91. ГОСТ Р 57737-2017. Хлысты. Методы измерения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 сентября 2017 г. № 1275-ст : введен впервые : дата введения 2018-03-01 / разработан АО "Государственный научный центр лесопромышленного комплекса". - Москва : Стандартиформ, 2017. – 27 с.

92. ГОСТ 9463-88. Лесоматериалы круглые хвойных пород : технические условия : межгосударственный стандарт : введен впервые : введен 1991-01-01 / Госстандарт СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 11 с.

93. ГОСТ 32594-2013. Лесоматериалы круглые. Методы измерения : межгосударственный стандарт : введен впервые : введен 2015-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. - Москва : Стандартиформ, 2014. - 36 с.

94. ГОСТ 2708-75. Лесоматериалы круглые. Таблицы объемов : межгосударственный стандарт : введен впервые : введен 1977-01-01 / Госстандарт СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1975. – 37 с.

95. ГОСТ 22298-76. Бревна пиловочные хвойных пород, поставляемые для экспорта. Технические требования : межгосударственный стандарт : введен

впервые : введен 1977-01-01 / Госстандарт СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1976. – 6 с.

96. ГОСТ 2140-81. Видимые пороки древесины : классификация, термины и определения, способы измерения : межгосударственный стандарт : введен впервые : введен 1982-01-01 / Госстандарт СССР. – Москва : Стандартиформ, 2006. – 122 с.

97. ГОСТ 17462-84. Продукция лесозаготовительной промышленности. Термины и определения : межгосударственный стандарт : введен впервые : введен 1985-01-01 / Госстандарт СССР. – Москва : Издательство стандартов, 2000. – 11 с.

98. ГОСТ 32714-2014. Лесоматериалы. Термины и определения : межгосударственный стандарт : введен впервые : введен 2015-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 48 с.

99. ГОСТ Р 57738-2017. Хлысты. Технические условия : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 сентября 2017 г. № 1276-ст : введен впервые : дата введения 2018-03-01 / разработан АО "Государственный научный центр лесопромышленного комплекса". – Москва : Стандартиформ, 2017. – 10 с.

100. ГОСТ 17461-84. Технология лесозаготовительной промышленности. Термины и определения : межгосударственный стандарт : введен впервые : введен 1985-01-01 / Госстандарт СССР. – Москва : Издательство стандартов, 2001. – 11 с.

101. Таксация отдельного дерева : учебное пособие / З. Я. Нагимов, С. С. Зубова, О. В. Сычугова [и др.] ; Уральский государственный лесотехнический университет. - Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. - 160 с. : ил.

102. Лесотаксационный справочник / Б. И. Грошев, С. Г. Сеницын, П. И. Мороз [и др.]. - 2-е изд. перераб. - Москва : Лесная промышленность, 1980. - 287 с. - Библиогр.: с. 282.

103. Анучин, Н. П. Лесная таксация: Учебник для вузов / Н. П. Анучин. — 5-е изд., доп. — Москва : Лесная промышленность, 1982. — 552 с.

104. Захаров, В. К. Лесная таксация / В. К. Захаров. — Москва : Лесная промышленность, 1967. — 630 с.
105. Вероятностно-статистическая модель длины круглых лесоматериалов / В. И. Рукавичников, К. Н. Старцев, С. А. Колесников, В. В. Чамеев // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов / Уральский государственный лесотехнический университет ; редкол.: С. В. Залесов [и др.]. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2006. — С. 163-165.
106. Чевардина, А. Ю. К вопросу подбора размерных характеристик ствола для моделирования хлыста ели / А. Ю. Чевардина // Всероссийская научно-практическая конференция «3D технологии в решении научно-практических задач». — Красноярск : СИБГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. — С. 184-187.
107. Курицын, А. К. Круглые лесоматериалы : справочное пособие / А. К. Курицын. — Москва: ООО «Лесэксперт», 2006 г. — 153 с.
108. Вакин, А. Т. Пороки древесины / А. Т. Вакин, О. И. Полубояринов, В. А. Соловьев. — Москва : Лесная промышленность, 1980. — 112 с.
109. Симонов, М. Н. Окорочные станки: устройство и эксплуатация / М. Н. Симонов, Г. И. Торговников. — Москва : Лесная промышленность, 1990. — 182 с.
110. Чевардина, А. Ю. Основные параметры модели формы ствола ели / А. Ю. Чевардина // Научное обозрение: актуальные вопросы теории и практики: сборник статей V Международной научно-практической конференции. — Пенза, 2023. — С. 41-43.
111. Нейросетевая технология моделирования таксационных показателей лесоматериалов / В. В. Побединский, Н. Н. Теринов, А. Ю. Чевардина [и др.]. — DOI 10.18324/2077-5415-2024-1-72-79 // Системы. Методы. Технологии. — 2024. — № 1(61). — С. 72-79.
112. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024611794 : Нейронная сеть для расчета таксационных показателей лесоматериалов / В.В. Побединский, А.Ю. Чевардина ; заявл. 22.01.2024; дата регистрации 24.01.2024.

113. Моделирование закомелистой части ствола лесоматериала в среде MATLAB / В. В. Побединский, И. Н. Кручинин, А. Ю. Чевардина [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. - 2024. – № 1. – С. 23-31.

114. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024612625 : Программа моделирования закомелистости лесоматериала / В.В. Побединский, А.Ю. Чевардина ; заявл. 19.01.2024 ; дата регистрации 02.02.2024.

115. Стяжкин, В. П. Закономерность связи диаметра сучков с размерами стволов / В. П. Стяжкин. — Москва : Лесная промышленность. — 2004. — № 4. — С. 20-24.

116. Дорофеев, Л. Г. Зависимость сучковатости от толщины ствола / Л. Г. Дорофеев // Механизация обрезки сучьев: труды ЦНИИМЭ. — Химки : ЦНИИМЭ, 1978. — С. 40-45.

117. Дружинин, Н. А. Влияние выборочных форм рубок на качественные показатели древесины подпологовой ели / Н. А. Дружинин, Ф. Н. Дружинин, С. Е. Грибов // Лесной журнал. — 2016. — № 6. — С. 56–64.

118. Зыков, А. Э. Интеграция между различными средами трёхмерного моделирования на примере экспортирования цифровой модели гидроманипулятора / А. Э. Зыков, А. Ю. Чевардина // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XXI Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2025. – С.562-567.

119. Ганеев, Р. Р. Разработка цифрового прототипа окорочного станка / Р.Р. Ганеев, А. Ю. Чевардина // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XXII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2026. – С. 605-609.

120. Окорочный станок роторного типа ВР-1206 // v-hold.ru : [сайт]. — URL: https://www.v-hold.ru/katalog/derevoobrabatyvayushee_oborudovanie/okorochnyj_stanok.

