

ЕВДОКИМОВ НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ
ДРЕВЕСИНЫ ДЛЯ ПОСЛОЙНОГО ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена на кафедре инженерной графики и автоматизированного проектирования в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна».

Научный руководитель: **Мидуков Николай Петрович**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной графики и автоматизированного проектирования ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Официальные оппоненты: **Шкуро Алексей Евгеньевич**
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры технологии целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет».

Говядин Илья Константинович
кандидат технических наук, проректор по цифровой трансформации и комплексной безопасности ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «28» марта 2024 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.02 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. СПб, ул. Ивана Черных, 4, <https://sutd.ru/nauka/dissertacii/>.

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 Положения о присуждении учёных степеней).

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Махотина Людмила Герцевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности образуется большое количество частиц древесины, которые классифицируются как опилки (отходы). При их правильной подготовке, например, если в древесине не содержится частиц размером более 200 мкм, продукт повышается в цене, так как относится к категории древесная мука марки 200. Если стоимость опилок составляет примерно 500 руб./т (по данным на 2023 г.), то одна тонна древесной муки продаётся за 16 500 руб. (в 33 раза дороже). Оба способа использования древесины решают проблему утилизации опилок с территории целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих предприятий. В меньшей степени частицы измельчённой древесины используются в строительных смесях. Для послойного строительства домов сложной формы стоимость сырья составляет примерно 35 000 руб./т. Наиболее высокая цена на сырьё для 3D-принтеров, в котором содержатся частицы древесины, соответствует пластику «Fiber wood», цена за который составляет 3 000 000 руб./т. Последний вариант не решает проблему утилизации отходов в целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП), так как не предполагает крупные объёмы производства древесно-полимерного композита, однако благодаря высокой стоимости материала это направление также актуально.

К тому же в 2018 году Правительством РФ была принята стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. В соответствии с ней древесные отходы классифицируют как «Отходы сельского и лесного хозяйства, животноводства, растениеводства, пищевые отходы», при этом предприятия деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности обязаны перерабатывать отходы, опилки в том числе.

Одним из наиболее перспективных и быстроразвивающихся способов переработки опилок является их подготовка и использование в качестве сырья для аддитивных технологий. Инвестиции в аддитивные технологии ежегодно увеличиваются более чем на 20 %, при этом глобальный объём инвестиций в 2020 году превысил 12,7 млрд долларов. С ростом продаж 3D-принтеров также растёт спрос на расходные материалы. Эксперты прогнозируют, что к 2027 году объём инвестиций в аддитивные технологии достигнет 41,6 млрд долл. с упором на увеличение объёмов производства материалов для 3D-печати, главным образом для экструзионной. При таких темпах развития аддитивные технологии станут эффективным способом использования отходов древесины деревообрабатывающих и целлюлозно-бумажных предприятий. Важно отметить, что из-за особых характеристик древесину трудно адаптировать к 3D-печати без специальной обработки и подготовки, большая часть расходов придётся на энергетические затраты, связанные с размолотом опилок до древесной муки марок 200.

Поэтому необходимы исследования, которые смогли бы дать энергетическую оценку процессу подготовки древесины различных пород,

растущих в нашем регионе, к использованию в качестве добавки в композит для производства ценного полуфабриката. Использование композита в жидком виде в качестве сырья для 3D-принтеров требует оценку реологических характеристик, так как это связано с подачей смеси через сопла небольшого диаметра. Реологическая характеристика древесно-полимерного композита должна установить возможность её применения в 3D-печати для сопел определённых размеров.

Известно, что 3D-печать осуществляется по разным принципам, каждый из которых во многом определяет прочностные, поверхностные, влагопрочные свойства изделий. Поэтому при разработке нового способа послойного изготовления изделий из композита, содержащего частицы древесины и многокомпонентное связующее, необходима экспериментальная проверка с определением оптимального состава композита с максимально возможным содержанием частиц древесины. Поскольку древесная мука намного дешевле синтетического полимерного связующего.

Несмотря на то, что аддитивные технологии являются новым направлением в мире, отечественными учёными (Э.Л. Аким, А.А. Берлин, В.В. Глухих, А.А. Леонович, А.А. Тагер, А.Г. Захаров, А.Н. Чубинский, и др.) накоплена богатая фундаментальная база знаний о древесно-полимерных композитах на основе синтетических полимерных связующих, сегодня применяемых в 3D-принтерах.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является разработка технологии подготовки композита на основе древесины для послойного формования изделий комбинацией экструзии жидким древесно-полимерным композитом и водорастворимым полимерным прутком. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Оценить удельные энергетические затраты на размол древесины различных пород с учётом требуемого размера частиц не более 200 мкм для последующего послойного формования изделий композитом в жидком виде с двухкомпонентным связующим.

2. Исследовать композиционный материал на основе древесины и связующего с отвердителем, в частности, получить реологические характеристики, установив точки перехода жидкости от неньютоновского течения к ньютоновскому, чтобы организовать эффективную работу подающего устройства 3D-принтера.

3. На основе экспериментальных исследований определить оптимальный состав многокомпонентного связующего с допустимым содержанием частиц древесины, соответствующим высоким прочностным и поверхностным характеристикам образцов.

4. Разработать практические рекомендации и устройство для послойного формования изделий из композиционного материала на основе древесной муки и многокомпонентного связующего комбинацией методов жидкого нанесения смеси и экструзии полимерным прутком.