121. Воронина, Н. Ф. Экономическая обоснованность проведения полунатурных испытаний при реализации НИР / Н. Ф. Воронина, Э. И. Соболева // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. – 2019. – № 3 (48). – С. 104-108.

122. Берстенёв, А. В. Обоснование параметров автоматически управляемого пневмогидропривода короснимателя роторных окорочных станков : специальность 5.21.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Берстенёв Андрей Владимирович ; УГЛТУ. — Екатеринбург, 2012. — 264 с.

123. Василевский, Д. А. Разработка механизма прижима вальцов роторного окорочного станка с пневмогидроприводом : специальность 5.21.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Василевский Дмитрий Андреевич ; УГЛТУ. — Екатеринбург, 2013. — 200 с.

124. Чамеев, В. В. Сортосостав круглых лесоматериалов и выход пиломатериалов и заготовок общего назначения / В. В. Чамеев, Е. В. Гаева, П. Е. Харисов // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. — Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006. — С. 23-27.

125. Исаев, С. П. Формирование древесных материалов из хвойного сырья на основе учета его морфометрических характеристик : специальность 05.21.05 : автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук / Исаев С. П. — СПб., 2009. — 273 с.

126. Леонтьев, Л. Л. Лесоматериалы круглые: Учебное пособие / Л. Л. Леонтьев. — СПб. : СПбГЛТА, 2003. — 76 с.

127. Побединский, В. В. Имитационное нечетко-геометрическое моделирование объекта труда окорочных технологий / В. В. Побединский, К. П. Асин, Е. В. Побединский // Аграрный научный журнал. – № 3. – 2015. – С.56-61.

128. Якубицкий, В. А. Дерево как объект обработки на нижнем складе / В. А. Якубицкий // Вопросы проектирования и эксплуатации оборудования для нижних складов. — Химики : ЦНИИМЭ, 1965. — С. 3-37.

129. Бураков, Н. Н. Влияние сучков на механические свойства древесины сосны и ели / Н. Н. Бураков. — М., 1980. — 61 с.
130. Пижурин, А. А. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки / А. А. Пижурин, М. С. Розенблит. — Москва : Лесная промышленность, 1988. — 294 с.
131. Чамеев, В. В. Природно-производственные условия лесного фонда и размерно-качественная характеристика деревьев и хлыстов : учеб. пособие / В. В. Чамеев, Б. Е. Меньшиков, В. В. Обвинцев, Урал. гос. лесотехн. ун-т. - Екатеринбург : УГЛТУ, 2001. - 108 с. - (Основы проектирования лесопромышленных производств. Системный подход).
132. Стефановский, В. Х. Влияние диаметров бревен на процесс их окорки / В. Х. Стефановский // Деревообрабатывающая промышленность. — 1974. — N 2. — С.5-7.
133. Гудков, А. Ю. Теоретическое обоснование формы маломерных хлыстов / А. Ю. Гудков // Повышение эффективности лесозаготовок малолесных районов России: межвуз. сб. науч. тр. по матер. междунар. конф.. — Воронеж : ВГЛТА, 2002. — С. 68-71.
134. Редькин, А. К. Основы моделирования и оптимизации процессов лесозаготовок / А. К. Редькин. — Москва : Лесная промышленность, 1988. — 256 с.
135. Полубояринов, О. И. Сучковатость древесного сырья / О. И. Полубояринов. — Л. : ЛТА, 1972. — 52 с.
136. Анучин, Н. П. Определение объемов хлыстов и сортиментов / Н. П. Анучин. - 3-е изд., доп. - Москва : Лесная промышленность, 1985. - 184 с. : ил.
137. Казаков, Н. В. Автоматизированные системы управления процессами промышленного лесопользования / Н. В. Казаков, А. В. Абузов // Инженерный вестник Дона. — 2014. — № 2(29). — С. 99.
138. Правительство, РФ Распоряжение Правительства РФ / РФ Правительство // consultant.ru : [сайт]. — URL: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/67704.html>.

139. Основные размерно-качественные характеристики круглых лесоматериалов, заготавливаемых в Архангельской области / А. А. Тамби, С. А. Угрюмов, А. Р. Бирман, И. А. Черноградская // Известия вузов. Лесной журнал. – 2020. – № 4. – С. 147-156.

140. Чевардина, А. Ю. Средства трехмерного моделирования коры в BLENDER / А. Ю. Чевардина // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2024. — С. 826-830.

141. Жернаков, Д. Д. Особенности лесозаготовительных и лесохозяйственных операций как объектов моделирования / Д.Д. Жернаков, А. Ю. Чевардина // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XXII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2026. – С. 629-632.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

(справочное)

Таблица 1 – Банк данных по размерно-качественным характеристикам формы хлыстов ели

№ п.п.	d1,3, см	L, м	дв, см	d'в, см	Dн, см	а	О	К, %	Ср, см/м	С _з	N, ед	Ср. дл. ребра, ср, см	СКО ср, Dср, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	56	10	44	42	68	0,02	1,0	0,2%	1,4	1,2	2	63	15
2	17	4,5	13	12	21	0,03	1,1	0,7%	1,3	1,2	2	61	15
3	40	6,5	35	33	51	0,02	1,1	0,3%	1,0	1,3	3	87	15
4	12	4	9	7	16	0,06	1,3	1,5%	1,1	1,3	2	100	15
5	29	8,5	22	20	38	0,07	1,1	0,8%	1,0	1,3	4	103	15
6	24	5,3	20	18	30	0,02	1,1	0,4%	1,0	1,3	5	75	15
7	48	11	36	35	60	0,06	1,0	0,5%	1,2	1,3	0	0	0
8	44	9	36	33	51	0,04	1,1	0,4%	1,0	1,2	1	77	15
9	52	11,5	42	40	62	0,1	1,1	0,9%	1,0	1,2	2	106	15
10	16	4	12	11	22	0,01	1,1	0,3%	1,5	1,4	3	74	15
11	12	3,5	9	6	16	0,04	1,5	1,1%	1,4	1,3	1	64	15
12	36	8,3	26	22	45	0,02	1,2	0,2%	1,4	1,3	1	82	15
13	20	5	16	14	26	0,05	1,1	1,0%	1,1	1,3	3	97	15
14	24	7	18	15	30	0,04	1,2	0,6%	1,1	1,3	2	100	15
15	18	4,8	14	12	24	0,07	1,2	1,5%	1,1	1,3	4	84	15
16	32	9,5	24	24	38	0,07	1,0	0,7%	1,0	1,2	5	72	15
17	28	7	22	20	35	0,03	1,1	0,4%	1,1	1,3	4	88	15
18	52	10,5	42	40	68	0,06	1,1	0,6%	1,1	1,3	5	67	15
19	36	8,3	25	22	45	0,02	1,1	0,2%	1,6	1,3	0	0	0
20	12	3,6	9	7	15	0,03	1,3	0,8%	1,3	1,3	2	85	15
21	40	8,5	32	32	49	0,04	1,0	0,5%	1,1	1,2	3	79	15
22	48	9,5	37	34	53	0,04	1,1	0,4%	1,3	1,1	4	97	15
23	50	13	38	34	64	0,07	1,1	0,5%	1,0	1,3	1	108	15
24	48	11,5	38	36	56	0,09	1,1	0,8%	1,0	1,2	0	0	0
25	12	3,9	8	6	16	0,02	1,3	0,5%	1,5	1,3	4	92	15
26	9	3,3	7	7	12	0,02	1,0	0,6%	1,0	1,3	1	65	15
27	56	13	44	40	70	0,07	1,1	0,5%	1,0	1,3	3	65	15
28	20	3,75	17	14	24	0,03	1,2	0,8%	1,2	1,2	5	102	15
29	10	4,5	7	6	13	0,03	1,2	0,7%	0,9	1,3	5	103	15
30	12	3,4	9	6	14	0,02	1,5	0,6%	1,4	1,2	3	65	15
31	20	5	16	14	28	0,01	1,1	0,2%	1,1	1,4	5	95	15
32	14	4	11	8	18	0,05	1,4	1,3%	1,1	1,3	4	95	15
33	16	4,6	13	12	20	0,08	1,1	1,7%	0,9	1,3	1	89	15
34	28	5,5	23	20	34	0,08	1,2	1,5%	1,2	1,2	1	105	15
35	32	7,8	21	19	44	0,05	1,1	0,6%	1,7	1,4	0	0	0
36	30	7	24	21	37	0,03	1,1	0,4%	1,1	1,2	2	100	15
37	38	8	31	30	46	0,05	1,0	0,6%	1,0	1,2	4	75	15
38	40	7,5	34	32	52	0,08	1,1	1,1%	1,0	1,3	5	61	15
39	36	10	26	26	44	0,07	1,0	0,7%	1,1	1,2	2	105	15
40	26	5,2	20	17	33	0,03	1,2	0,6%	1,5	1,3	4	100	15
41	30	5,2	25	24	39	0,05	1,0	1,0%	1,3	1,3	1	99	15
42	37	9,1	24	22	44	0,03	1,1	0,3%	1,7	1,2	0	0	0
43	46	10	37	36	54	0,04	1,0	0,4%	1,0	1,2	0	0	0
44	52	12,5	40	40	64	0,05	1,0	0,4%	1,1	1,2	5	95	15
45	48	9,5	38	36	59	0,05	1,1	0,5%	1,2	1,2	2	82	15
46	44	11	32	30	54	0,1	1,1	0,9%	1,2	1,2	4	77	15
47	52	11	40	39	68	0,04	1,0	0,4%	1,2	1,3	5	89	15
48	42	10,5	30	28	52	0,03	1,1	0,3%	1,3	1,2	5	100	15
49	55	12	44	42	68	0,06	1,0	0,5%	1,0	1,2	4	99	15
50	16	4	13	13	22	0,04	1,0	1,0%	1,1	1,4	2	82	15
51	11	3,8	8	7	14	0,05	1,1	1,3%	1,2	1,3	2	84	15
52	46	10	36	35	53	0,07	1,0	0,7%	1,1	1,2	3	108	15
53	32	8,2	25	23	42	0,02	1,1	0,2%	1,0	1,3	3	89	15
54	40	7	34	33	50	0,06	1,0	0,9%	1,1	1,3	5	81	15
55	26	4,8	21	18	36	0,07	1,2	1,5%	1,4	1,4	2	66	15
56	52	9,5	42	40	66	0,06	1,1	0,6%	1,2	1,3	5	88	15
57	32	8,1	24	22	46	0,09	1,1	1,1%	1,2	1,4	1	100	15

Продолжение приложения А

Продолжение таблицы 1 – Банк данных по размерно-качественным характеристикам формы хлыстов ели

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
58	16	4,3	12	11	22	0,02	1,1	0,5%	1,3	1,4	0	0	0
59	22	6,0	17	16	26	0,07	1,1	1,2%	1,1	1,2	3	84	15
60	14	3,6	12	12	16	0,02	1,0	0,6%	0,9	1,1	1	110	15
61	27	8,3	22	20	37	0,02	1,1	0,2%	0,7	1,4	2	103	15
62	36	9,5	26	24	48	0,08	1,1	0,8%	1,2	1,3	4	93	15
63	56	13	44	40	68	0,09	1,1	0,7%	1,0	1,2	1	81	15
64	34	10	25	24	50	0,06	1,0	0,6%	1,0	1,5	4	74	15
65	30	6,5	24	20	40	0,05	1,2	0,8%	1,2	1,3	2	94	15
66	24	8	17	15	30	0,09	1,1	1,1%	1,0	1,3	2	100	15
67	48	10,5	38	36	58	0,05	1,1	0,5%	1,1	1,2	1	103	15
68	32	6,75	26	25	40	0,07	1,0	1,0%	1,1	1,3	5	80	15
69	20	4,3	17	14	28	0,04	1,2	0,9%	1,0	1,4	3	102	15
70	22	5,2	18	15	30	0,02	1,2	0,4%	1,0	1,4	3	107	15
71	30	7	24	23	42	0,03	1,0	0,4%	1,1	1,4	1	68	15
72	48	10	37	37	64	0,06	1,0	0,6%	1,3	1,3	2	110	15
73	56	12,5	44	41	68	0,05	1,1	0,4%	1,1	1,2	1	98	15
74	52	9,5	42	41	64	0,04	1,0	0,4%	1,2	1,2	4	72	15
75	54	11	44	42	70	0,04	1,0	0,4%	1,0	1,3	5	97	15
76	52	11	42	42	66	0,08	1,0	0,7%	1,0	1,3	3	84	15
77	46	9	38	36	57	0,09	1,1	1,0%	1,0	1,2	0	0	0
78	56	12	44	40	70	0,08	1,1	0,7%	1,1	1,3	4	89	15
79	10	4,1	8	6	16	0,02	1,3	0,5%	0,7	1,6	5	74	15
80	9	3,4	7	6	12	0,02	1,2	0,6%	1,0	1,3	0	0	0
81	12	3,5	10	9	15	0,01	1,1	0,3%	0,9	1,3	4	65	15
82	21	6	16	13	28	0,05	1,2	0,8%	1,1	1,3	0	0	0
83	16	4,6	13	12	20	0,03	1,1	0,7%	0,9	1,3	1	80	15
84	25	6	20	20	30	0,03	1,0	0,5%	1,1	1,2	2	73	15
85	36	6,5	30	28	44	0,07	1,1	1,1%	1,2	1,2	1	63	36
86	16	3,4	14	14	24	0,045	1,0	1,3%	1,0	1,5	5	94	16
87	50	12,5	38	36	66	0,09	1,1	0,7%	1,1	1,3	4	92	50
88	22	4,5	18	18	26	0,02	1,0	0,4%	1,3	1,2	0	0	0
89	26	6,5	20	19	32	0,03	1,1	0,5%	1,2	1,2	5	68	15
90	38	8,5	31	30	46	0,06	1,0	0,7%	1,0	1,2	4	83	15
91	44	9,5	34	30	58	0,1	1,1	1,1%	1,2	1,3	4	84	15
92	52	11	40	39	66	0,08	1,0	0,7%	1,2	1,3	4	101	15
93	54	13	42	42	70	0,05	1,0	0,4%	1,0	1,3	5	102	15
94	12	3,5	10	8	17	0,04	1,3	1,1%	0,9	1,4	5	64	15
95	12	5	8	7	18	0,06	1,1	1,2%	1,1	1,5	2	90	15
96	10	2,5	8	7	13	0,01	1,1	0,4%	1,7	1,3	1	65	15
97	22	5	18	17	30	0,02	1,1	0,4%	1,1	1,4	1	104	15
98	28	6,7	24	20	34	0,01	1,2	0,1%	0,7	1,2	4	82	15
99	30	6,5	25	25	38	0,02	1,0	0,3%	1,0	1,3	3	100	15
100	23	5,4	19	19	30	0,01	1,0	0,2%	1,0	1,3	0	0	0