Научная новизна. Новизной обладают результаты сравнения удельных энергетических затрат на размол древесины различных пород Северо-Западного региона нашей страны, а также не определён диапазон, при котором затраты энергии резко повышаются с небольшим уменьшением размеров частиц древесины. Исследуемый композиционный материал ранее не использовался при послойном формовании изделий, поэтому реологических и вязкостных характеристик для него не было. По реологическим характеристикам установлены точки перехода жидкости от неньютоновского течения к ньютоновскому для различных концентраций древесной муки в композите. На основании дифференциального механического анализа были получены термомеханические кривые, по которым были установлены точки перехода из стеклообразного в высокоэластичное состояние предлагаемого древесно-полимерного композита на основе двухкомпонентного связующего. Установлено оптимальное содержание древесной муки, которое соответствовало максимальному значению модуля накопления при изгибе.

Впервые получены экспериментальные зависимости между свойствами композиционного материала на основе древесины и двухкомпонентного связующего с содержанием древесной муки до 30 %.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основании полученных данных анализа размеров частиц методами оптической и сканирующей электронной микроскопии при различных удельных энергетических затратах на размол был рекомендован наиболее оптимальный вариант подготовки древесины для последующего получения композиции для аддитивных технологий. По инициативе отечественного производителя мельниц была проведена оценка удельных энергетических затрат энергии на размол различных пород древесины, растущих в Северо-Западном регионе нашей страны, с использованием недорогой оптической микроскопии и бесплатной программы, что подтверждает практическую значимость работы.

Реологические характеристики при различных содержаниях древесной муки в композите позволили организовать эффективную работу подающего устройства 3D-принтера, оценить режимы печати для технологии послойного нанесения полимера в жидком виде (для заполнения) в сочетании с экструзией полимерного прутка из пластика (для создания контура изделия). Результаты теоретических исследований были использованы при разработке устройства для послойного формования по комбинированной технологии экструзии жидкой смесью (Liquid Deposition Modeling - LDM) и экструзии термопластичного прутка из водорастворимого полимера (Fused Deposition Modeling - FDM) (Патент № 220692).

Экспериментально установленный оптимальный состав древесно-полимерного композита, который соответствовал высоким механическим характеристикам изделий, позволил изготовить по предлагаемой технологии и разработанному устройству декоративные изделия для мебели и конструктивные элементы оборудования ЦБП, на примере лопаток конвейера для транспортировки литой тары, производимой из макулатуры.

Объектом исследования является полимерный композит на основе частиц древесины, образующихся на ЦБП и деревообрабатывающих предприятиях, и двухкомпонентное связующее, представляющие собой сырьё для послойного формования по технологии экструзии жидкой смесью и экструзии прутка из водорастворимого полимера.

Предметом исследования является технология и устройство для подготовки композита на основе древесины для послойного формования изделий методом экструзии жидкой смеси и экструзии прутка из водорастворимого полимера.

Методы исследования. Гранулометрический анализ древесных частиц производился с помощью оптического микроскопа и бесплатной программы «ImageJ», а также с помощью современного анализатора частиц, который предоставил статистическую обработку данных о размерах частиц различных пород древесины при различных удельных энергетических затратах на размол. Сканирующая электронная микроскопия использовалась для визуальной оценки формы и размера частиц древесины различных пород. Влажность, плотность частиц определялись стандартными методами, в работе также был использован метод оценки насыпной плотности частиц древесины с помощью разработанного устройства пикнометра (Пат. № 111663). Реологические характеристики жидкого композита на основе частиц древесины и многокомпонентного связующего оценивались в соответствии международным и всероссийским стандартами. Механические и термомеханические свойства образцов, изготовленных по технологиям послойного формования, в частности методом экструзии жидкой смеси (LDM) и экструзии прутка из водорастворимого полимера (FDM).

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты оценки энергетической эффективности размола древесины различных пород, основанные на данных морфологического и микроскопического анализа частиц для последующего использования в послойном формовании изделий.

2. Оптимальный состав и реологические свойства жидкого композиционного материала на основе древесины и связующего с отвердителем для послойного формования по технологии экструзии жидкой смеси (LDM) и экструзии прутка из водорастворимого полимера (FDM).

3. Экспериментально определенный оптимальный состав композиции многокомпонентного связующего с допустимым содержанием частиц древесины, соответствующим высоким прочностным и поверхностным характеристикам образцов.

4. Технология и устройство для изготовления изделий методом послойного формования путём комбинации экструзии жидкой смесью (LDM) и экструзией прутка из водорастворимого полимера (FDM 3D-печать).

Апробация работы. Результаты работы были представлены на научно-практических конференциях: «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (Воронеж, 2014 г.); «Неделя науки

СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2014 г.); «Pap-For» (Санкт-Петербург, 2021 г.); «Dialogue of cultures» (Saint-Petersburg, 2022 г.); «Биос-форум» (Санкт-Петербург, 2021 г.); «Леса России» (СПбЛТУ, 2023 г.). Анализ исследования размеров частиц древесины с помощью оптической микроскопии и программы ImageJ, а также исследование морфологических характеристик выполнены в рамках темы: «Разработка методов оценки и анализ неоднородности межволоконных связей в 2D/3D гетерогенной среде целлюлозных композиционных материалах»¹.

Публикации. Опубликовано 8 печатных работ по теме диссертации, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ (статьи переведены и опубликованы в журнале «Fiber Chemistry», который входит в базы цитирования «Web of Science» и «Scopus»). Устройство для 3D-принтера для изготовления изделий из композиционных материалов и пикнометр защищены патентами РФ. Всего опубликовано 2 патента.

Личный вклад автора заключается в экспериментальной оценке физико-механических свойств древесно-полимерного композиционного материала; в обработке полученных результатов, в их обобщении и формулировке выводов, в разработке устройств для оценки насыпной плотности древесной муки, опилок и экструдеров для комбинированной 3D-печати по технологиям LDM и FDM, а также в публикации полученных результатов исследования в научных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и выводов, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 170 страницах машинописного текста и содержит 82 рисунка, 12 таблиц, 161 наименование использованных источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, где рассмотрены особенности размола древесины для получения древесно-полимерных композиционных материалов, проанализированы их свойства, в частности, реологические характеристики композита в жидком виде и термомеханические характеристики твёрдых изделий. Рассмотрены способы послойного нанесения древесно-полимерных композитов, проанализированы конструкции экструдеров для изготовления изделий на основе жидких древесно-полимерных композитов, проведена оценка современного состояния развития технологий 3D-печати в целом.