Приложение Б

(справочное)

Полный код для API Python в среде Blender.

```
1 import bpy
2 import math
3 import numpy as np
4 import random
5 from typing import List
6 from random import randint
7 from bpy.types import Operator, Panel, PropertyGroup, Object
8 from bpy.utils import register_class, unregister_class
9 from bpy.props import BoolProperty, FloatProperty, PointerProperty
10
11 class RandomizeProps(PropertyGroup):
12     dv1: FloatProperty(
13         name = 'dv1',
14         default = 8,
15         soft_min = 6,
16         soft_max = 55,
17         subtype = 'FACTOR'
18     )
19     dv2: FloatProperty(
20         name = 'dv2',
21         default = 8,
22         soft_min = 6,
23         soft_max = 55,
24         subtype = 'FACTOR'
25     )
26     dg1: FloatProperty(
27         name = 'd1,31',
28         default = 32,
29         soft_min = 8,
30         soft_max = 56,
31         subtype = 'FACTOR'
32     )
33     dg2: FloatProperty(
34         name = 'd1,32',
35         default = 32,
36         soft_min = 8,
37         soft_max = 56,
38         subtype = 'FACTOR'
39     )
40     Do: FloatProperty(
41         name = 'Do',
42         default = 40,
43         soft_min = 10,
44         soft_max = 70,
45         subtype = 'FACTOR'
46     )
47     L: FloatProperty(
48         name = 'L',
49         default = 410,
50         soft_min = 75,
```

```
51         soft_max = 1300,
52         subtype = 'FACTOR'
53     )
54
55     li: FloatProperty(
56         name = 'li',
57         default = 80,
58         soft_min = 60,
59         soft_max = 120,
60         subtype = 'FACTOR'
61     )
62     a: FloatProperty(
63         name = 'a',
64         default = 5,
65         soft_min = 0,
66         soft_max = 10,
67         subtype = 'FACTOR'
68     )
69     change_even1 : BoolProperty(
70         name = 'Округлая закомелистость',
71         default = True
72     )
73     change_even2 : BoolProperty(
74         name = '5 пёбер',
75         default = False
76     )
77     change_even3 : BoolProperty(
78         name = '4 пёбра',
79         default = False
80     )
81     change_even4 : BoolProperty(
82         name = '3 пёбра',
83         default = False
84     )
85     change_even5 : BoolProperty(
86         name = '1 пёбро',
87         default = False
88     )
89     change_even6 : BoolProperty(
90         name = '2 пёбра',
91         default = False
92     )
93     change_even7 : BoolProperty(
94         name = 'Сучки',
95         default = False
96     )
97
98
99
100 class RandomizeScale(Operator):
101     bl_idname = 'object.random_scale'
102     bl_label = 'Generation'
103     change_even1 = None
104     change_even2 = None
105     change_even3 = None
106     change_even4 = None
107     change_even5 = None
```

```

108 change_even6 = None
109 change_even7 = None
110 dv1 = None
111 dv2 = None
112 dg1 = None
113 dg2 = None
114 Do = None
115 L = None
116 li = None
117 a = None
118
119
120 def structure(self, context):
121     props = context.scene.rand
122     self.change_even1 = props.change_even1
123     self.change_even2 = props.change_even2
124     self.change_even3 = props.change_even3
125     self.change_even4 = props.change_even4
126     self.change_even5 = props.change_even5
127     self.change_even6 = props.change_even6
128     self.change_even7 = props.change_even7
129     self.dv1 = props.dv1
130     self.dv2 = props.dv2
131     self.dg1 = props.dg1
132     self.dg2 = props.dg2
133     self.Do = props.Do
134     self.L = props.L
135     self.li = props.li
136     self.a = props.a
137     self.scene = context.scene
138
139 def get_scale(self) -> float:
140
141     # срез микропрофиля основания
142     #Округлая закомелистость
143
144     if self.change_even1:
145
146         if self.dg1 >= 35:
147             pgr1 = 1
148         else:
149             pgr1 = 2
150
151         if self.Do <= 20 or self.Do == 36 or self.Do == 44:
152             pgli0 = 2
153             pg = 1
154         else:
155             pgli0 = 2.5
156             pg = 5
157
158         #ali = randint(0, (self.a))
159         bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius=
160 self.Do/10, location=(0, 0, 0))
161         bpy.context.object.scale[0] = self.Do/pgli0
162         bpy.context.object.scale[1] = self.Do/pgli0
163
164     # Шаблон среза основания ствола с 5 ребрами

```

```

165
166     if self.change_even2:
167
168         if self.dg1 >= 35:
169             pgr1 = 1
170         else:
171             pgr1 = 2
172
173         if self.Do <= 30:
174             pgli5 = 25
175             pg = 1
176         elif 31 <=self.Do <= 35:
177             pgli5 = 25
178             pg = 1
179
180         elif 36 <= self.Do <= 58:
181             pgli5 = 17
182             pg = 5
183         else:
184             pgli5 = 13
185             pg = 7
186
187         # Вычисляем значения координат точек x и y на основе ранее
188         полученных уровней
189
190         a = np.arange(0, 361, 5)
191         l = 66.7*np.sin(0.01215*a-
192 0.5552)+65.04*np.sin(0.02348*a+0.562)+86.27*np.sin(0.0347*a+1.721)+56.04*np
193 .sin(0.0384*a+4.242)+1.734*np.sin(0.1236*a-1.185)+2.152*np.sin(0.1128*a-
194 1.346)+0.8004*np.sin(0.07388*a-0.5015)+1.159*np.sin(0.156*a+0.2392)
195         x = l*np.cos(np.radians(a))
196         y = l*np.sin(np.radians(a))
197
198         # Список вершин
199
200         verts = []
201         faces = []
202
203         # Создаем вершины на основе координат
204
205         for i in range (len(a)-1):
206             verts.extend([(x[i], y[i], 0), (x[i+1], y[i+1], 0)])
207
208         # Создаем сетку для фигуры
209
210         mesh = bpy.data.meshes.new(name="Srez")
211         obj = bpy.data.objects.new("SrezObject", mesh)
212         bpy.context.collection.objects.link(obj)
213
214         mesh.from_pydata(verts, [], faces)
215         mesh.update()
216
217         # Переключаемся в режим редактирования объекта
218
219         bpy.context.view_layer.objects.active = obj
220         bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
221         bpy.ops.mesh.select_all(action='SELECT')

```

```

222     bpy.ops.mesh.edge_face_add()
223     bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
224     bpy.context.object.scale[0] = self.Do/pgli5
225     bpy.context.object.scale[1] = self.Do/pgli5
226
227     # Шаблон среза основания ствола с 4 ребрами
228     if self.change_even3:
229
230         if self.dg1 >= 35:
231             pgr1 = 1
232         else:
233             pgr1 = 2
234
235         if self.Do <= 25:
236             pgli4 = 20
237             pg = 1
238         if self.Do >= 58:
239             pgli4 = 10
240             pg = 12
241         else:
242             pgli4 = 17
243             pg = 5
244
245         a = np.arange(0, 361, 5)
246         l = 38.41* np.sin(0.005275*a+ 0.4203) + 13.89*
247     np.sin(0.008797*a+ 2.751) + 4.079* np.sin(0.03832*a+ 1.99) + 5.201*
248     np.sin(0.05531*a+ 1.687) + 1.641* np.sin(0.09868*a-1.373) + 1.636*
249     np.sin(0.1264*a-0.04853) + 2.059* np.sin(0.08041*a- 3.647) + 0.5027*
250     np.sin(0.1753*a- 1.26)
251
252         x = l*np.cos(np.radians(a))
253         y = l*np.sin(np.radians(a))
254
255         # Список вершин
256
257         verts = []
258         faces = []
259
260         # Создаем вершины на основе координат
261
262         for i in range(len(a)-1):
263             verts.extend([(x[i], y[i], 0), (x[i+1], y[i+1], 0)])
264
265         # Создаем сетку для фигуры
266
267         mesh = bpy.data.meshes.new(name="Srez")
268         obj = bpy.data.objects.new("SrezObject", mesh)
269         bpy.context.collection.objects.link(obj)
270
271         mesh.from_pydata(verts, [], faces)
272         mesh.update()
273
274         # Переключаемся в режим редактирования объекта
275
276         bpy.context.view_layer.objects.active = obj
277         bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
278         bpy.ops.mesh.select_all(action='SELECT')

```

```

279     bpy.ops.mesh.edge_face_add()
280     bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
281     bpy.context.object.scale[0] = self.Do/pgli4
282     bpy.context.object.scale[1] = self.Do/pgli4
283
284     # Шаблон среза основания ствола с 3 ребрами
285     if self.change_even4:
286
287         if self.dg1 >= 35:
288             pgr1 = 1
289         else:
290             pgr1 = 2
291
292         if self.Do <= 20:
293             pgli3 = 20
294             pg = 1
295
296         elif 20 <= self.Do <= 30:
297             pgli3 = 16
298             pg = 3
299         elif 31 <= self.Do <= 40:
300             pgli3 = 12
301             pg = 3
302         elif 41 <= self.Do <= 49:
303             pgli3 = 10
304             pg = 5
305
306         else:
307             pgli3 = 8
308             pg = 7
309
310         a = np.arange(0, 361, 5)
311         l = 25.24* np.sin(0.006002*a+ 0.8976) + 8.433* np.sin(0.0144*a+
312 3.261) + 5.979* np.sin(0.04068*a+ 5.389) + 4.68* np.sin(0.03079*a+ 4.08) +
313 2.592* np.sin(0.06583*a+ 1.042) + 1.433* np.sin(0.09549*a+ 0.9069) +
314 0.5001* np.sin(0.1457*a - 4.085) + 0.6758* np.sin(0.1229*a -4.748)
315
316         x = l*np.cos(np.radians(a))
317         y = l*np.sin(np.radians(a))
318
319         # Список вершин
320
321         verts = []
322         faces = []
323
324         # Создаем вершины на основе координат
325
326         for i in range (len(a)-1):
327             verts.extend([(x[i], y[i], 0), (x[i+1], y[i+1], 0)])
328
329         # Создаем сетку для фигуры
330
331         mesh = bpy.data.meshes.new(name="Srez")
332         obj = bpy.data.objects.new("SrezObject", mesh)
333         bpy.context.collection.objects.link(obj)
334
335         mesh.from_pydata(verts, [], faces)

```

```

336     mesh.update()
337
338     # Переключаемся в режим редактирования объекта
339
340     bpy.context.view_layer.objects.active = obj
341     bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
342     bpy.ops.mesh.select_all(action='SELECT')
343     bpy.ops.mesh.edge_face_add()
344     bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
345     bpy.context.object.scale[0] = self.Do/pgli3
346     bpy.context.object.scale[1] = self.Do/pgli3
347
348
349     # Шаблон среза основания ствола с 1 ребром
350     if self.change_even5:
351
352         if self.dg1 >= 35:
353             pgr1 = 1
354
355         else:
356             pgr1 = 2
357
358         if 12 <= self.Do and self.Do <= 20:
359             rp1 = 15
360             pg = 2
361         elif 21 <= self.Do and self.Do <= 30:
362             rp1 = 12
363             pg = 3
364         elif 31 <= self.Do and self.Do <= 39:
365             rp1 = 10
366             pg = 1
367         elif 40 <= self.Do and self.Do <= 48:
368             rp1 = 10
369             pg = 6
370         elif 49 <= self.Do and self.Do <= 58:
371             rp1 = 7
372             pg = 6
373         elif 21 <= self.Do and self.Do <= 30:
374             rp1 = 12
375             pg = 3
376         elif 12 <= self.Do and self.Do <= 20:
377             rp1 = 15
378             pg = 1
379         else:
380             rp1 = 6
381             pg = 10
382
383         a = np.arange(0, 361, 5)
384         l = 23.45* np.sin(0.006988*a+ 0.3288) + 11.42* np.sin(0.01296*a+
385 2.382) + 1.7* np.sin(0.03512*a+ 1.125) + 1.296* np.sin(0.05261*a+ 0.7046) +
386 3.598* np.sin(0.08069*a -1.659) + 8.34* np.sin(0.08999*a -0.3603) + 8.412*
387 np.sin(0.09726*a+ 1.347) + 3.204* np.sin(0.1032 *a+ 3.32)
388
389         x = l*np.cos(np.radians(a))
390         y = l*np.sin(np.radians(a))
391         # Список вершин
392