¹ Совместный научный и научно-технический проект, выполняемый образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь на тему: «Разработка методов оценки и анализ неоднородности межволоконных связей в 2D/3D гетерогенной среде целлюлозных композиционных материалах» поддержан Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга

Во второй главе описаны объекты и методы исследования, в частности, даётся характеристика частиц древесины различных пород и двухкомпонентных синтетических полимеров, реактопластов. Представлены характеристики размалывающего лабораторного оборудования, приборов для оценки влажности, насыпной плотности (Пат. №111663), прибора для оценки размеров частиц.

Даётся подробное описание разработанного двухэкструдерного устройства для послойного нанесения древесно-полимерного композита (Пат. № 220692). Техническим результатом разрабатываемого устройства является повышение качества изделий, при одновременном использовании сопла для подачи водорастворимого пластика для нанесения контура декоративных изделий и элементов конструкций оборудования ЦБП простой и сложной геометрической формы и сопла для подачи жидкого древесно-полимерного композита, путём синхронизации работы экструдеров. Указанный результат достигается тем, что существующее устройство для 3D-принтера для изготовления изделий из композиционных материалов, включающее ёмкость экструдера, отверстие для загрузки в экструдер материала, привод дозатора и мешалки, дозатор, сопло, штуцер для подачи пластифицирующих добавок, запорный клапан, отличающееся тем, что ёмкость экструдера выполнена с возможностью движения по вертикали на 1,5 – 3 мм по отношению к соплу дополнительно установленного экструдера для печати водорастворимым пластиком. Причём оба экструдера установлены на опорной раме. Движение ёмкости и сопла вверх осуществляется за счёт пружины, а за счёт вращения шнековой мешалки в среде смеси ёмкость вместе с соплом движется вниз, электронагреватель и датчик выполнены с возможностью контролировать и устанавливать температуру сопла. На рисунке 1 показан общий вид синхронной работы двух экструдеров для подачи смеси и водорастворимого пластика.

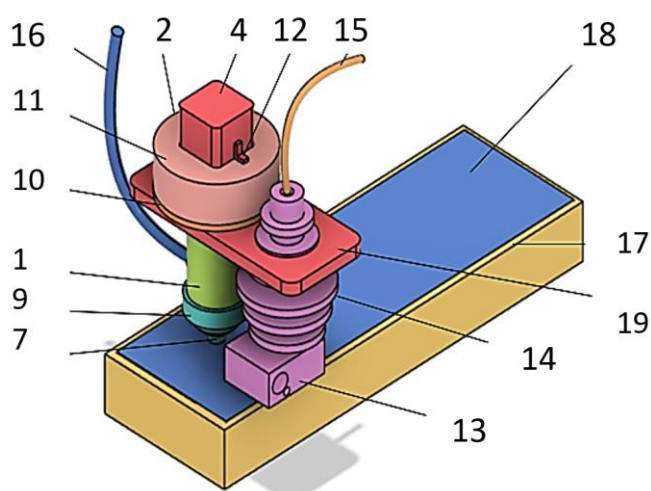


Рисунок 1 – Общий вид двухэкструдерного устройства для комбинирования технологии FDM и LDM 3D-печати: 1 – корпус; 2 – крепление; 4 – привод; 7 – сопло; 9 – нагревательный элемент; 10 – прижим; 11 – поддержка экструдера; 12 – крепления; 14 – экструдер (FDM); 13 – электронагреватель экструдера (FDM); 15 – пруток водорастворимого пластика; 16 – патрубок для подачи смеси связующего и древесной муки; 17 – контур изделия из водорастворимого пластика; 18 – заполненная смесью область изделия; 19 – общая рама

Когда экструдер завершает нанесение слоя из древесной муки и синтетического полимерного связующего, упругость пружины

восстанавливает положение корпуса в исходное. Таким образом, экструдер, наносимый композит, не мешает формированию контура изделия из водорастворимого пластика 17. Водорастворимый пластик в виде прутка 15 подаётся в экструдер 13, который расплавляется с помощью электронагревателя 14 при температуре 180 – 220 °С, а композит из древесной муки и синтетического полимерного связующего подогревается. Рабочий диапазон температур составляет 20 – 90 °С в зависимости от свойств связующего, вязкость которого уменьшается при нагреве. Оба экструдера устанавливаются на общую раму 19.

Синхронизация работы экструдеров необходима, так как это позволяет повысить качество изделий, кроме того, устройство способно организовать подачу разных по свойству материалов. При этом необходимо настроить характеристики 3D-печати под материал. Важным условием для реализации комбинированной технологии является использование двухэкструдерного 3D-принтера, который может контролировать характеристики каждого экструдера в отдельности.

Во второй главе также даётся характеристика оборудования для оценки реологии древесно-полимерного композита в жидком виде (Rheotest RN4.1), термомеханических свойств (DMA/SDTA 861e), для сканирующей электронной микроскопии (Teskan Mira LMH), анализа частиц (Mastersizer 2000). Перечисленное оборудование было предоставлено центром коллективного пользования при НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». В работе была использована методика оценки размеров частиц древесины и равномерность их распределения в композиционном материале с помощью микроскопии и графической программы ImageJ. Испытания произведённых из древесно-полимерного композита образцов по технологии комбинированной LDM и FDM 3D-печати осуществлялись с помощью стандартных методов (оценка твёрдости, сопротивления изгибу, сжатию, впитываемость влаги).

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям по подготовке древесно-полимерной композиции для послойного нанесения. Важной стадией подготовки является размол древесины, который связан с высокими затратами энергии, зависящими во многом от породы и свойств древесины. В работе были сопоставлены особенности размола древесины различных пород Северо-Западного региона нашей страны. Эффективность процесса определялась сравнением удельных затрат энергии и размеров частиц до и после размола в одинаковых условиях. С помощью «ImageJ» определены размеры частиц древесины после размола в мельнице, по анализу микроскопических изображений. Всего было проанализировано 7158 частиц, разделённых на классы по природе древесины: бук; дуб; лиственница; ольха; сосна, а также подклассы по количеству циклов размола (0 – без размола; 1, 3, 5, 10 циклов размола в дисковой мельнице). На рисунке 1 представлены кривые распределения размеров частиц сосны. Сравнение кривых осуществлялось по медиане кривой распределения.

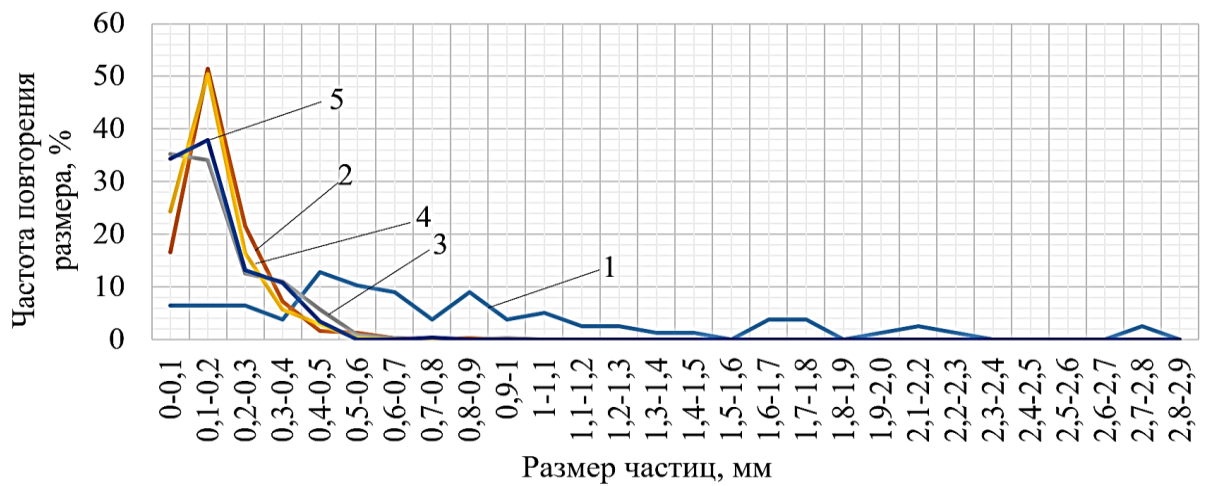


Рисунок 2 – Влияние продолжительности размола в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц сосны: 1, 2, 3, 4, 5 – после 0, 1, 3, 5, 10 циклов размола соответственно

Согласно данным многократного измерения мощности с интервалом в сек. (рисунок 3) было установлено, что наибольший скачок соответствует дубу и буку (1400 Вт).

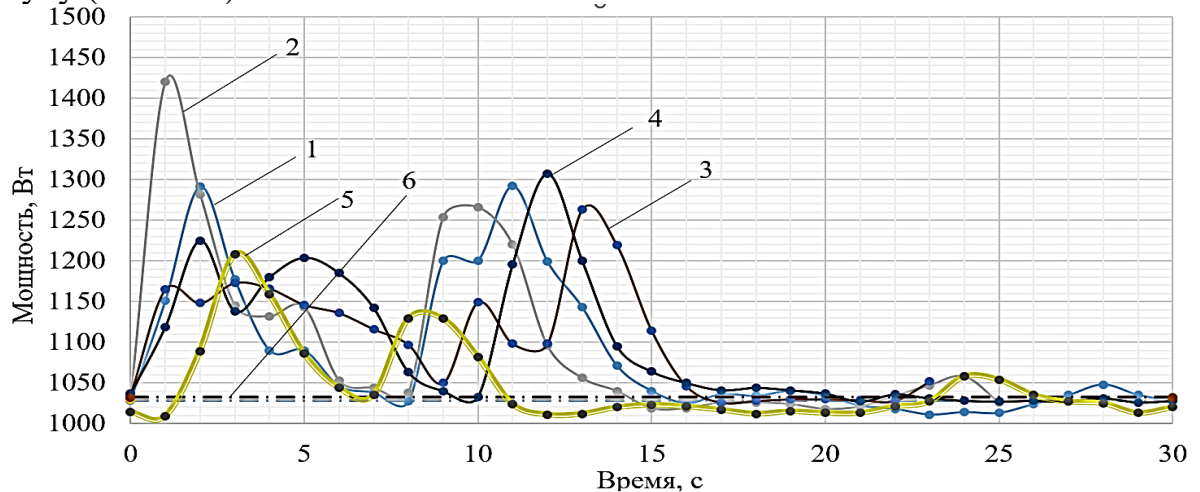


Рисунок 3 – Оценка мощности электродвигателя дисковой мельницы при размоле различных пород древесины: 1, 2, 3, 4, 5 – бук, дуб, лиственница, ольха, сосна соответственно; 6 – мощность холостого хода

Наименьшие показатели соответствовали сосне, пик мощности которой пришелся на 1208 Вт, мощность холостого хода при этом находилась на уровне 1030 Вт. При расчёте удельных затрат энергии было взято среднее значение двух пиков мощности, соответствующих продолжительности размола в 15 секунд. Также для оценки удельных энергетических была определена производительность мельницы, которая рассчитывалась исходя из массы размолотой древесины в единицу времени. Согласно расчетам производительность мельницы составила приблизительно 9 кг/ч. После чего определялись удельные затраты энергии в кВт·ч/кг для исследуемых пород древесины. Общие удельные затраты энергии умножались на число циклов. В результате строились экспериментальные зависимости удельных затрат энергии от размеров частиц, определенных ранее по кривым распределения (за размер взята медиана распределения в мкм) (рисунок 4).

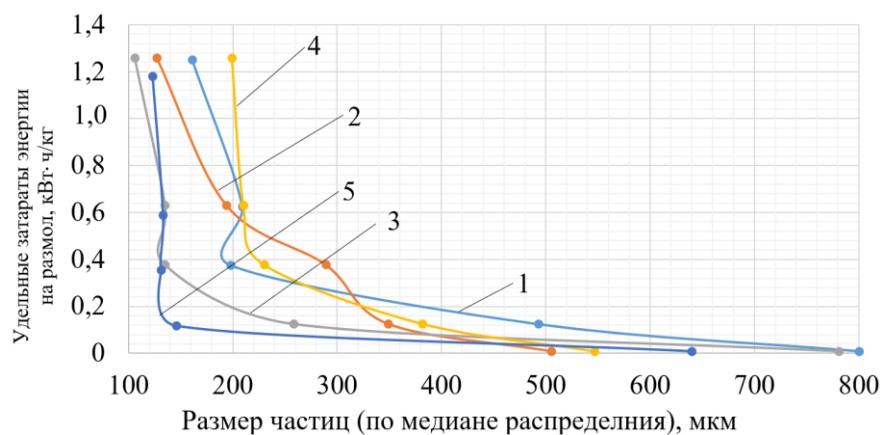


Рисунок 4 – Зависимость удельных затрат энергии на размол различных пород древесины от размеров частиц: 1 – бук; 2 – дуб; 3 – лиственница; 4 – ольха, 5 – сосна

Из рисунка 4 видно, что сосна после первого же цикла, который соответствует 0,118 кВт·ч/кг, размалывается до размеров частиц 130 мкм. Дальнейшее уменьшение размеров частиц до 120 мкм связано с десятикратным увеличением удельных затрат энергии. Таким образом, можно утверждать, что древесина сосны может быть размолота за один цикл работы мельницы, что будет соответствовать удельным затратам энергии 0,118 кВт·ч/кг; для лиственницы размол до 135 мкм приходится на уровне 0,378 кВт·ч/кг. Остальные виды древесины размалываются до необходимого диапазона (до 200 мкм) при расходе удельной энергии в 1,26 кВт·ч/кг, что соответствует 10 циклам размолта в дисковой мельнице.

Таким образом, график показывает, что наиболее предпочтительным является древесина сосны, так как на размол древесины требуется гораздо меньше удельной энергии, чем на остальные виды пород древесины. Для разработки практических рекомендаций по оценке затрат энергии на размол с целью получения необходимого размера частиц можно предложить зависимости, полученные на основе экспериментальных данных, представленных на рисунке 4. Регрессионный анализ зависимостей удельных затрат энергии (E , кВт·ч/кг) от размеров частиц древесины (δ , мкм), представленных на рисунке 4, даёт возможность определить, к какому виду относится уравнение. Коэффициенты в уравнениях определены для конкретного случая, лабораторного размолта в дисковой мельнице для частиц древесины, влажность которых находится в равновесии в определённом помещении. Однако представленные ниже уравнения позволили установить и сравнить, к каким видам зависимостей относятся при размолке различные породы древесины. Подобный метод разработки зависимостей можно применить к промышленным мельницам. Разумеется, коэффициенты в уравнениях зависимостей между размером частиц и удельными затратами энергии для промышленных и лабораторных мельниц будут различны, но переход от плавного к резкому увеличению удельных энергетических затрат энергии может быть зафиксирован в лабораторных условиях.

Для условий подготовки древесины в сравнительно небольших объёмах, соответствующих потребностям аддитивных технологий на сегодняшний день, доля энергозатрат на размол, общие расходы на рыночную цену

древесины, транспортные расходы, трудозатраты и т.д. может быть существенна, чем вызван интерес предприятий-производителей и поставщиков мельниц. В данном конкретном случае инициатива шла от компании ООО «ДробТехМаш», отечественного производителя мельниц, что подтверждает практическую значимость работы.

Сканирующая электронная микроскопия после размола различных пород древесины позволила установить, что волокна сосны являются наиболее предпочтительными для аддитивной технологии. Полученная информация по результатам исследования размола и анализа частиц древесины с помощью сканирующей электронной микроскопии позволили рекомендовать частицы сосны для дальнейшего смешивания с жидким синтетическим полимером с целью получения композита для послойного формования изделий. При 3D-печати важно контролировать реологические свойства древесно-полимерного композита в жидком виде (рисунок 5).

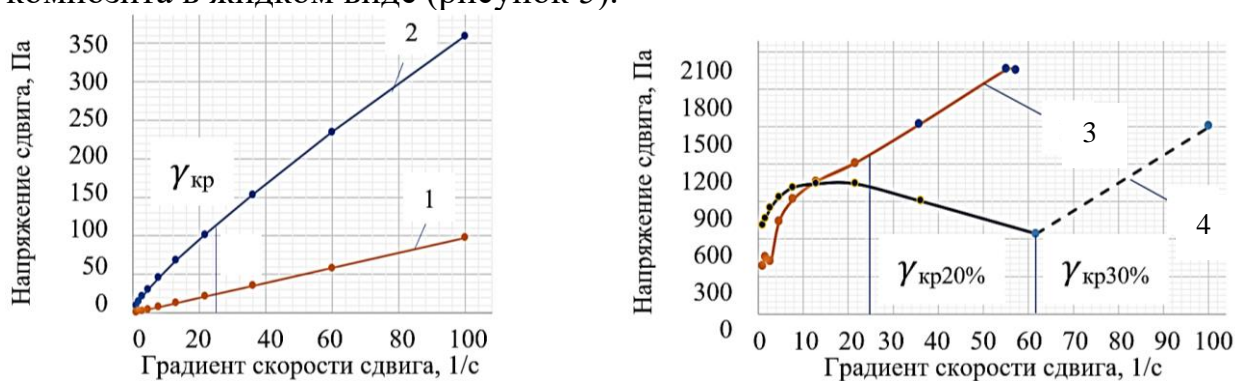


Рисунок 5 – Реологические характеристики композита на основе древесной муки из сосны и эпоксидной смолы с отвердителем: 1 – без древесной муки; 2 – при содержании древесной муки 10 %; 3 – древесной муки 20 %; 4 – древесной муки 30%

По полученным данным можно заключить, что в рабочих диапазонах послойного нанесения полимера в районе 20 °С существует возможность подачи композита через сопла экструдера при концентрации 20 %. При концентрации древесной муки до 30 % исследуемый древесно-полимерный композит на основе эпоксидной смолы с отвердителем обладает ярко выраженной неньютоновской составляющей. Кроме того, жидкий древесно-полимерный композиционный материал при содержании частиц сосны 20 % имеет предел текучести. Установленные точки перехода жидкости от неньютоновского течения к ньютоновскому позволяют организовать эффективную работу подающего устройства 3D-принтера, оценить режимы печати для технологии послойного нанесения полимера в жидком виде (для заполнения) в сочетании с экструзией полимерного прутка из пластика (для создания контура изделия), рассчитать требуемые размеры каналов для подачи смеси. Для подачи жидкого полимера со связующим рекомендовано повысить температуру до 40 °С для жидкого древесно-полимерного композита с концентрацией более 30 %. Сложностей с подачей композита на основе эпоксидной смолы и отвердителя при концентрации до 20 % древесной муки при температуре 20 °С нет. На основании проведённых экспериментальных исследований было разработано и запатентовано устройство для 3D-принтера

для изготовления изделий из композиционных материалов. С помощью разработанного устройства из древесно-полимерного композита в жидком виде были изготовлены образцы, которые затем были испытаны.

Термомеханические свойства образцов представлены на рисунке 6, по которым была установлена взаимосвязь между модулем накопления и температурой для древесно-полимерного композита, содержащего древесную муку. Модуль накопления уменьшался в диапазоне от 20 до 70 °С.

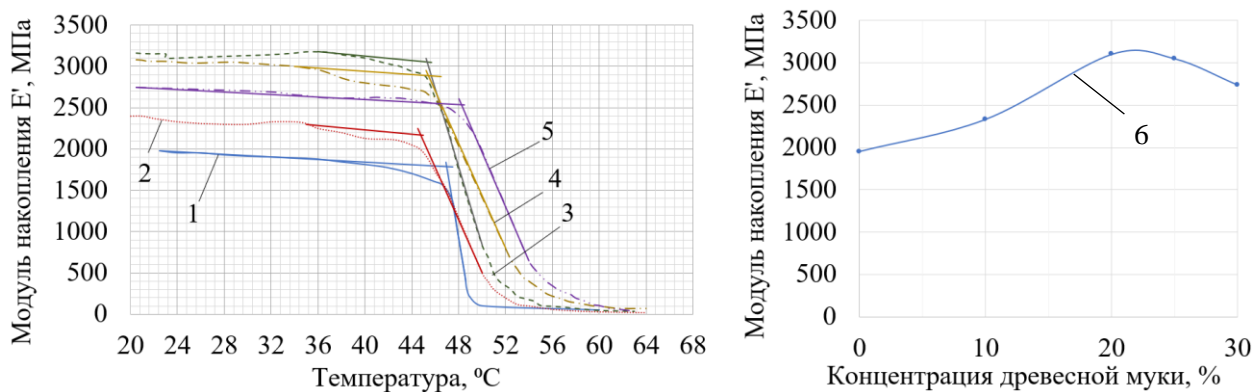


Рисунок 6 – Термомеханические кривые исследуемого композита: 1 – содержание древесной муки 0 %; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 25 %; 5 – 30 %; 6 – зависимость модуля накопления от содержания древесной муки в композиционном материале при 24 °С

Из рисунка 6 видно, что разница между модулем накопления при изгибе и различными содержаниями древесной муки в композиционном материале существенно отличаются. Например, разница между модулем накопления при 0 и 20–25 % составляет более 1000 МПа при температурах, соответствующих диапазону от 44 до 49 °С. Модуль накопления при изгибе стал резко снижаться во всём исследуемом диапазоне содержания древесной муки. Были зафиксированы границы перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное: для композита без содержания древесной муки температура перехода составила 46,9 °С; при 10 % – 44,6 °С; при 20 % – 45,3 °С; при 25 % – 45,9 °С; при 30 % – 48,3 °С. Плато высокоэластичного состояния исследуемого древесно-полимерного композита находилось в диапазоне температур примерно до 60 °С, после этого, вне зависимости от содержания древесной муки, полимер переходил в вязкотекучее состояние. При высоких концентрациях древесной муки (свыше 30 %) возникает возможность контакта частиц наполнителя между собой. Как правило, в этом случае свойства материала меняются скачкообразно, что служит критерием, ограничивающим содержание древесной муки. Подобная тенденция была отмечена для некоторых механических характеристик полимера на основе древесной муки и смолы при изготовлении изделий с помощью 3D-печати по технологии стериолитографии. В ранее проведённых работах зафиксировали низкие показатели механических свойств при 0 и 10 % древесной муки, а при 3 % наблюдалось максимальное значение механических свойств. Такая тенденция проглядывается в некоторых случаях использования эпоксидных смол и двухкомпонентных полиуретановых пластиков. Из графиков, представленных на рисунке 7, видно, что двухкомпонентный полиуретановый пластик

«Ерохітах» и при 30 и 40 % содержания древесной муки имеет схожий механизм удаления влаги.

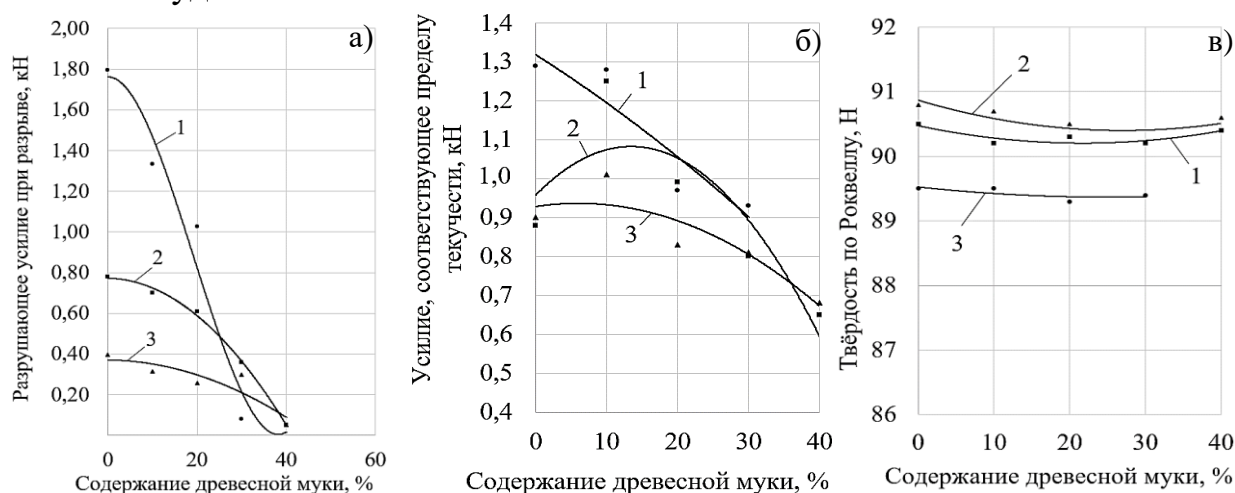


Рисунок 7 – Результаты оценки предельного усилия при разрыве (а) и предел текучести при сжатии (б) и твёрдость (в) образцов, с различным содержанием древесной муки в композиционном материале: 1 – двухкомпонентный пластик «Real Cast М6»; 2 – эпоксидная смола «Арт-Массив» и специальный отвердитель; 3 – двухкомпонентный пластик «Ерохітах»

Так же, как и для варианта «Real Cast» для этих кривых характерны периоды постоянной и падающей скоростей сушки, следовательно, влага проникла глубоко в поры материала (рисунок 8).

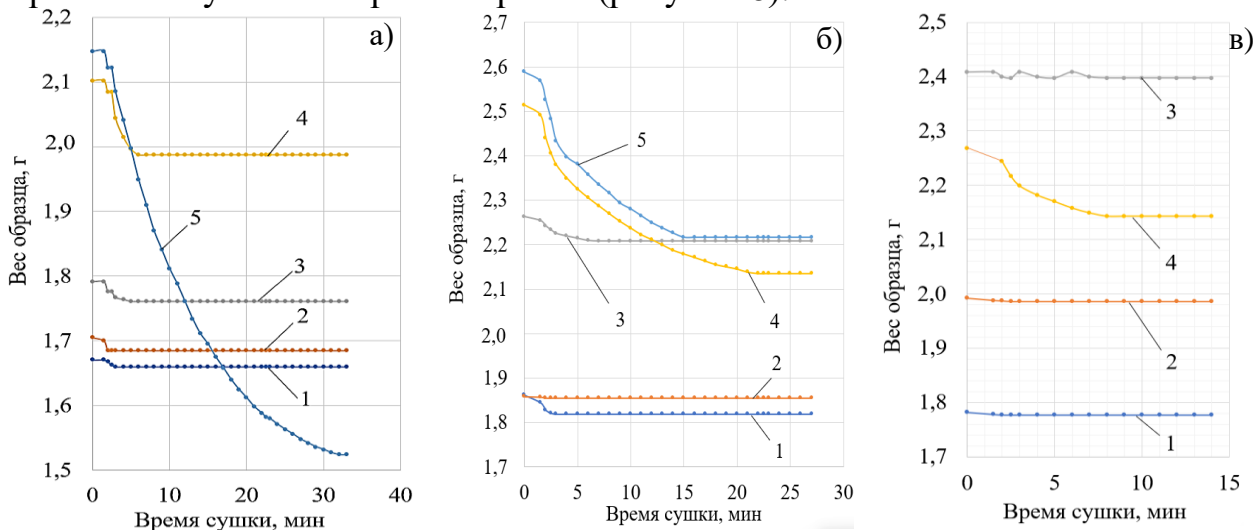
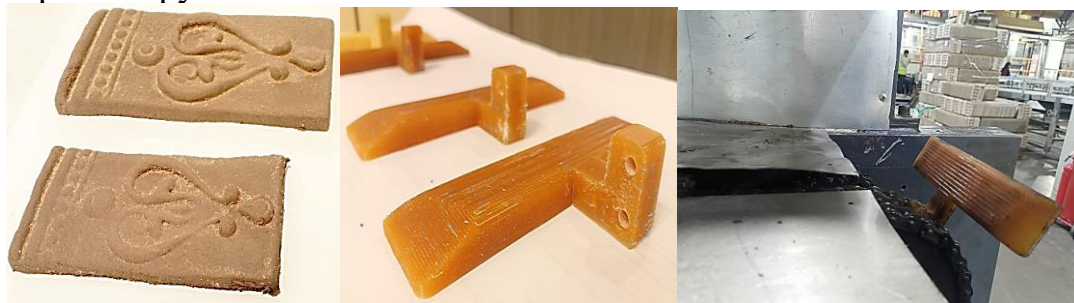


Рисунок 8 – Кривые сушки для композита, содержащего частицы древесины и двухкомпонентный полиуретановый пластик Real Cast(а), Ерохітах(б) и эпоксидную смолу с отвердителем(в): 1–0 % древесной муки; 2–10 %; 3–20 %; 4–30 %; 5–40 %

Эпоксидная смола с отвердителем оказалась более устойчивой к воздействию влаги при 30 % (см. рисунок 8). Практически отсутствовала влага внутри образца при 20 % концентрации эпоксидной смолы в материале. Небольшой период постоянной и падающей скоростей сушки свидетельствует о том, что влага неглубоко проникла в образец при 30 % содержания древесной муки. Из проведённого анализа кривых сушек и механических характеристик образцов можно сделать вывод, что содержание 30 % связующих рекомендуется с точки зрения составления композиции для 3D-печати синтетическим полимерным связующими и древесной мукой.

В четвёртой главе разработаны практические рекомендации и устройство для послойного формования изделий из композиционного материала на основе частиц древесины и многокомпонентного связующего путем экструзии жидкой смеси, совместно с экструзией водорастворимого полимерного прутка.



а) Рисунок 9 – Готовые изделия, б) полученные нанесением жидкого древесно-полимерного композита с формированием контура из пластика: а – декоративное изделие для мебели; б – лопатка конвейера после изготовления из древесно-полимерного композита двухэкструдерным 3D-принтером; в – изготовленная из древесно-полимерного композита лопатка, работающая на линии по производству литой тары из макулатуры

По результатам работы по технологии комбинированной LDM и FDM 3D-печати были изготовлены образцы декоративных изделий для мебели (рисунок 9,а), а также конструктивный элемент оборудования для производства бугорчатых прокладок для яиц, а именно, лопатки конвейера на предприятии ООО «Эко Пекеджинг Интернешнл Компани», которое располагается в Ленинградской области (рисунок 9,б,в). Таким образом, подтверждена практическая значимость проведённых теоретических и экспериментальных исследований. Разработанное двухэкструдерное устройство, работающее по комбинированной технологии LDM и FDM 3D-печати, показало работоспособность.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработана технология подготовки композита на основе древесины для послойного формования изделий методом экструзии жидкого полимера и водорастворимого полимерного прутка.

1. Оценены энергетические затраты на размол древесины различных пород с учётом требуемого размера частиц, в диапазоне до 200 мкм для последующего послойного формования изделий в композиции с двухкомпонентным связующим.

2. На основании экспериментальных исследований определён оптимальный состав многокомпонентного связующего с допустимым содержанием частиц древесины, соответствующим высоким эксплуатационным характеристикам образцов.

3. Исследован композиционный материал на основе древесины и полимерного связующего, в частности, получены реологические характеристики, термомеханические свойства изделий из композиционного материала.

4. Разработаны практические рекомендации и устройство для послойного

формования изделий из композиционного материала на основе частиц древесины и многокомпонентного связующего путем экструзии жидкой смеси, совместно с экструзией водорастворимого полимерного прутка.

По результатам работы по технологии комбинированной LDM и FDM 3D-печати были изготовлены образцы декоративных изделий для мебели, а также конструктивный элемент оборудования для производства бугорчатых прокладок для яиц, а именно, лопатки конвейера на предприятии ООО «Эко Пекеджинг Интернешнл Компани», которое располагается в Лен. области.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

1. Evdokimov, N.V. Biorefining of Wood-Fibre Raw Material in a Material Composition for Additive Technologies / N.V. Evdokimov, N.P. Midukov, V.S. Kurov // *Fiber Chemistry*. – 2023. – No. 1. – P. 66 – 72.

2. Evdokimov, N.V. Microstructure of Fibers in a Feedstock Composition for Use in Additive Technologies / N.V. Evdokimov, N.P. Midukov., V.S. Kurov, M.V. Staricin, S.N. Petrov // *Fiber Chemistry*. – 2022. – No. 3. – Vol. 54. – P. 181–184.

Патенты

3. Пат. № 220692 РФ Устройство для 3D-принтера для изготовления изделий из композиционных материалов / Евдокимов Н.В., Мидуков Н.П., Ефремов Т.И., Куров В.С., Литвинов М.А.; опубл. 28.09.2023, Бюл. № 28. 8 с.

4. Пат. №111663U1 РФ Пикнометр / Сафонов Ю.К., Евдокимов Н.В.; опубл. 20.01.2011. Бюл. № 35. 2 с.

Прочие публикации

5. Евдокимов, Н.В. Оценка возможности использования древесных отходов в аддитивных технологиях / Н.В. Евдокимов, А.Н. Кеутаева // *Вестник СПбГУПТД. Серия 4. Промышленные технологии*. –2022. – № 1. – С. 103–110.

6. Евдокимов, Н.В. Определение параметров получения формованных изделий из древесных отходов / Н.В. Евдокимов, Н.П. Мидуков // *матер. междунар. науч.-практ. конф. «Pap-For» СПбГУПТД*. – СПб., 2022. – С. 43-44.

7. Евдокимов, Н.В. Определение показателей эффективной переработки древесных отходов / Н.В. Евдокимов, Н.П. Мидуков // *матер. XVI междунар. конф «БИОС-ФОРУМ» СПбГУПТД ВШТЭ*. – 2021. – С. 131-133.

8. Евдокимов, Н.В. Разработка технологии брикетирования древесных отходов с использованием связующей композиции на основе механоактивированного гидролизного лигнина / Н.В. Евдокимов, А.В. Александров // *Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика: сб. докл. и сообщ.* – Воронеж: ВГЛТА. – 2014. – С. 65–67.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, адреса электронной почты, наименования организации, должности лица, составившего отзыв, подписанные и заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095 г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных,4.