```

```

393     verts = []
394     faces = []
395
396     # Создаем вершины на основе координат
397
398     for i in range (len(a)-1):
399         verts.extend([(x[i], y[i], 0), (x[i+1], y[i+1], 0)])
400
401     # Создаем сетку для фигуры
402
403     mesh = bpy.data.meshes.new(name="Srez")
404     obj = bpy.data.objects.new("SrezObject", mesh)
405     bpy.context.collection.objects.link(obj)
406
407     mesh.from_pydata(verts, [], faces)
408     mesh.update()
409
410     # Переключаемся в режим редактирования объекта
411
412     bpy.context.view_layer.objects.active = obj
413     bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
414     bpy.ops.mesh.select_all(action='SELECT')
415     bpy.ops.mesh.edge_face_add()
416     bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
417     bpy.context.object.scale[0] = self.Do/rp1
418     bpy.context.object.scale[1] = self.Do/rp1
419
420
421     # Шаблон среза основания ствола с 2 ребрами
422     if self.change_even6:
423
424         if self.dg1 >= 35:
425             pgr1 = 1
426
427         else:
428             pgr1 = 2
429
430         if self.Do <= 20:
431             pgli2 = 22
432             pg = 1
433         elif 21<=self.Do <= 29:
434             pgli2 = 17
435             pg = 1
436         elif 30 <= self.Do <= 39:
437             pgli2 = 12
438             pg = 5
439         elif 40 <= self.Do <= 49:
440             pgli2= 7
441             pg = 1
442
443         else:
444             pgli2= 7
445             pg = 2
446
447         a = np.arange(0, 361, 5)
448         l = 27.6* np.sin(0.008668*a -0.05194) + 14.34 *
449         np.sin(0.01916*a+ 1.55) + 1.235* np.sin(0.05558*a+ 0.7661) + 8.986*

```

```

450 np.sin(0.07464*a+ 1.252) + 3.207* np.sin(0.03624 *a+ 2.463) + 8.102*
451 np.sin(0.07697*a+ 4.053) + 65.51* np.sin(0.1628*a+ 0.005608) + 65.38*
452 np.sin(0.1629*a+ 3.137)
453
454         x = 1*np.cos(np.radians(a))
455         y = 1*np.sin(np.radians(a))
456
457
458     # Список вершин
459
460         verts = []
461         faces = []
462
463     # Создаем вершины на основе координат
464
465         for i in range (len(a)-1):
466             verts.extend([(x[i], y[i], 0), (x[i+1], y[i+1], 0)])
467
468     # Создаем сетку для фигуры
469
470         mesh = bpy.data.meshes.new(name="Srez")
471         obj = bpy.data.objects.new("SrezObject", mesh)
472         bpy.context.collection.objects.link(obj)
473
474         mesh.from_pydata(verts, [], faces)
475         mesh.update()
476
477     # Переключаемся в режим редактирования объекта
478
479         bpy.context.view_layer.objects.active = obj
480         bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
481         bpy.ops.mesh.select_all(action='SELECT')
482         bpy.ops.mesh.edge_face_add()
483         bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
484         bpy.context.object.scale[0] = self.Do/pgli2
485         bpy.context.object.scale[1] = self.Do/pgli2
486
487     # срез на уровне средней длины ребра
488     ali = randint(0, (self.a))
489     rli = randint((self.dg1 + 1), (self.Do - pg))
490
491     bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius= rli/4,
492 location=(ali, ali, self.li))
493     bpy.context.object.scale[0] = randint((self.dg1 + 1), (self.Do -
494 pg))/5
495     bpy.context.object.scale[1] = randint((self.dg1 + 1), (self.Do -
496 pg))/5
497
498
499     # срез на уровне груди
500     a130 = randint(0, (self.a))
501     bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius= (self.dg1/2),
502 location = (a130, a130, 130))
503     bpy.context.object.scale[0] = (self.dg1) / 10
504     bpy.context.object.scale[1] = (self.dg2) /10
505
506     # срез на высоте 2/3, где самые толстые сучки дб

```

```

507     if self.Do <= 20:
508         rd = 0
509     elif 21 < self.Do <= 40:
510         rd = 2
511     elif 41 <= self.Do:
512         rd = 4
513
514     a130 = randint(0, (self.a))
515     l23 = (self.L)*2/3
516     Scp = (self.dg1 - self.dv1)/((123-130)/100)
517     D23 = (self.dg1 - Scp/100*(123-130)) + rd
518
519     bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius= D23/2,
520 location = (a130, a130, l23))
521     bpy.context.object.scale[0] = D23/10
522     bpy.context.object.scale[1] = D23/10
523     #вершинный диаметр
524     bpy.ops.mesh.primitive_circle_add(vertices=72, radius= (self.dv1/2),
525 location = (self.a, self.a, self.L))
526     bpy.context.object.scale[0] = (self.dv1) /10
527     bpy.context.object.scale[1] = (self.dv2) /10
528     print("D23=", D23)
529     print("dv1=", self.dv1)
530     print("l23=", l23)
531     print("dg1=", self.dg1)
532
533     # сглаживание
534
535
536     bpy.ops.object.select_all(action='SELECT')
537
538     for o in bpy.data.objects:
539         o.select_set(True)
540         bpy.context.view_layer.objects.active = o
541     bpy.ops.object.join()
542
543     bpy.ops.object.editmode_toggle()
544     bpy.ops.mesh.edge_face_add()
545     bpy.ops.mesh.bridge_edge_loops()
546
547     bpy.ops.object.editmode_toggle()
548     bpy.ops.object.shade_smooth(use_auto_smooth=True)
549
550     # создаем мутовки
551
552
553     if self.change_even7:
554         bzsr = (0.1*self.dg1+4)*10
555         q = random.normalvariate(0, 1)
556         qLi = 0.2*bzsr
557         bz = bzsr + qLi**q
558         current_location = bz
559         Di = self.dg1 - Scp/100*(current_location-130)
560         lm = 11.2*(Di**0.36)
561         nl = ((self.L - bz)/math.trunc(lm)) - 1
562
563     if self.Do <= 20:

```

```

564         sc_kn = 0.85
565         def_kn = 0.7
566     elif 21 < self.Do <= 30:
567         sc_kn = 0.9
568         def_kn = 1
569     elif 31 < self.Do < 40:
570         sc_kn = 1.35
571         def_kn = 1.4
572     elif 40 <= self.Do <= 49:
573         sc_kn = 1.1
574         def_kn = 1.3
575     elif 50 <= self.Do <= 59:
576         sc_kn = 1.9
577         def_kn = 2.5
578
579     elif self.Do >= 60:
580         sc_kn = 1.8
581         def_kn = 2.6
582
583     scale_knot = self.Do * sc_kn
584
585     max_radius_knot = 1.22*(D23/2)**0.294
586
587     for i in range(math.trunc(nl)):
588         vert_count = randint(1, 4)
589         angle_step = 2 * math.pi /vert_count
590         scale_knot -= def_kn
591         current_location = current_location+math.trunc(lm)
592         if (l23 - lm)<= current_location <= (l23+ lm):
593
594             for j in range(vert_count):
595
596                 random_rotation = randint(45,145)
597
598                 bpy.ops.mesh.primitive_cylinder_add(radius =
599 max_radius_knot, scale = (1, 1, scale_knot), location =(self.a, self.a,
600 current_location))
601                 obj = bpy.context.active_object
602
603                 print(radius_knot)
604
605                 if vert_count == 1:
606                     obj.rotation_euler.x =
607 math.radians(random_rotation)
608                     obj.rotation_euler.y =
609 math.radians(random_rotation)
610                     obj.rotation_euler.z = math.radians(180)
611
612                 if vert_count == 2:
613
614                     if j%2 == 1:
615                         obj.rotation_euler.x =
616 math.radians(random_rotation)
617                         obj.rotation_euler.y = 0
618                         obj.rotation_euler.z = math.radians(90)
619                     else:
620                         obj.rotation_euler.x = 0

```

```

621         obj.rotation_euler.y =
622     math.radians(random_rotation)
623         obj.rotation_euler.z = math.radians(180)
624
625         if vert_count == 3:
626             if j == 0:
627                 obj.rotation_euler.x = 0
628                 obj.rotation_euler.y =
629     math.radians(random_rotation)
630                 obj.rotation_euler.z = math.radians(180)
631             if j == 1:
632                 obj.rotation_euler.x =
633     math.radians(random_rotation)
634                 obj.rotation_euler.y = 0
635                 obj.rotation_euler.z = math.radians(45)
636
637             if j == 2:
638                 obj.rotation_euler.x =
639     math.radians(random_rotation)
640                 obj.rotation_euler.y = 0
641                 obj.rotation_euler.z = math.radians(145)
642         if vert_count == 4:
643             obj.rotation_euler.z = math.radians(180)
644             if j%2 == 1:
645                 obj.rotation_euler.x = math.radians(90)
646                 obj.rotation_euler.y = 0
647             else:
648                 obj.rotation_euler.x = 0
649                 obj.rotation_euler.y = math.radians(90)
650
651     else:
652
653         for j in range(vert_count):
654
655             radius_knot = np.random.uniform(1.5,
656     max_radius_knot)
657             round_radius_knot = round(radius_knot, 2)
658             random_rotation = randint(45,145)
659
660             bpy.ops.mesh.primitive_cylinder_add(radius =
661     round_radius_knot, scale = (1, 1, scale_knot), location =(self.a, self.a,
662     current_location))
663             obj = bpy.context.active_object
664
665             if vert_count == 1:
666                 obj.rotation_euler.x =
667     math.radians(random_rotation)
668                 obj.rotation_euler.y =
669     math.radians(random_rotation)
670                 obj.rotation_euler.z = math.radians(180)
671
672             if vert_count == 2:
673                 if j%2 == 1:
674                     obj.rotation_euler.x =
675     math.radians(random_rotation)
676                     obj.rotation_euler.y = 0
677                     obj.rotation_euler.z = math.radians(90)

```

```

678         else:
679             obj.rotation_euler.x = 0
680             obj.rotation_euler.y =
681 math.radians(random_rotation)
682             obj.rotation_euler.z =
683 math.radians(180)
684
685             if vert_count == 3:
686                 if j == 0:
687                     obj.rotation_euler.x = 0
688                     obj.rotation_euler.y =
689 math.radians(random_rotation)
690                     obj.rotation_euler.z =
691 math.radians(180)
692                 if j == 1:
693                     obj.rotation_euler.x =
694 math.radians(random_rotation)
695                     obj.rotation_euler.y = 0
696                     obj.rotation_euler.z = math.radians(45)
697
698                 if j == 2:
699                     obj.rotation_euler.x =
700 math.radians(random_rotation)
701                     obj.rotation_euler.y = 0
702                     obj.rotation_euler.z =
703 math.radians(145)
704             if vert_count == 4:
705                 obj.rotation_euler.z = math.radians(180)
706                 if j%2 == 1:
707                     obj.rotation_euler.x = math.radians(90)
708                     obj.rotation_euler.y = 0
709                 else:
710                     obj.rotation_euler.x = 0
711                     obj.rotation_euler.y = math.radians(90)
712
713
714         bpy.context.view_layer.objects.active = obj
715         bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
716
717
718         obj.select_set(True)
719         bpy.context.view_layer.objects.active = obj
720         bpy.ops.object.shade_smooth()
721
722
723         bpy.ops.object.select_all(action='SELECT')
724
725         for o in bpy.data.objects:
726             o.select_set(True)
727             bpy.context.view_layer.objects.active = o
728         bpy.ops.object.join()
729
730
731
732     def execute(self, context) -> set:
733         self.structure(context)
734         self.get_scale()

```

```

735         return {'FINISHED'}
736
737
738 class OBJECT_PT_RandomizeScalePanel(Panel):
739     bl_label = "Parameters"
740     bl_space_type = "VIEW_3D"
741     bl_region_type = "UI"
742     bl_category = 'Generation'
743
744     def draw(self, context):
745         layout = self.layout
746         props = context.scene.rand
747
748         col = layout.column()
749
750         spl = col.split(align = True)
751         spl.prop(props, "dv1")
752         spl.prop(props, "dv2")
753
754         spl = col.split(align = True)
755         spl.prop(props, "dg1")
756         spl.prop(props, "dg2")
757
758         spl = col.split(align = True)
759         spl.prop(props, "Do")
760         spl.prop(props, "L")
761
762         spl = col.split(align = True)
763         spl.prop(props, "li")
764         spl.prop(props, "a")
765
766         col.prop(props, "change_even1")
767         col = layout.column()
768
769         col.prop(props, "change_even5")
770         col = layout.column()
771
772         col.prop(props, "change_even6")
773         col = layout.column()
774
775         col.prop(props, "change_even4")
776         col = layout.column()
777
778         col.prop(props, "change_even3")
779         col = layout.column()
780
781         col.prop(props, "change_even2")
782         col = layout.column()
783
784         col.prop(props, "change_even7")
785         col = layout.column()
786
787         row = layout.row()
788         row.operator('object.random_scale')
789
790 classes = [
791     RandomizeProps,

```

```
792     RandomizeScale,  
793     OBJECT_PT_RandomizeScalePanel]  
794  
795 def register():  
796     for cl in classes:  
797         register_class(cl)  
798     bpy.types.Scene.rand = PointerProperty(type = RandomizeProps)  
799  
800  
801 def unregister():  
802     for cl in reversed(classes):  
803         unregister_class(cl)  
804  
805 if __name__ == '__main__':  
806     register()
```

Приложение В (справочное)


ПРОЕКТСЕРВИС
ООО "Проектсервис"
620078, Свердловская область, город Екатеринбург,
пер Автоматики, д. 16, 12
Тел.: +7(343) 217-35-10(11), 383-44-54,
e-mail: www.projects-service.ru
ОКПО 16889553,
ОГРН 1026604934333,
ИНН/КПП 6660063311/667001001

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО «Проектсервис»


В.Е. Рысев
«10» ноября 2025г

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы в производственных условиях

Комиссия в составе:

представители ООО «Проектсервис»:

Пинягин Н.Ф. главный инженер

представители ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»:

Побединский В.В., зав. кафедрой УТСиИТ, профессор

Чевардина А.Ю., соискатель

составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательских и программных разработок Чевардиной Анастасии Юрьевны прошли промышленную апробацию и приняты для использования обществом с ограниченной ответственностью «Проектсервис», а именно:

- методика для моделирования размерно-качественных параметров лесоматериала, определяющих форму хлыста;
 - программа для построения трёхмерной модели цифрового прототипа древесного хлыста с пороками формы
- приняты в производство, имеют практическую значимость и используются в производственных условиях предприятия с целью анализа размерно-качественных характеристик обрабатываемого лесоматериала, проведения испытаний и проектирования лесоперерабатывающего оборудования.

Члены комиссии:



Пинягин Н.Ф.


Побединский В.В.


Чевардина А.Ю.

Приложение Г

(справочное)



Общество с ограниченной ответственностью
«Лестех»

Юр.адрес: 624691, Свердловская область, м.о. Муниципальное образование Алапаевское,
пгт. Верхняя Синячиха, ул. Октябрьская, д. 59А

Почтовый адрес: 624600, Свердловская область, г. Алапаевск, ул. Л.Чайкиной, д.6
ИНН 6601015620, КПП 667701001, ОГРН 1106601000736, р/с 40702810616040058186
Уральский банк ПАО «Сбербанка России», БИК 046577674, к/с 30101810500000000674
Тел/факс 8 (34346) 33157,33158
e-mail: lesteh@vs-lesteh.ru

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор ООО «Лестех»
Шестаков А.А.
«21» января 2026 г.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательских работ в производственных
условиях

Комиссия в составе:

представители ООО «Лестех»:

Шестаков А.А., генеральный директор

представители ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический
университет»:

Побединский В.В., зав. кафедрой УТСиИТ, профессор

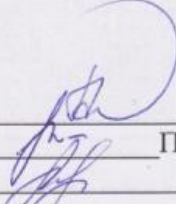
Чевардина А.Ю., соискатель

составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательских и
программных разработок Чевардиной Анастасии Юрьевны приняты для
использования обществом с ограниченной ответственностью «Лестех», а именно:

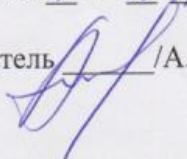
- нейросетевая технология для моделирования размерно-качественных параметров лесоматериала, определяющих форму хлыста с учётом пороков;
- алгоритм генерации параметрической модели цифрового прототипа древесного хлыста с пороками формы;
- методика формирования цифровых прототипов технологических потоков лесоматериалов.

Указанные результаты внедрены в производственных условиях предприятия с целью анализа размерно-качественных характеристик обрабатываемого лесоматериала, моделирования производственных процессов, проектирования и модернизации лесоперерабатывающего оборудования.

Члены комиссии:


 Шестаков А.А.
 Побединский В.В.
 Чевардина А.Ю.

Приложение Д
(справочное)

РЕКОМЕНДОВАНО:
Методической комиссией
Инженерно-технического
института
Протокол № 1 от "05" февраля 2016 г.
Председатель  /А.В. Мехренцев

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной работе и
инновационной деятельности
ФГБОУ ВО «Уральский
государственный лесотехнический
университет»,
доктор биологических наук,
профессор


В.В. Фомин
«16» февраля 2016 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс на кафедре Управления в технических системах и инновационных технологий Уральского государственного лесотехнического университета результатов исследований по теме:
«Совершенствование проектирования лесопромышленного оборудования на основе цифрового прототипирования предмета труда».

1. Тема разработана кафедрой Управления в технических системах и инновационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

2. Руководитель темы: заведующий кафедрой управления в технических системах и инновационных технологий ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор, доктор технических наук Побединский Владимир Викторович.

3. Соискатель – Чевардина Анастасия Юрьевна.

4. Наименование разделов темы, выполненных соискателем:

разработка методики построения цифрового прототипа предмета труда на примере древесного хлыста для использования в лесопромышленных технологиях; разработка технологии моделирования размерно-качественных характеристик формы хлыста породы ель, основанной на использовании метода нейронных сетей; разработка программного обеспечения для построения трёхмерной модели цифрового прототипа хлыста ели, учитывающего пороки формы дерева; проведение численных экспериментов и обработка их результатов.

5. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат:

для цифрового прототипа предмета труда на примере хлыста ели определены основные параметры моделирования, корреляционные связи с входными показателями и предложена методика построения модели лесоматериала. В результате диссертационных исследований разработан цифровой прототип хлыста ели как предмета труда.

6. Внедрение по курсу дисциплин: «Проектная деятельность», «Моделирование систем управления и процессов», «Системы автоматизированного проектирования».

7. Влияние на качество подготовки специалистов: решается актуальная задача для лесопромышленного комплекса по исследованию и проектированию лесозаготовительного, деревообрабатывающего и лесохозяйственного оборудования и технологий.

8. Рекомендации: результаты исследований использовать в курсовом и дипломном проектировании выпускающей кафедры Управления в технических системах и инновационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

Состав комиссии:

Директор Инженерно-технического
института,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Мехренцев

Заведующий кафедрой
Управления в технических системах
и инновационных технологий,
доктор технических наук, профессор

В.В. Побединский

Доцент кафедры
Управления в технических системах
и инновационных технологий,
кандидат технических наук, доцент

С.П. Санников

Приложение Е
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024612625

**Программа моделирования закомелистости
лесоматериала**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Уральский государственный лесотехнический
университет" (RU)*

Авторы: *Побединский Владимир Викторович (RU),
Чевардина Анастасия Юрьевна (RU)*

Заявка № **2024610826**

Дата поступления **19 января 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **02 февраля 2024 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b630fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю. С. Зубов

Приложение Ж
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024611794

Нейронная сеть для расчета таксационных показателей
лесоматериалов

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Уральский государственный лесотехнический
университет" (RU)*

Авторы: *Побединский Владимир Викторович (RU),
Чевардина Анастасия Юрьевна (RU)*

Заявка № 2024610872

Дата поступления 22 января 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 января 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164ba196f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юлий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов