

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»

*На правах рукописи*

**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»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Мидуков Николай Петрович

Санкт-Петербург – 2023

## Оглавление

Введение .....	5
1 Аналитический обзор литературы .....	12
1.1 Характеристики муки из различных пород древесины, используемой на деревообрабатывающих и целлюлозно-бумажных предприятиях .....	12
1.2 Особенности размола древесины для получения древесно-полимерных композиционных материалов .....	16
1.3 Критический анализ исследований по оценке реологических характеристик древесно-полимерных композитов в жидком виде .....	23
1.4 Термомеханические характеристики изделий, полученных на основе древесно-полимерных композитов .....	27
1.5 Анализ существующих технологий послойного нанесения древесно-полимерных композитов .....	32
1.6 Обзор конструкций экструдеров для послойного формирования изделий на основе жидких древесно-полимерных композитов .....	37
1.7 Выводы по литературному обзору и постановка цели, задач исследований .....	43
2 Материалы и методы исследований .....	45
2.1 Материалы для экспериментальных исследований .....	45
2.1.1 Частицы древесины различных пород .....	45
2.1.2 Двухкомпонентные связующие .....	45
2.2 Оборудование для проведения экспериментальных исследований ..	46
2.2.1 Лабораторная мельница для размола древесины .....	46
2.2.2 Прибор для оценки мощности на размол древесины .....	47
2.2.3 Анализатор влажности Sartorius M-45 .....	48
2.2.4 Пикнометр .....	48
2.2.5 Анализатор частиц «Mastersizer 2000» .....	50
2.2.6 Сканирующий электронный микроскоп Teskan Mira LMH .....	51
2.2.7 Оборудование для послойного нанесения композита на основе древесины комбинацией методов LDM и FDM печати .....	51
2.2.8 Двухэкструдерное устройство для нанесения композиционного материала .....	54
2.2.9 Оборудование для оценки реологических характеристик жидкого композита на основе древесины .....	59
2.2.10 Оборудование для исследования термомеханических свойств композита на основе древесины .....	60

2.2.11 Лабораторный стенд для оценки сопротивления разрыву и сжатию .....	60
2.2.12 Прибор для оценки твёрдости по Роквеллу.....	61
2.3 Методы проведения экспериментальных исследований .....	61
2.3.1 Метод оценки гранулометрического анализа древесины различных пород с помощью анализатора частиц .....	61
2.3.2 Методы оценки размеров частиц древесины с помощью обработки микроскопических изображений в программе ImageJ .....	62
2.3.3 Методика оценки плотности сыпучих частиц древесины .....	70
2.3.4 Методика оценки реологических характеристик жидкого композита на основе древесины и связующего .....	71
2.3.5 Методика исследования термомеханических характеристик композита на основе древесины .....	73
2.3.6 Метод послойного нанесения композита на основе древесины комбинацией технологии LDM и FDM 3D-печати.....	74
2.3.7 Методика оценки сопротивления разрыву и сжатию образцов, полученных из композита на основе древесины и связующего.....	80
2.3.8 Методика оценки твёрдости поверхности по Роквеллу .....	81
2.3.9 Методика оценки удаления влаги из композиционного материала на основе древесины .....	81
2.4 Планирование экспериментальных исследований .....	83
3 Экспериментальные исследования по подготовке древесно-полимерной композиции для послойного нанесения .....	86
3.1 Экспериментальные исследования по оценке удельных энергетических затрат на размол древесины различных пород с определённым размером частиц .....	86
3.2 Определение морфологических характеристик компонентов древесины различных пород с помощью анализатора частиц, электронной и сканирующей микроскопии .....	100
3.3 Исследование реологических характеристик древесно-полимерного композита в жидком виде .....	108
3.4 Исследование термомеханических характеристик композиционных материалов на основе древесины .....	116
3.5 Исследование механических характеристик деталей, полученных по комбинированной технологии LDM и FDM 3D-печати из древесно-полимерного композита .....	121
3.5.1 Влияние различных связующих и содержания древесной муки в композиции на сопротивление разрыву опытных образцов .....	121

3.5.2 Влияние различных связующих и содержания древесной муки на сопротивление раздавливанию опытных образцов .....	124
3.6 Исследование твёрдости поверхности деталей, полученных комбинацией LDM и FDM технологий 3D-печати из древесно-полимерного композита .....	128
3.7 Исследование водопоглощения изделий из древесно-полимерного композита .....	131
4 Практическое использование предлагаемой комбинированной технологии LDM и FDM 3D-печати древесно-полимерным композитом .....	138
4.1 Изготовление декоративного изделия для мебели из композита, содержащего частицы древесины .....	138
4.2 Создание цифровых копий объектов с помощью 3D-сканера с дальнейшим изготовлением декоративного изделия для мебели из композита, содержащего древесную муку .....	141
4.3 Экономическая эффективность использования предлагаемой технологии 3D-печати .....	143
4.4 Изготовление деталей оборудования для производства литой тары из макулатуры .....	145
Заключение и выводы .....	148
Библиографический список .....	151
Приложение 1 .....	168
Приложение 2 .....	169
Приложение 3 .....	170

## Введение

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, 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, 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 является также актуальной.

Варианты использования опилок, образованных на предприятиях целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности

Варианты использования отходов древесины в ЦБП и деревообработке	Цена, руб./т	Решение задачи
В качестве опилок	500	утилизация отходов
Получение древесной муки марок 180 и 200	16 500	утилизация отходов
В составе композита для строительной 3D-печати	35 000	утилизация отходов, производство полуфабриката с высокой стоимостью
В составе композита для печати декоративных изделий и конструктивных элементов, в том числе для оборудования ЦБП с помощью 3D-принтера	3 000 000	производство полуфабриката с высокой стоимостью

В 2018 году Правительством РФ 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. Поэтому поиск новых применений волокнистых материалов из древесных отходов является актуальной задачей практически для каждого предприятия целлюлозно-бумажной промышленности. Согласно данным таблицы использование древесины в высокотехнологичных и наукоёмких производствах в меньшей степени решает проблему утилизации отходов, но позволяет производить полуфабрикат с высокой стоимостью.

Одним из наиболее перспективных и быстроразвивающихся способов переработки волокнистых отходов 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 утилизации 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 придется на энергетические затраты, связанные с размолотом опилок до древесной муки марок 180 и 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 связующего.

Таким образом, **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.** Не встречается в источниках сравнение 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.

Новизной обладают 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, представляющими собой сырьё для послойного формования по технологии экструзии жидкой смеси 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 (Патент №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 смеси (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.). В 2021 г. Реализован проект «Повышение эффективности подготовки отходов из различных видов древесины для последующей переработки» при поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства СПб.

**Публикации.** Опубликовано 8 печатных работ по теме диссертации, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ по специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины» (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.

**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.

## **1 Аналитический обзор литературы**

### **1.1 Характеристики муки из различных пород древесины, используемой на деревообрабатывающих и целлюлозно-бумажных предприятиях**

В целлюлозно-бумажной промышленности образуются значительные объемы древесных отходов, которые могут быть ценным сырьем для различных отраслей промышленности, в том числе для аддитивных технологий.

Наиболее удачное использование дерева в 3D-печати на сегодняшний день — это материал «Wood» от «Fiber Force» (компания по производству волокнистого пластика). Несмотря на свое название, из которого следует, что в составе он содержит волокна, в нем есть пигмент, создающий ощущение волокон в конечном изделии. Полимерный пруток, содержащий древесную муку, компания поставляет на рынок. В нашей стране, похожий пруток, содержащий древесину, была исследована в Санкт-Петербургском государственном лесотехническом университете им. С.М. Кирова в 2020 году [1, 2]. Из всех основных технологий 3D-печати, доступных на сегодняшний день, метод «Binder Jetting» (послойное нанесение порошка со связующим) является, на наш взгляд, наиболее подходящим для использования древесной муки в чистом виде. Однако стоит отметить, что технология «Binder Jetting» часто используется в сочетании с другими технологиями, такими как «SLA» (стереолитография) или «SLM» (лазерное спекание порошков). Ещё одним способом 3D-печати, который можно потенциально рассматривать с точки зрения частичного использования древесины, является технология послойного формования жидкого полимера «LDM». Для эффективного использования древесных отходов необходимо решить ряд научно-технических задач, связанных в первую очередь с размером частиц древесины. Необходимо сравнить гранулометрический состав наиболее часто используемых в целлюлозно-бумажной промышленности пород древесины, образующихся в результате приготовления технологической щепы. В качестве сырья для

получения целлюлозы используется технологическая щепка, которая вырабатывается на древесно-подготовительных участках предприятий целлюлозно-бумажной промышленности.

В процессе подготовки и производства технологической щепки из древесины образуются различные фракции, в том числе крупная фракция (1 – 3 %) элементов толщиной до 15 мм и длиной 100 мм, толстая фракция (10 – 30 %), состоящая из щепки толщиной 7 – 10 мм, кондиционной фракции, состоящей из нормальной и мелкой щепки, и фракции опилок (2,0 – 5,0 %), содержащей мелко рубленую древесину. Однако опилки не подходят для волокнистых полуфабрикатов. Опилки и древесная пыль, проходящие через сито с размером ячеек 5 мм (российский стандарт) или сито 3 мм (скандинавский стандарт), увеличивают расход химикатов и энергии при варке из-за высокого растворения древесной части. Наличие опилок в составе щепки также приводит к повышенной засоренности и смолистости целлюлозы, износу оборудования, увеличению нагрузки на очистные сооружения.

Для улучшения качества щепки перед переработкой ее подвергают сортированию. Сортирование щепки сводится к выравниванию размеров древесных частиц путем удаления крупной, толстой и опилочной фракций. Сортирование щепки осуществляется на сортировках. С точки зрения аддитивных технологий, интересны 2 % опилок, которые образованы в ходе подготовки щепки, технология которой представлена на рисунке 1.1 [5]. Особый интерес представляют древесная пыль, которая оседает в воздушных фильтрах при производстве щепки.

Использование опилок или древесной муки предполагает контроль за размерами частиц и насыпной плотностью. Для оценки насыпной плотности, которая является одним из основных физических параметров для опилок и древесной муки, для которых можно найти широкое применение в лабораторной практике химической, бумажной и других отраслях промышленности используются пикнометры.

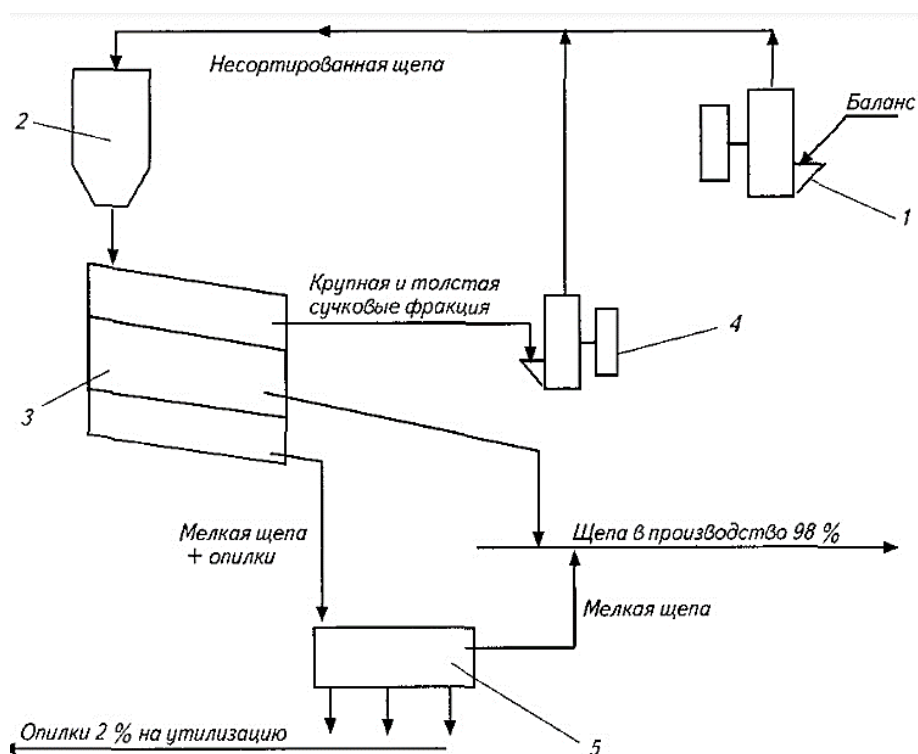


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема приготовления технологической щепы (используется ситовая сортировка с измененными размерами отверстий у сит и одна валковая сортировка): 1 – рубительная машина; 2 – циклон; 3 – ситовая сортировка; 4 – дезинтегратор для рубки крупной и толстой фракций щепы; 5 – валковая сортировка для отделения кондиционной щепы от опилок [5]

Известно устройство для измерения плотности сыпучих материалов [6], состоящее из мерной воронки, расположенной над переходящим в воронку цилиндром, снабженным наклонными пластинами для усреднения пробы материала, который засыпают в приемный сосуд определенного объема. В данном устройстве используется весовой метод определения плотности сыпучих материалов. Недостатком устройства является зависимость количества насыпанного в приемный сосуд материала от высоты расположения мерной воронки и цилиндра, переходящего в воронку. Изменяя высоту этих элементов, меняется степень уплотнения материала в приемном сосуде и соответственно меняется его плотность.

Известен пикнометр для определения плотности твердых и сыпучих материалов [7], состоящий из стеклянного сосуда специальной формы. Недостатком этого пикнометра является невозможность определения

плотности легких материалов с плотностью  $\rho < 1 \text{ г/см}^3$ , всплывающих в жидкости.

Известен пикнометр для жидкостей [8], выбранный в качестве прототипа при разработке прибора для оценки насыпной плотности, представляющий собой стеклянный сосуд специальной формы: нижняя часть которого выполнена сферической, соединенная с вертикальной цилиндрической трубкой, на которой расположена кольцевая горизонтальная метка. Наличие метки на вертикальной трубке позволяет точно фиксировать определенный объем жидкости. Измерение плотности основано на взвешивании находящейся в пикнометре определенного объема жидкости, заполняющей его до кольцевой цилиндрической метки на вертикальной цилиндрической трубке. Данный пикнометр позволяет определять известным методом плотность сыпучих материалов, плотность которых  $\rho > 1 \text{ г/см}^3$ , т.е. плотность твердых материалов, которые тонут в жидкости. Недостатком этого пикнометра является невозможность определения плотности сыпучих материалов, плотность которых  $\rho < 1 \text{ г/см}^3$ , поскольку такие материалы плавают на поверхности жидкости, искажая тем самым объем заполнения пикнометра. Примером таких материалов являются опилки, древесная мука, стружка, древесный уголь, гранулы полиэтилена и др.

Кроме насыпной плотности, необходимы данные гранулометрического анализа опилок и древесной муки, которые позволят сопоставить распределение частиц древесины по размерам с сыпучими материалами, использующимися в аддитивных технологиях. Анализ размеров частиц можно провести с помощью специальных импортных анализаторов либо с помощью оптической микроскопии и бесплатных программ для оценки размеров по изображениям.

Наиболее полным визуальным анализом геометрических форм частиц различных видов древесины, который позволит прогнозировать качество материала для 3D-печати, является сканирующая электронная микроскопия.

В целом комплекс испытаний по оценке вышеперечисленных показателей позволит оценить возможность использования древесины в качестве сырья для аддитивных технологий.

## **1.2 Особенности размола древесины для получения древесно-полимерных композиционных материалов**

Древесина является природным материалом, в состав которого входят целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин, экстрактивные вещества. В зависимости от породы, возраста дерева, времени года и места произрастания компонентный состав может быть разным. Её свойства, такие как плотность, влажность и другие влияют на прочностные характеристики и на энергопотребление оборудования в процессе измельчения.

Благодаря своему широкому распространению, возобновлению и многократному применению в различных отраслях промышленности, древесина является востребованным лигноцеллюлозным сырьем и широко используется в качестве сырья для производства упаковки, бумаги, картона, строительных материалов, топлива, а также для изготовления мебели.

Начиная с лесозаготовки и на разных этапах производства продукции из древесины, образуются большие объёмы стружки, горбыля, реек, обрезков досок, опилок, древесной пыли и пр. Всё перечисленное, так или иначе, может быть переработано. Стружка, опилки, ветки кроны могут быть применены для производства древесно-плитных материалов. Мелкие опилки и древесная пыль, помимо устоявшихся отраслей применения, таких как совместное сжигание с углем и производство биотоплива, могут быть использованы в составе с древесно-пластиковыми композитами, для получения которых измельчение древесины в порошок или тонкое измельчение древесины является важным этапом предварительной обработки [9–11]. Из-за прочной природы древесной матрицы измельчение является энергоёмким процессом и для повышения экономичности может потребоваться предварительная термическая или химическая обработка [12].



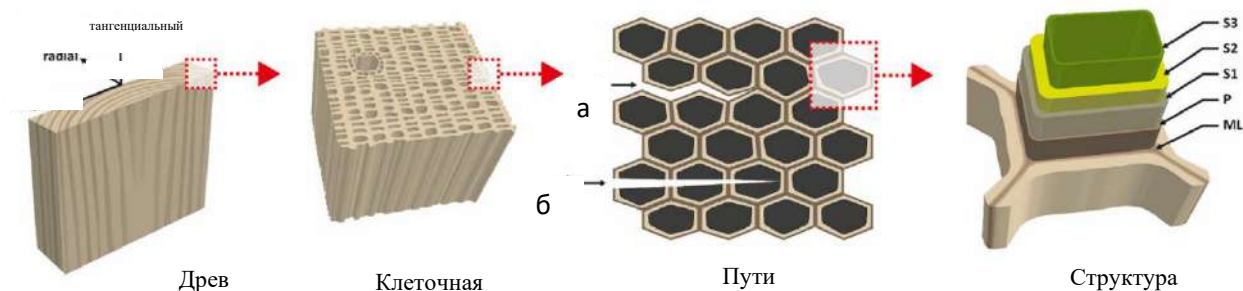


Рисунок 1.2 – Клеточная структура древесины и отдельного волокна, разрыв которого может быть представлен: а – распространение трещины за счет разделения клеток (межклеточный/ межстеночный разрыв); б – распространение трещины путем разрыва клетки (внутриклеточный/сквозной разрыв)

Несмотря на то, что плотность материала клетки древесины любой породы равна  $1530 \text{ кг/м}^3$ , каждый имеет свою уникальную клеточную структуру. Внутри одной породы могут наблюдаться изменения клеточной структуры (длины волокон) в зависимости от условий произрастания дерева [13–15]. Таким образом, на энергетические затраты в процессе размола влияют исходные размеры и форма частиц древесины, её природа, место произрастания, влажность материала, а также используемое размалывающее оборудование.

Как правило, объектом исследования является порода древесины, которая произрастает в том регионе, где она исследуется. Американские учёные (Майнский университет) представили результаты размола древесины белого кедра, сосны, пихты и красного клёна, растущих в Северной Америке [16, 17]. В работах [16, 17] ими были показаны расчёты по снижению энергетических затрат на транспортировку древесины за счёт измельчения и прессования. Одним из основных методов исследования древесной муки являлась сканирующая электронная микроскопия, позволившая объяснить причины повышения насыпной плотности (с  $190 - 220$  до  $700 - 750 \text{ кг/м}^3$ ), которая определялась особенностями в микроструктуре частиц из кедра, сосны, пихты, клёна (ширина частиц, жёсткость, количество мелких,

поломанных частиц, слоистость, схожесть с трубчатой структурой, наличие пучков волокон и т.д.).

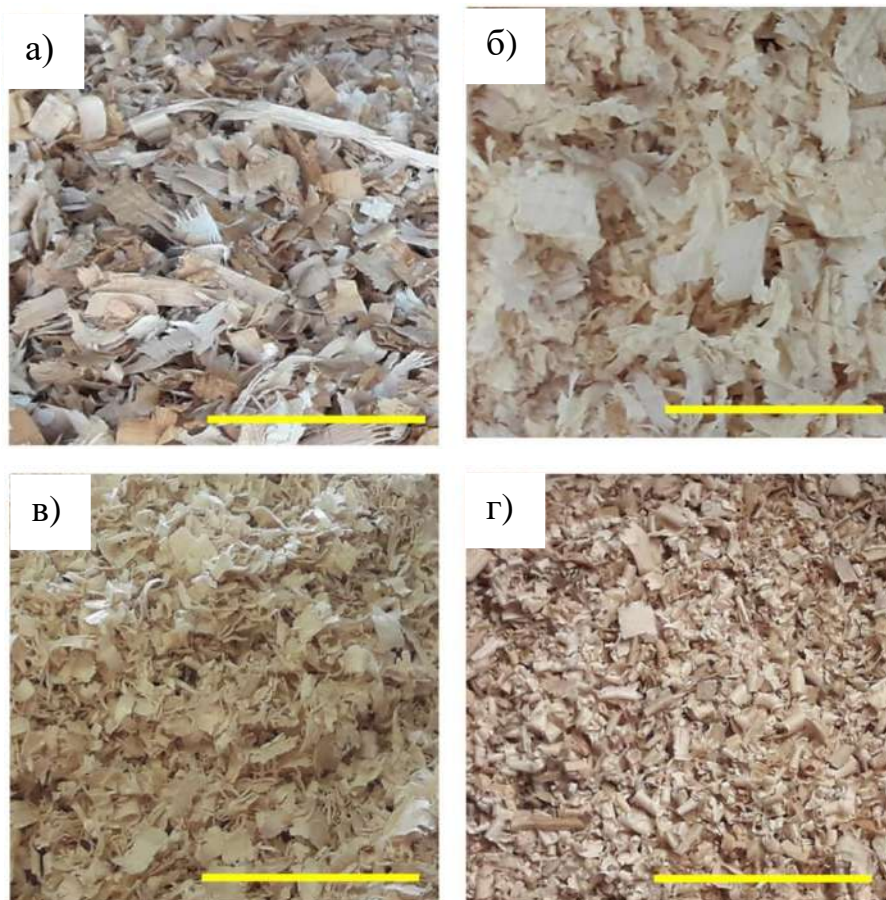


Рисунок 1.3 – Опилки: а – белого кедра; б – белой сосны; в – ели обыкновенной; г – красного клена [16]

Сканирующая электронная (СЭМ) или оптическая микроскопия часто используются для оценки формы частиц древесной муки (рисунок 1.4). В основном они объясняют влияние формы частиц на насыпную плотность, на свойства композита на основе частиц древесины [18, 19]. Оптическая микроскопия древесной муки с использованием графических программ, как правило, используется в качестве доступного метода, в отличие от дорогой сканирующей электронной микроскопии. Однако с помощью сканирующей электронной микроскопии, обладающей большим разрешением, можно детальнее оценить геометрию частиц. В основном работы по исследованию древесной муки посвящены конкретным породам древесины [20–22].

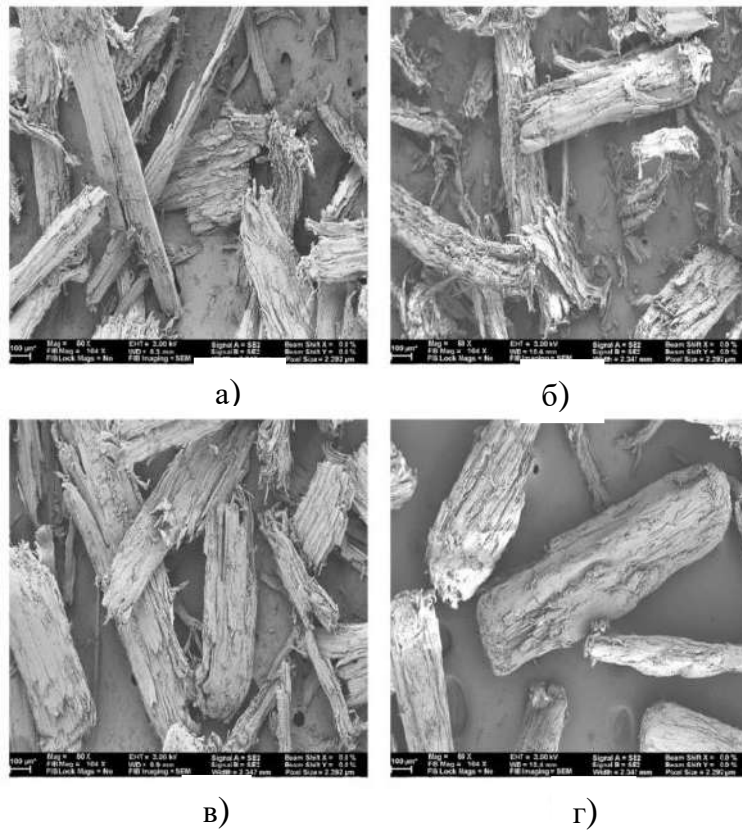


Рисунок 1.4 – СЭМ изображения древесной муки: а – кедр, затор 40; б – сосна, затор 40; в – ель обыкновенная, затор 40; г – клен, затор 40

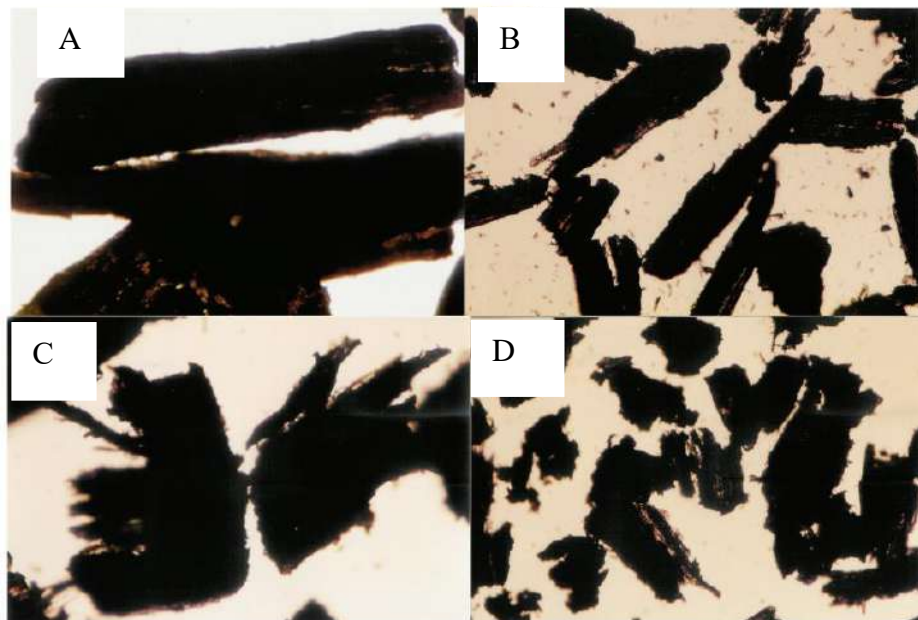


Рисунок 1.5 – Микроснимки различных древесных частиц; А – измельченная окорка, затор 20; В – измельченная окорка, затор 60; С – опилки, затор 20; D – опилки, затор 60

В большинстве случаев удельные энергозатраты на размол древесины находятся в экспоненциальной зависимости от размера получаемых частиц. Известно, что измельчение твёрдых частиц древесины в молотковых дробилках можно описать законом Риттингена от 1867 года [23, 24]. Этот закон справедлив и для измельчителей строительных смесей [23]. В работе [23] предлагалась мельница, которая эффективно работала до определённой степени измельчения. Дальнейшая работа устройства была не эффективной по причине очень высоких затрат энергии. Такая тенденция снижения эффективности размола характерна для большинства размалывающих машин. Однако конструкция мельницы во многом определяет эффективность размола на разных стадиях измельчения, которых может быть несколько.

В работе [24] представлены результаты оценки удельных затрат энергии на размол древесины сосны и пихты, растущей в Северной Америке, при двухстадийном измельчении: сначала в мельнице ударного типа, в которой измельчение происходит до размеров частиц в диапазоне 316 – 1618 мкм, а затем в молотковой дробилке до размеров 35 – 250 мкм.

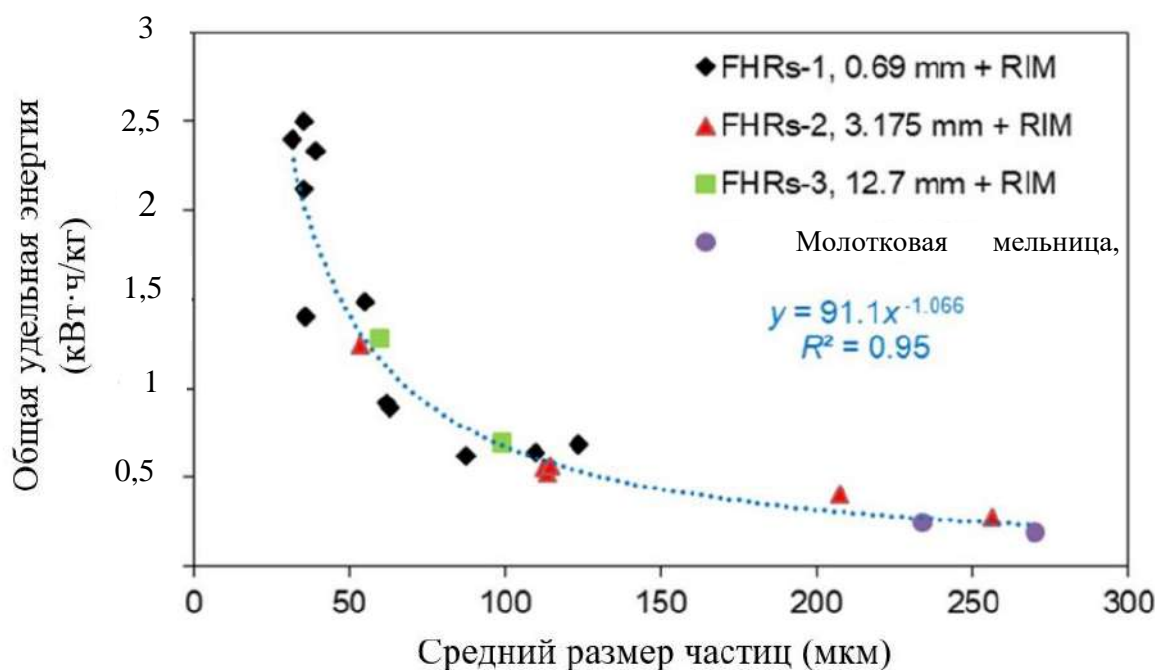


Рисунок 1.6 – Общий удельный расход энергии на двухстадийное измельчение со средним конечным размером продукта. РУМ (роторная ударная мельница)

Авторы установили, что затраты энергии резко возрастают при размоле до мелкой фракции. Несмотря на типичный экспоненциальный характер изменения энергии при размоле древесины, количественный показатель в большей степени будет определяться размалывающим оборудованием (рисунок 1.6).

Из графика видно, что в целом вне зависимости от типа мельницы затраты энергии резко возрастают при размоле до мелкой фракции. Оценить, с какого момента резко возрастают удельные энергетические затраты для конкретного случая, является важной задачей с точки зрения энергоэффективности процесса размола в каждом конкретном случае.

Несмотря на типовой характер изменения энергии при размоле древесины, количественный показатель в большей степени будет определяться типом размалывающего оборудования.

Известны способы размола древесины в ножевых, дисковых, вибрационных, истирающих, сдавливающих аппаратах. Ножевые размалывающие (рубительные) машины нашли широкое применение при измельчении древесины до крупных размеров частиц, например, при производстве щепы либо при измельчении веток, стружек, реек.

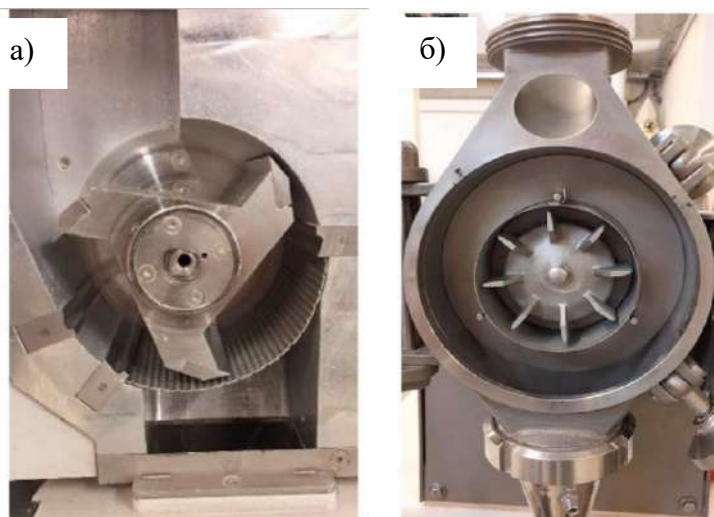


Рисунок 1.7 – Используемые устройства мельниц: а – ножевая мельница; б – ударная мельница (УМ)

В таких аппаратах осуществляется грубое предварительное измельчение. Для производства древесной муки широкое распространение получили мельницы ударного типа [24].

Дисковые мельницы нашли широкое применение при мокром размоле древесины, так как при сухом размоле за счёт сил трения большое количество энергии переходит в тепловую, что приводит к возгоранию частиц древесины. Однако этот способ размола показал очень высокую эффективность.

Теория процесса размола целлюлозных материалов в дисковых мельницах была изучена В.Н. Гончаровым. В его работах подробно оценивается каждый из факторов (механическое, ударное, пульсационное, кавитационное, воздействие жидкостного трения), определяющих в целом энергетическую составляющую процесса размола. Представлены подробные методики расчёта размалывающих машин для различных видов волокнистых суспензий [25]. В работах Ю.Д. Алашкевича мокрый размол представляет собой способ измельчения древесины с последующим удалением части лигнина [26, 27].

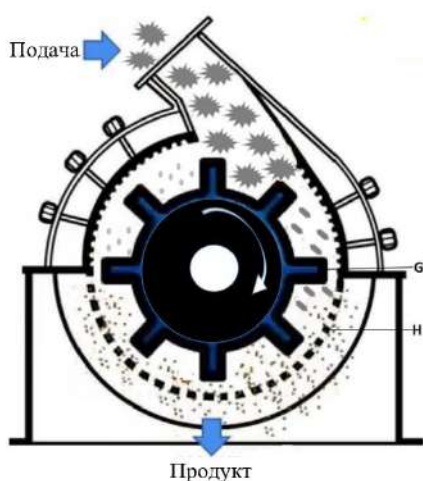


Рисунок 1.8 – Схема молотковой мельницы

Самой распространённой мельницей для получения древесной муки в больших объёмах является молотковая, схема которой представлена на рисунке 1.8. Измельчители типа роллов встречаются как при мокром, так и при сухом способах размола древесины (щепы и опилки). Но наиболее мелкая фракция частиц древесины может быть получена в шаровых мельницах, которые подразделяются на вращающиеся с перемешиванием и вибрационные [28]. При небольших объёмах размалываемой древесины (подготовка древесной муки для композита, применяемого в 3D-печати) может быть использована дисковая мельница, которая эффективнее чем молотковая.

Однако экспериментальных данных по оценке удельных затрат энергии в дисковой мельнице при размоле без увлажнения нет.

Таким образом, можно отметить, что исследований в области влияния удельных энергетических затрат при размоле на размеры частиц древесины, а также определение диапазона, при котором затраты энергии резко повышаются с небольшим уменьшением размеров частиц древесины Северо-Западного региона нашей страны нет. Поэтому необходимо решить задачи, связанные с подготовкой доступной и недорогой для отечественных предприятий методики оценки размеров частиц при размоле, оценке удельных затрат энергии при размоле различных пород древесины, определение зависимостей удельных затрат энергии от размеров частиц древесины.

Важно отметить, что размеры частиц древесины оказывают влияние на свойства полимерных композитов на основе древесной муки [29–32]. Значимость подготовки древесины в небольших объемах для аддитивных технологий заключается в соотношении энергетических затрат на измельчение по сравнению с другими затратами, такими как транспортные и трудовые затраты. Это привлекло внимание производителей и поставщиков мельниц, в том числе отечественной компании ООО «ДробТехМаш», которая подчеркивает практическую значимость данной работы.

### **1.3 Критический анализ исследований по оценке реологических характеристик древесно-полимерных композитов в жидком виде**

Объектом исследования является древесно-полимерный композиционный материал в жидком виде на основе частиц древесины сосны и эпоксидной смолы с отвердителем. Исследуемый композиционный материал большей частью относится к текучим системам в диапазоне концентраций древесины от 0 до 30 % в зависимости от температуры и вида полимера. За последние несколько лет большой интерес к таким композиционным материалам возрос в связи с их применением в аддитивных технологиях. Актуальной задачей в этом контексте является определение реологических

характеристик многокомпонентного полимера с различным содержанием древесной муки, так как она определяет конструкцию экструдеров и режимы 3D-печати. Реологическая характеристика представляет собой зависимость напряжения сдвига от скорости деформации [33, 34].

Древесина является сложным полимером, в составе которого преобладает целлюлоза и лигнин. При высоких температурах и наличии пластификатора (воды) состав композиционного материала с частицами древесины становится текучим, обладающим особыми реологическими свойствами. В работах [35,36] отмечено, что при повышении температуры, превышающей температуру стеклования лигнина, происходит переход в вязкотекучее состояние полимера, который обладает реологическими характеристиками, схожими с псевдопластичной системой, при этом отчетливо наблюдаются точки перехода от эффективной вязкости к наименьшей ньютоновской вязкости. В опытно-промышленных условиях авторами работы [36] было установлено, что при увеличении скорости сдвига происходит значительное уменьшение нагрузки на двигатель экструдера, что свидетельствует о снижении эффективной вязкости. После достижения некоторого значения скорости сдвига дальнейшее ее увеличение уже не изменяет эффективную вязкость и при этом достигается наименьшая ньютоновская вязкость.

В опытно-промышленных условиях было установлено, что при увеличении скорости сдвига происходит значительное уменьшение нагрузки на двигатель экструдера. Это свидетельствует о снижении эффективной вязкости (см. рисунок 1.9 , область II); после достижения некоторого значения скорости сдвига дальнейшее ее увеличение (см. рисунок 1.9, область III,) уже не изменяет эффективную вязкость — достигается наименьшая ньютоновская вязкость —  $\eta = \infty$  (или  $\tau$  мин).



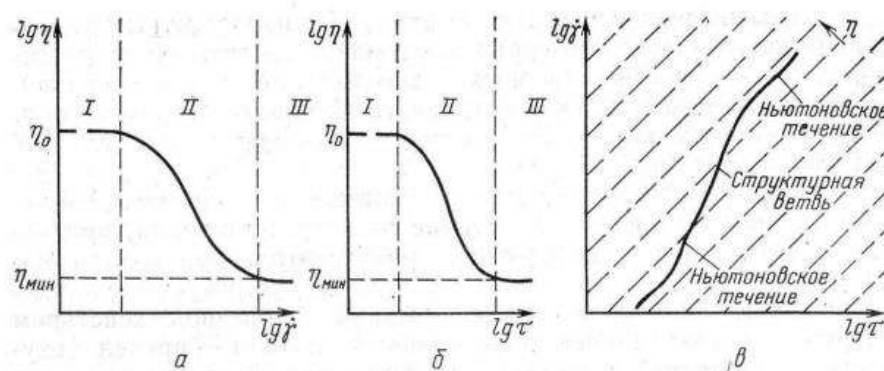


Рисунок 1.9 – Различные способы графического изображения вязкостных свойств неньютоновских жидкостей: а –  $\lg \eta = f_1(\lg \dot{\gamma})$ ; б –  $\lg \eta = f_2(\lg \tau)$ ; в –  $\lg \dot{\gamma} = f_3(\lg \tau)$

Лигнин является природным компонентом, который связывает целлюлозные волокна. Кроме него, в качестве связующего в композите используются синтетические полимеры, которые придают особые свойства волокнистым композиционным материалам на основе древесины. В работах [13–15] было рассмотрено влияние карбамидоформальдегидной, меламиноформальдегидной, фенолформальдегидной смол на свойства композиционных материалов при производстве древесных плит. Также были представлены результаты использования связующих на основе изоцианатов и различных химических добавок. В этих же работах [13–15] представлены данные о механизмах смачивания древесных частиц связующими, которые являются основополагающими для формирования изделий с определенными свойствами.

Известно, что целлюлозный материал существенно влияет на реологические характеристики системы даже при небольших изменениях концентрации. Например, повышение концентрации волокнистой суспензии до 5 % (лигнин при этом в полимере практически отсутствует) вызывает существенные аномалии в реологических характеристиках. В работах [37–39] представлены реологические характеристики при различных концентрациях бумажной массы. На этих кривых отчетливо видны точки перехода волокнистой суспензии из структурированного в диспергированный режим. Однако в данных работах предполагается, что целлюлозные волокна

изначально находятся в пластифицирующей среде (воде). С точки зрения послойного нанесения полимера, в котором содержатся частицы древесины и связующие, необходимо четко определиться с температурами. В частности, в работах [3, 4] подробно были рассмотрены результаты исследований реологических характеристик композиционного материала на основе частиц древесины и полилактида. Диапазон концентраций древесной муки, который был исследован в работе, не превышал 40 %, что согласуется с данными зарубежных исследователей. Анализируя рассмотренные работы, можно утверждать, что выше концентрации древесной муки 40 %, текучесть композита невозможна, то есть композиционный материал перейдет в твердое состояние, что исключает его движение в каналах экструдеров и сопел 3D-принтеров.

В тиксотропной среде, когда полимер меняет агрегатное состояние, в некоторых случаях нет необходимости повышать температуру. В данном случае необходимо исследовать влияние времени на изменение свойств полимера. Авторы работы [3, 4] представили реологические характеристики древесно-полимерного композита на основе полилактида в диапазоне температур 180 – 240 °С при послойном нанесении. При этом точка перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное происходит при высоких температурах (в экструдере 3D-принтера), а после снижения температуры (после нанесения полимера на рабочий стол 3D-принтера) полимер вновь приобретает стеклообразное состояние. Необходимы реологические характеристики композиционного материала, содержащего древесные частицы с полимером в рабочем диапазоне температуры от 20 — 60 °С. Чаще всего температура экструдера 3D-принтера, работающего в строительстве по технологии жидкого послойного формования - технологии LDM, не превышает 40 °С.

Важной задачей является определение реологических характеристик тиксотропного древесно-полимерного композита в диапазонах невысоких температур. Известно, что время полной кристаллизации полимера,

содержащего древесину и эпоксидную смолу с отвердителем, занимает 5 суток. В течение 10 часов реологические характеристики этой среды практически не меняются, поэтому тиксотропность в исследованиях можно не учитывать. Это как раз то время, которое необходимо для изготовления изделий методом послойного нанесения жидким композиционным материалом с использованием контура из водорастворимого полимера (поливинилового спирта) [39–51].

Знание реологических характеристик позволит определить режимы печати для технологии послойного нанесения полимера в жидком виде (для заполнения) в сочетании с экструзией полимерного прутка (для создания контура изделия).

#### **1.4 Термомеханические характеристики изделий, полученных на основе древесно-полимерных композитов**

Целлюлозные волокна являются основным компонентом древесины, которая нашла широкое применение в различных отраслях промышленности. Для придания особых свойств целлюлозные волокна смешиваются с синтетическим полимерным – связующим [52]. Свойства композиционного материала зависят во многом от содержания частиц древесины и их размеров, от свойств связующего, от конструкции формирующего устройства [53–55]. Если в качестве связующего используется реактопласт, то характеристики многокомпонентного связующего зависят от скорости реакции поликонденсации. Одним из основных показателей, позволяющих оценить возможность применения композиционного материала в 3D-печати изделий, являются термомеханические свойства многокомпонентного композита. Поэтому рассмотрение влияния содержания древесной муки на термомеханические свойства композиционного материала из древесной муки и синтетического полимерного связующего, представляющего собой реактопласт, является важной задачей при оценке его применимости в 3D-печати.

Термомеханический анализ позволяет определить температуры перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное и в вязкотекучее. Фундаментальные основы по исследованию природных и синтетических полимеров различных видов представлены в работах Тагер А.А., Акима Э.Л., которые позволяют правильно классифицировать и охарактеризовать свойства получаемых материалов на основе древесины и связующих [33, 56 – 58]. Информация о фазовых и релаксационных переходах полимерных компонентов композиционных материалов может быть получена с использованием широкой гаммы методов, рассмотренных как в общих монографиях по полимерам и композитам [33, 55 – 60], так и в специальных монографиях, например, Б.П. Ерыхова по неразрушающим методам [61]. Такая информация даёт возможность определить необходимые температурные, скоростные режимы 3D-печати, а также во многом определяет конструкцию формирующего устройства.

В работах Говядина И.К. и Чубинского А.Н. температурный режим послойного нанесения термопластиком был установлен с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии [3,4]. В работе [3] авторами были определены температуры релаксационных и фазовых переходов композиционных материалов на основе древесной муки и полилактида, что позволило создать установку для получения полимерного прутка для 3D-печати [1, 2] и формовать декоративные элементы мебели.

Современные разработчики приборов (рекомендуются в нормативных документах, ГОСТах) [33, 55 – 66] для оценки термомеханических свойств полимеров при выборе метода предлагают четыре основных способа, которые позволяют зафиксировать фазовые переходы: 1 – DSC (дифференциальная сканирующая калориметрия); 2 – TGA (термогравиметрический анализ); 3 – TMA (термомеханический анализ); 4 – DMA (динамический и механический анализы) [62–66]. Для оценки релаксационных (физических) переходов (стеклование и размягчения), можно использовать динамический

механический анализ (DSK). Разработчики DSK прибора представили данные исследования полистирола при разных режимах измерений (рисунок 1.10).

Как известно, температура стеклования представляет собой среднюю температуру области перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое (и наоборот). Сама область перехода может составлять от 5 °С до 20–30 °С и ее ширина очень зависит от скорости нагревания и охлаждения и от скорости механического нагружения.

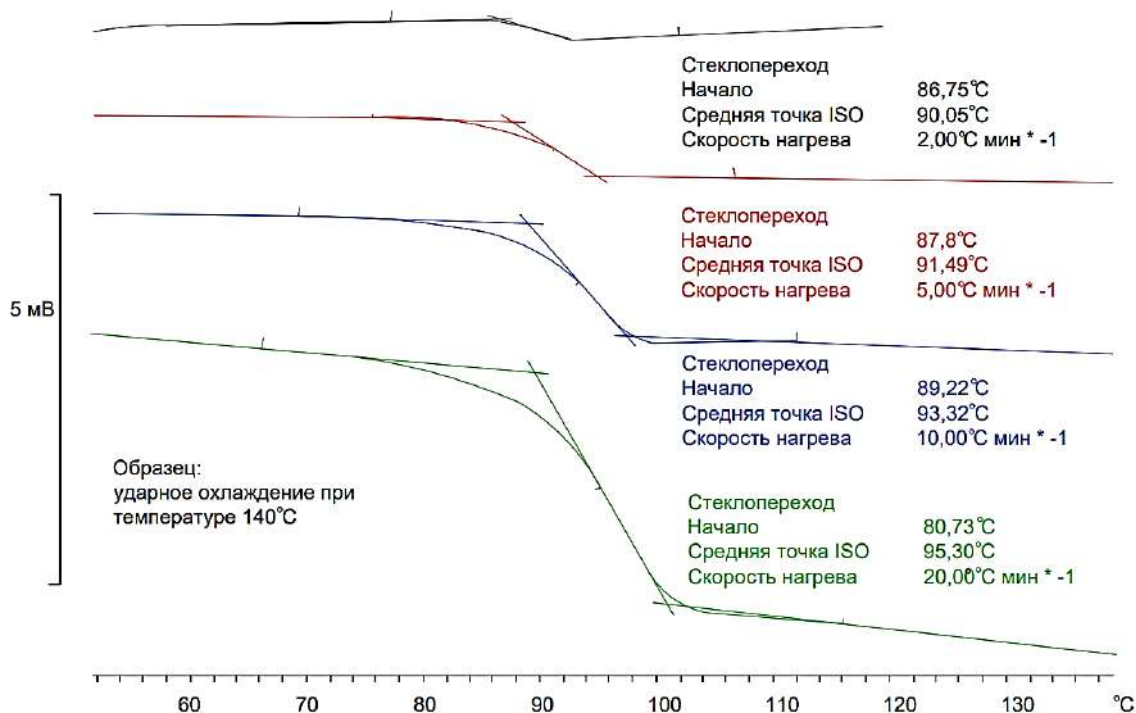


Рисунок 1.10 – Результаты динамического механического анализа полистирола при различных режимах измерений

С увеличением скорости нагрева средняя точка стеклования смещается в область более высоких температур. На рисунке 1.10 показаны кривые стеклования полистирола при четырех различных скоростях нагрева. Отношение сигнала к шуму увеличивается с повышением температуры. Образцы композиционного материала должны быть исследованы при одинаковых условиях.

В работе [67] представлены данные DMA композиционного материала на основе древесной муки и метакриловой смолы. Авторы зафиксировали

снижение температуры стеклования при повышении содержания древесной муки.

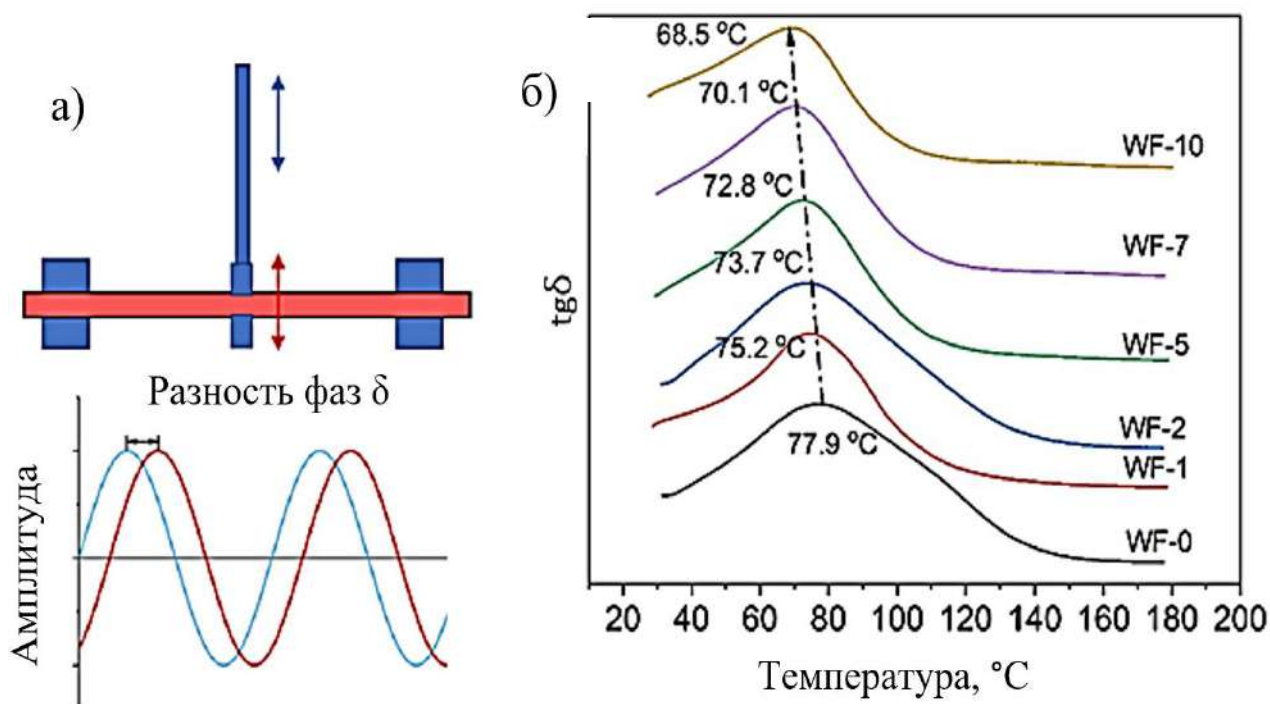


Рисунок 1.11 – Результаты исследования ДМА композиционного материала на основе древесной муки и метакриловой смолы: а – схема нагружения; б – результаты измерений; WF-полимер с различным содержанием древесной муки

Результаты исследования имеют практическое значения для 3D-печати, основанной на стереолитографии. Авторы решили задачу повышения определённых свойств изделий путём добавления нескольких процентов древесной муки в смолу. Однако очевидно, что при высоком содержании древесной муки необходима другая технология послойного нанесения (3D-печати).

Высокое содержание древесной муки (свыше 30 %) в композиционном материале было достигнуто авторами при использовании в качестве связующего полиэтилен высокой плотности. Ими установлено влияние размеров частиц на термомеханические свойства получаемых изделий (рисунок 1.12).

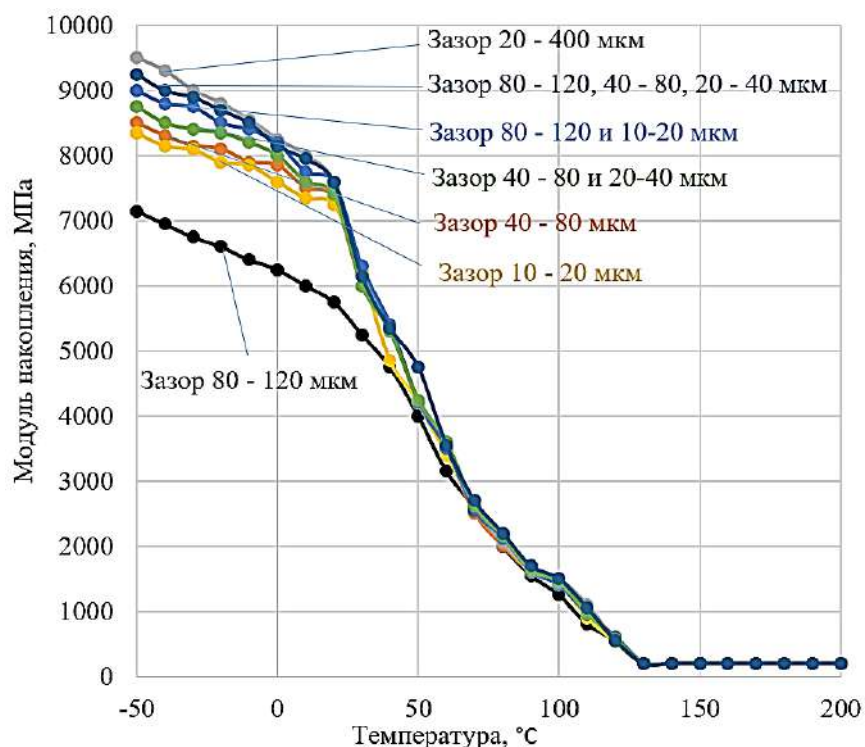


Рисунок 1.12 – Результаты динамического механического анализа композиционного материала с различным размером частиц

Температура фазового перехода исследуемого композита была  $50 \pm 5$  °C. Большим размерам частиц (120 мкм) соответствует более низкая температура стеклования [67]. Помимо полиэтилена высокой плотности, также были изучены смеси из полипропилена с модифицирующими добавками [68].

Анализ литературных данных показывает, что DMA является распространённым способом, позволяющим измерить термомеханические характеристики полимеров, содержащих частицы древесины и различные связующие. Однако следует отметить отсутствие данных термомеханических свойств реактопластов на основе эпоксидной смолы с высоким содержанием древесной муки. В работах, посвящённых 3D-печати по технологии LDM, термомеханическим свойствам внимание не уделяется, несмотря на интересные результаты использования частиц древесины со связующими [69–73]. Поэтому целью данного исследования является оценка термомеханических свойств на основе дифференциального механического анализа образцов, полученных послойным нанесением композиционного материала из древесной муки и многокомпонентного связующего на основе модифицированной эпоксидной смолы и отвердителя.

С учетом широкого использования системы «эпоксидная смола - отвердитель» в машиностроении, автору представлялось целесообразным также рассмотреть возможность и перспективность использования методов 3D-печати для изготовления не только декоративных изделий, но и конструктивных элементов, например, для ЦБП.

### **1.5 Анализ существующих технологий послойного нанесения древесно-полимерных композитов**

Частицы древесины имеют определенные характеристики, которые затрудняют их использование для 3D-печати. Изучив доступные методы 3D-печати и возможность использования подготовленной древесной муки, можно адаптировать её в качестве сырья. Рассматривая опилки как мелко измельченный порошок, можно применить их в различных технологиях 3D-печати.

Из порошкового материала в аддитивных технологиях печатают по методу спекания лазером. Эта технология получила названия SLM. При печати по технологии SLM используются порошки из различных металлов. Детали, напечатанные этим способом, получаются прочные. Авторы Австралийского технологического университета (Swinburne) в своих работах представили результаты исследования сопротивления на разрыв, сжатие, модуля упругости образцов, напечатанных из различных порошков [74]. Практическое использование технологии SLM представлено в работе учёных Лондонского королевского колледжа, результатом работы которых стал действующий пешеходный мост [75]. Известно, что параметры 3D-печати (толщина слоя, скорость его нанесения, коэффициент заполнения детали материалом) оказывают существенное влияние на механические свойства изделий, которые в свою очередь можно оценить, исследовав микроструктуру изготовленной с помощью 3D-принтера детали. Оценка микроструктуры и её описание при 3D-печати по технологии SLM была подробно изложена в совместной работе учёных из Англии, Финляндии и Канады [76]. Изделия,



полученные по технологии SLM, могут иметь сложную форму и при этом быть прочными. Однако адаптировать частицы древесины к технологии SLM сложно, так как спекание прочных металлических порошков осуществляется при температуре выше 500 °С, а температура самовоспламенения древесины составляет 330 °С. Древесина – биологический материал, который сгорает при температурах, создаваемых лазерными 3D-принтерами.

Несмотря на биологическое происхождение древесины, её пока сложно рассматривать в качестве сырья для 3D-биопечати. Главным образом, технология 3D-биопечати привлекает тем, что решает очень важные для человечества задачи. 3D-биопечать позволяет создавать костные (твёрдые), мышечные и кожные (мягкие) ткани человека. В качестве материалов для печати используются биочернила (модифицированные стволовые клетки, желатин, белковые соединения, жировые клетки и др.). При совместной работе Гарвардского университета и Лондонского королевского колледжа реализованы проекты, которые позволили сократить время реабилитации пациентов после сложной хирургической операции, проведённой с участием 3D-принтеров [77, 78]. Одним из наиболее передовых разработок является создание сердца подопытной крысы, которое было распечатано на 3D-принтере в Тель-Авивском университете [79]. Капиллярная структура органов, которая необходима для формирования кровеносной системы, создаётся с помощью поддержки, которая печатается из льда в замороженном состоянии. Не исключено, что древесина как волокнистый материал в определённых вариантах будет рассматриваться для 3D-биопечати, однако для этого она должна быть модифицирована и специально подготовлена.

Порошкообразные материалы в аддитивных технологиях также нашли применение при реализации технологии 3D-печати Binder Jetting. Материалом для 3D-принтеров, работающих по технологии Binder Jetting, являются гипсополимерные частицы, металлические и полимерные порошки [80, 81]. Древесные отходы при измельчении теоретически могли бы стать альтернативой перечисленным материалам, однако следует отметить, что

морфологические характеристики древесной муки сильно отличаются от частиц гипса, имеющих более правильную скруглённую форму. Особое внимание при печати необходимо уделить нанесению связующего состава. Важно отметить, что при нанесении связующего состава возможно образование дефектов (непроецируемых областей). Главными недостатками технологии Binder Jetting являются низкие показатели механических характеристик изделий, поэтому эта технология 3D-печати нашла применение в создании макетов, высоких требований прочности к которым нет. Для повышения прочности деталей технологию Binder Jetting иногда комбинируют с технологией SLA, где в качестве связующего используется фотополимерная смола. Но технология стереолитографии SLA неприменима при использовании в качестве сырья опилок (более 10 %) и объясняется это тем, что процесс перехода в твёрдое состояние жидкой фотополимерной смолы осуществляется за счёт ультрафиолетового излучения [82–84]. Поэтому для равномерного перехода из жидкого состояния в твёрдое материал для 3D-печати должен быть однородным и без содержания частиц с высокой оптической плотностью, которой обладают частицы древесины в сравнении со смолой. Частицы с высокой оптической плотностью также окажут негативное влияние на пост обработку ультрафиолетом, которая имеет важное значение для прочности при 3D-печати по технологии SLA [85]. Важно отметить, что механические свойства при печати по технологии SLA зависят от расположения детали относительно рабочего стола во время её печати [86–88], поэтому при неправильном расположении может возникнуть суммарное негативное воздействие от использования твёрдых частиц и неправильного расположения изготавливаемых изделий, что приведёт к большому снижению прочности.

Перечисленные выше способы 3D-печати имеют важный недостаток, заключающийся в дороговизне, за исключением SLA печати, которую сложно адаптировать для использования древесины. Для изготовления декоративных изделий для мебели и конструктивных элементов оборудования ЦБП 3D-

принтер должен быть недорогим и доступным. Наиболее доступная и распространённая в мире технология 3D-печати осуществляется экструзией полимерного прутка (FDM) [88]. Прочность деталей зависит от вида материала и параметров 3D-печати. Широкий обзор по прочностным характеристикам деталей, полученных экструзионной печатью из различных видов материалов, представили учёные Массейского университета (Новая Зеландия) [89]. Причины большого разброса в прочности изделий при разных параметрах 3D-печати заключаются в различном расположении слоёв, которое прослеживается в микроструктуре. Электронная микроскопия позволяет ответить на многие вопросы, которые возникают при снижении прочности образцов [90–92].

Древесный материал при экструзии используется широко в строительной промышленности. Содержание древесины в строительных смесях может достигать 40 %, при этом физико-механические характеристики древесно-волокнистых плит определяются свойствами связующего и волокна [93]. В качестве древесины часто используют сосну, так как длина её волокон достигает 3,5 мм, что позволяет получить более прочный материал. Исследованная канадскими учёными технология экструзии древесного пластика позволила использовать волокна древесины в строительном 3D-принтере, диаметр сопла которого превышает 10 мм. Для принтеров, работающих по FDM технологии со стандартным размером экструдеров для прутков диаметром 1,75 и 2,85 мм, такой способ не подходит, так как частицы древесины будут забивать сопло. Для таких 3D-принтеров необходимо измельчать древесину до мелкой фракции и чётко контролировать морфологические характеристики частиц.

На рынке доступных материалов для 3D-печати встречается «древесные пластики» FiberWood или «eSun» Wood, которые лишь имитируют цвет древесины, либо существует пластик, в составе которого мелкоизмельчённый порошок из древесины, содержание которого очень мало в композиции. Поэтому полимерный прутки, содержащий древесную муку при

концентрациях волокон, сопоставимых с концентрацией в древесно-волоконистых плитах (до 40 %), не может быть использована при 3D-печати по технологии FDM.

Ещё одним вариантом использования древесины является применение их в виде смеси (композиционного материала). Технология нанесения смеси, например шоколада, глины, цементного раствора известна в аддитивных технологиях как LDM-печать (послойное формование жидкого полимера) [94, 95]. Исследователями Дрезденского технического университета в качестве связующего для смеси, содержащей древесную муку, использована метилцеллюлоза с водой, подробно были представлены механические характеристики образцов [94, 95]. При подготовке перед разрушением образцы были нарезаны ножом, так как контур поверхности деталей без обрезки имел большую шероховатость, связанную с нанесением слоя через экструдер с диаметром сопла в 8 мм. Американские исследователи Майнинского университета лаборатории лесных технологий и продуктов представили широкий обзор использования пасты, содержащей опилки с различными связующими, также были представлены физико-механические испытания образцов, полученных на их основе. Однако проблема использования сопла больших размеров, с одной стороны, предполагает внедрение технологии LDM в строительство, с другой стороны, поверхность изделий требует серьёзной обработки [95].

Таким образом, среди существующих технологий 3D-печати можно выделить FDM и LDM, которые наиболее близко подходят для использования древесины. Однако небольшой диаметр сопла экструдеров и сложность изготовления полимерного прутка не позволяют использовать технологию FDM, а технология LDM связана с низкой точностью изготовления, что вызвано применением сопел большого диаметра. Поэтому разработка новой технологии 3D-печати, при которой можно было бы использовать древесную муку в композиции до 30 % с высокой точностью изготовления, является одной из задач настоящего исследования. Для этого необходимо исследовать

морфологические характеристики и микроструктуру частиц древесины различной природы, изготовить образцы по предлагаемой технологии и проверить их прочность при различных связующих и при разном содержании древесной муки в композиции материала. Для реализации работы по использованию древесно-полимерного композита в аддитивной технологии, необходимо разработать устройство для его подачи.

### **1.6 Обзор конструкций экструдеров для послойного формирования изделий на основе жидких древесно-полимерных композитов**

Согласно проведённому выше критическому анализу существующих технологий 3D-печати наиболее подходящими являются технологии FDM и LDM, которые при грамотной комбинации смогли бы обеспечить подачу до 30 % подготовленной древесной муки и высокое качество поверхности. Но для этого необходимы экструдеры, которые могли бы наносить на рабочий стол 3D-принтера разные композиты и синхронно работать друг с другом.

Известно устройство [96], которое позволяет создавать изделия с помощью 3D-принтера с высоким качеством поверхности, в том числе подкрашивать полимерную композицию. Согласно описанию расплавленный полимер подаётся в экструдер, в котором также предусмотрена подача красителя (рисунок 1.13). Несмотря на высокую точность и возможность печатать разноцветные изделия, устройство имеет небольшой диаметр сопла, который может забиться при подаче в него смеси, содержащей древесную муку. Увеличение диаметра сопла экструдера приведёт к увеличению шероховатости поверхности. В процессе печати используется только один экструдер, который предполагает работу с одним и тем же материалом.

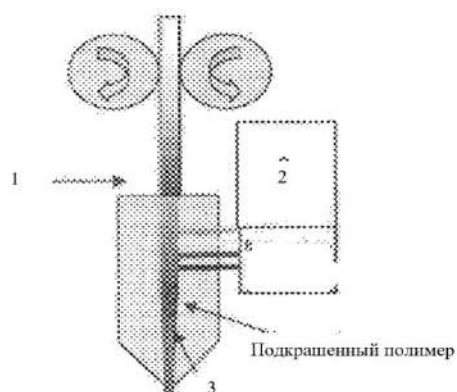


Рисунок 1.13 – Экструдер для подачи смеси с возможностью окраски: 1 – подача полимера; 2 – ёмкость для подачи красителя; 3 – подкрашенный полимер

Диаметр сопла для экструзионной печати полимерным прутком обычно составляет 0,6–0,8 мм. Напротив, для устройств, использующих послойное формование жидкой смесью, требуется больший диаметр сопла (8–10 мм), что увеличивает шероховатость. Поэтому крайне важно либо поставлять различные композиты с универсальным устройством, либо использовать мультиэкструдерный 3D-принтер, способный организовать подачу по технологии FDM и LDM.

Известно устройство для трёхмерного воспроизведения, имеющего множество пассивных сопел для моделирования многокомпонентного трёхмерного объекта [97] (рисунок 1.14).

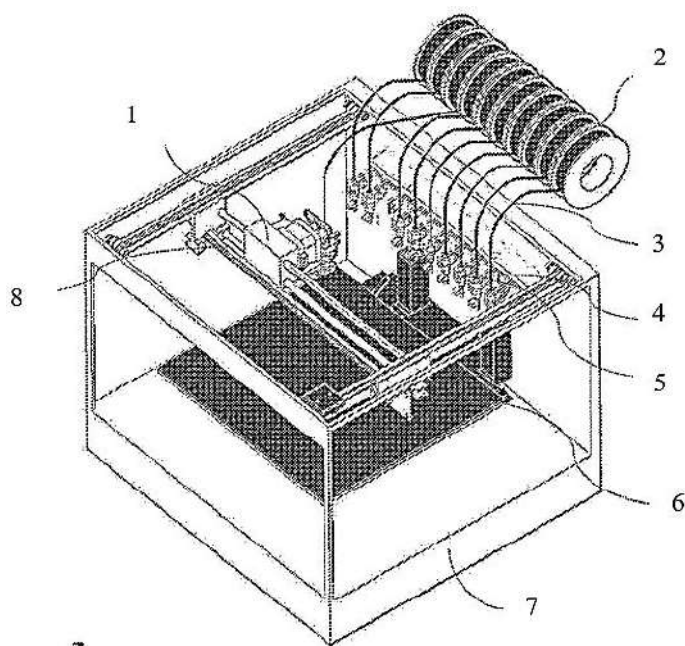


Рисунок 1.14 – Общий вид 3D-принтера для печати многокомпонентного изделия: 1 – экструдер; 2 – полимерный материал; 3 – прутки полимерного материала; 4 – стойка для установки съёмных сопел; 5 – съёмные сопла, заправленные различными полимерами; 6 – рабочий стол 3D-принтера; 7 – корпус 3D-принтера; 8 – направляющие экструдера

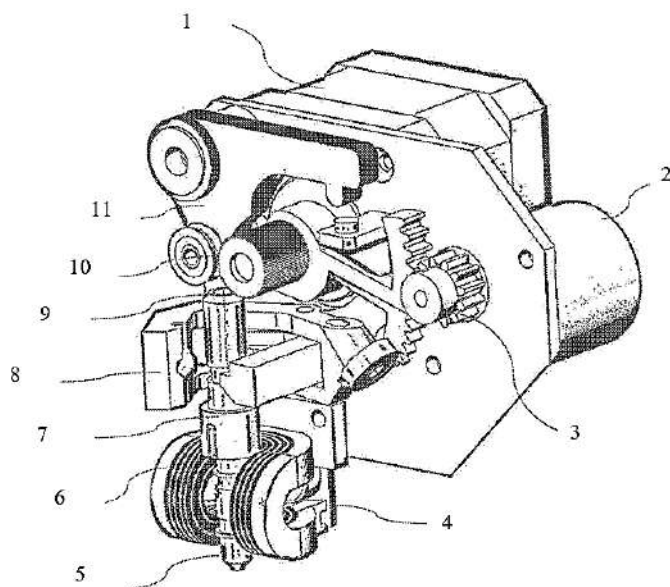


Рисунок 1.15 – Устройство для захвата сопла, загруженного различными компонентами: 1 – шаговый двигатель; 2 – редуктор; 3 – корпус; 4 – съёмный элемент; 5 – съёмное сопло; 6 – нагреватель; 7 – термобарьер; 8 – фиксатор; 9 – штуцер для загрузки прутка пластика; 10 – проталкивающий вал; 11 – зажим

3D-принтер содержит один экструдер, который захватывает установленные жёстко в ряд съёмные сопла 5 (рисунок 1.14), куда подаётся пластик 2 в виде прутка 3 (см. рисунок 1.14). Экструдер снабжён нагревательным устройством 6 (рисунок 1.15), которое повышает температуру. Температурный режим определяется экструдером, поэтому в каждом сопле 5 (см. рисунок 1.15) должен находиться пластик с одинаковой температурой плавления. Установить в 3D-принтере съёмное сопло, в которое можно было бы подать смесь, содержащую древесную муку и связующее невозможно, так как разница температур при подаче водорастворимого пластика (190 – 220 °С) и смеси (от 30 – 90 °С) очень высока. Поэтому несмотря на преимущество устройства, которое заключается в возможности работать с разными композициями, синхронизировать подачу смеси из древесной муки и связующего, а также водорастворимого пластика, с помощью рассматриваемой конструкции не получится. Для подачи смеси и водорастворимого пластика необходимо как минимум два сопла и два разных подогревателя, работающих автономно друг от друга.

Известен экструдер 3D-принтера для печати из нескольких сопел [98], состоящий из каркаса 1, электродвигателя 2, полого вала 8 и сопла 10, оснащенного радиаторами 6 и нагревателями 9, отличающийся тем, что устройство дополнительно оснащено ведущим колесом 3, входящим в

зацепление с ведомым колесом 4, установленным на полом валу, радиатор оснащен вентилятором 7 и термобарьерами 5, а полый вал выполнен с возможностью вращения вокруг своей оси.

Несмотря на то, что двойная экструзия через два сопла повышает производительность печати, недостатками данной полезной модели является то, что через два сопла подаётся один и тот же материал, для которых установлен только один нагреватель. Поэтому предлагаемая конструкция может работать либо только с пластиком, который подаётся в виде прутка, либо только со смесью из подготовленной древесной муки, при увеличении диаметра сопла от 1,5 до 3 мм.

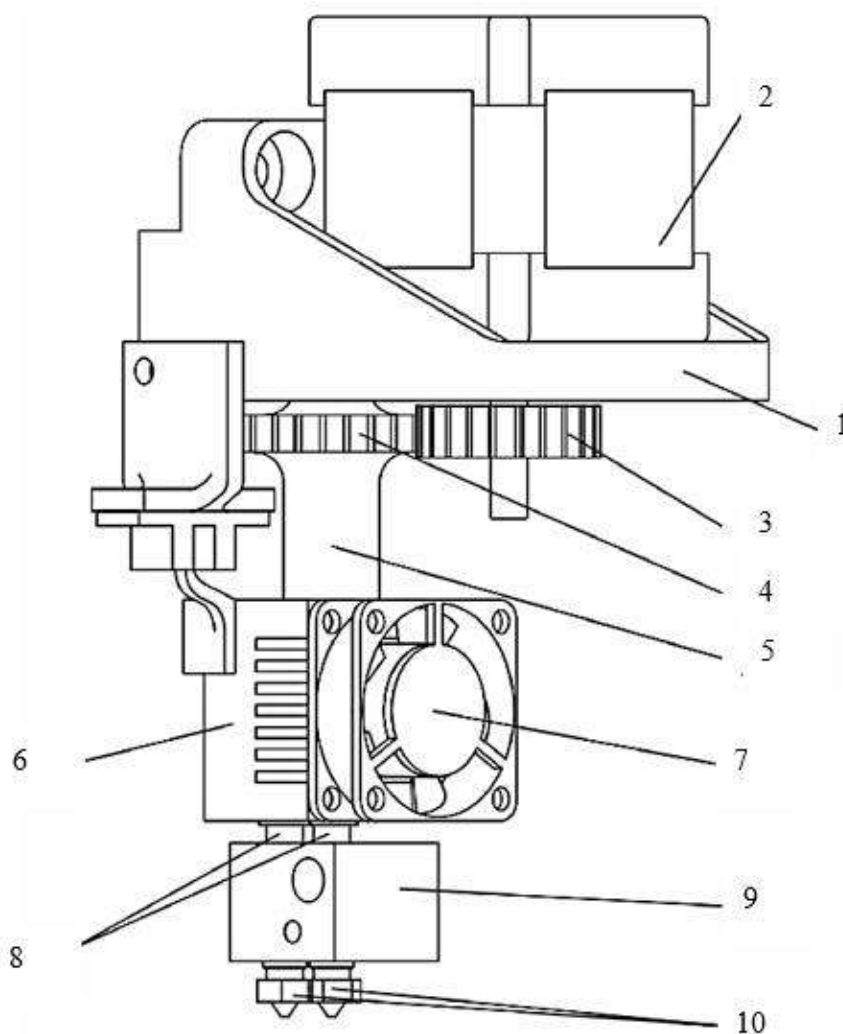


Рисунок 1.16 – Экструдер 3D-принтера для много сопельной печати: 1 – каркас; 2 – электродвигатель; 3 – ведущее колесо; 4 – ведомое колесо; 5 – термобарьер; 6 – радиатор; 7 – вентилятор; 8 – полый вал; 9 – нагреватели; 10 – сопла



При увеличении диаметра отверстия сопла появляется проблема большой шероховатости поверхности. Кроме того, работа двух сопел связана с тем, что нанесённый первым соплом материал может деформироваться проходящим вторым соплом. Для устранения этого недостатка необходима синхронизация работы, частью которой является смещение по вертикали одного сопла, в то время, когда печатает второе.

Наиболее близким аналогом разрабатываемого экструдера 3D-принтера для смесей из подготовленной древесной муки и связующего является изобретение [99] (рисунок 1.17), содержащее ёмкость с устройством крепления, позволяющим закрепить экструдер на исполнительных механизмах принтера, отверстие для загрузки строительного материала, сопла с выходным отверстием для экструдирования строительного материала. При этом в нижнюю часть ёмкости интегрирован дозатор строительных смесей, позволяющий регулировать количество строительной смеси при формировании печатаемого слоя, отличающийся тем, что содержит подмешивающее устройство, выполненное в виде подмешивающей рамки с приводом, который одновременно является приводом для дозатора строительных смесей.

Согласно рисунку 1.17 смесь загружается (подаётся) в ёмкость 1 экструдера, прикреплённого к исполнительным механизмам принтера посредством устройства крепления 2, через отверстие 3 для загрузки (подачи) в экструдер строительного материала (строительной смеси). Смесь подаётся в сопло 7 экструдера посредством дозатора 6, выполненного в виде шнека или героторной пары, приводимого во вращение приводом 4 дозатора и подмешивающей рамки. Подмешивающая рамка 5, установленная на валу привода 4, служит для размешивания смеси, во избежание её расслаивания и комкования. Дозатор 6 строительных смесей позволяет регулировать количество экструдированной строительной смеси при формировании печатаемого слоя, печатаемой конструкции. Для исключения самопроизвольного вытекания строительной смеси экструдер может

содержать запорный клапан 9. Для введения пластифицирующих и иных добавок экструдер может оснащаться дополнительными коммуникациями 8 в виде штуцера для подачи пластифицирующих и иных добавок к строительной смеси. Для укладывания слоя в направлении движения экструдера принтера применяется привод 10 поворотной оси для поворота сопла. Он же поворачивает по направлению движения экструдера устройство 11 формирования поверхности в виде заглаживающих или фактурных лопаток. Для укладки арматуры в теле печатаемого слоя может применяться устройство 12.

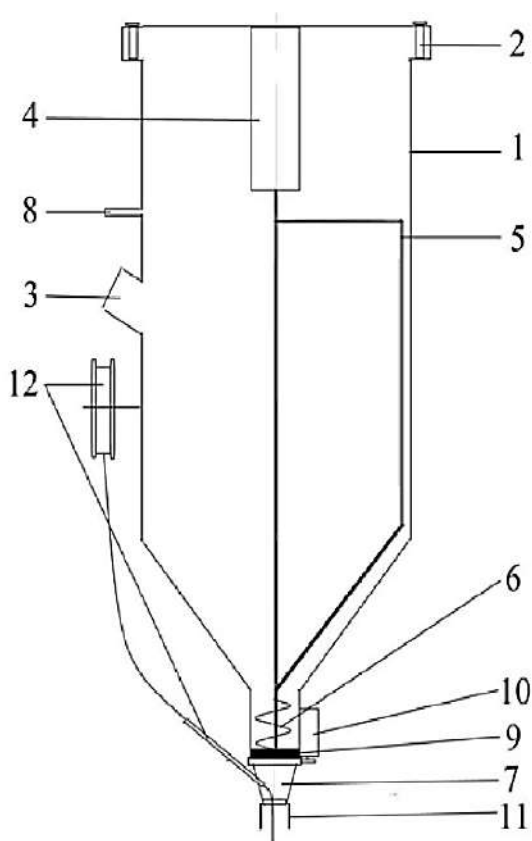


Рисунок 1.17 – Экструдер 3D-принтера для строительных смесей: 1 – ёмкость (корпус) экструдера; 2 – устройство крепления; 3 – отверстие для загрузки (подачи) в экструдер строительного материала (строительной смеси); 4 – привод дозатора и подмешивающей рамки; 5 – подмешивающая рамка; 6 – дозатор (шнек или героторная пара); 7 – сопло; 8 – штуцер (коммуникации) для подачи пластифицирующих и иных добавок к строительной смеси; 9 – запорный клапан; 10 – привод поворотной оси для поворота сопла и устройства формирования поверхности в виде заглаживающих, либо фактурных лопаток по направлению движения печатающей головки; 11 – устройство формирования поверхности в виде заглаживающих, либо фактурных лопаток; 12 – арматура

Несмотря на то, что экструдер строительных смесей для 3D принтера может быть использован для композиции, содержащей древесную муку и связующее, для более сложных геометрических фигур, к которым предъявляются высокие требования к качеству поверхности, устройство не предназначено. Диаметры сопла экструдеров для строительных смесей для 3D-принтера – более 8 мм, что объясняет высокую шероховатость поверхности. Таким образом, основным недостатком устройства является отсутствие возможности изготовления декоративных изделий и элементов конструкций оборудования ЦБП, а также строительных конструкций простой и сложной геометрической формы с высокими требованиями к качеству поверхности. При использовании второго экструдера также необходимо учитывать, что нанесённый материал первым соплом может деформироваться проходящим вторым. Снижение шероховатости за счёт печати контура потребует синхронизации работы экструдеров, частью которой является смещение по вертикали одного сопла в то время, когда печатает второе сопло.

### **1.7 Выводы по литературному обзору и постановка цели, задач исследований**

Таким образом, среди существующих технологий 3D-печати можно выделить FDM и LDM, которые наиболее близко подходят для использования древесно-полимерных композитов. Однако небольшой диаметр сопла экструдеров и сложность изготовления пластикового прутка с высоким содержанием древесных волокон не позволяют использовать технологию FDM, а технология LDM связана с низкой точностью изготовления, что вызвано применением сопел большого диаметра.

Поэтому разработка способа нанесения древесно-полимерного материала (в композиции до 30 %) на рабочий стол 3D-принтера, с изготовлением изделий с высокой точностью, является важной задачей. Частицы древесины необходимо правильно подготовить, для чего необходимо

сравнить их по морфологическим характеристикам с теми, которые широко используются в аддитивных технологиях, а также оценить их форму, влажность, насыпную плотность. От перечисленных свойств будут зависеть свойства изготавливаемых декоративных изделий для мебели и элементов конструкций оборудования ЦБП.

Таким образом, **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.

## **2 Материалы и методы исследований**

### **2.1 Материалы для экспериментальных исследований**

#### **2.1.1 Частицы древесины различных пород**

В проведённых исследованиях измельчались: бук, дуб, лиственница, ольха и сосна, взятые в Северо-Западном регионе России в осеннее время. Контроль влажности осуществлялся с помощью прибора «Sartorius M-45» (Германия), термогравиметрического инфракрасного влагомера. Основные характеристики: диапазон измерения влажности – (0,1–90 %); точность измерения массы – 0,001 г; потребляемая мощность – 0,7 кВт [100, 101]. Равновесная влажность (древесина больше двух недель находилась в закрытой лаборатории при температуре 20 °С и относительной влажности  $\varphi=75 - 80$  % (комнатно-сухая)) бука составила 5,8 %; дуба – 5,8 %; лиственницы – 10 %; ольхи – 6,7 %; сосны – 8,9 %. Плотность измерялась по принципу, представленному в работе [102].

#### **2.1.2 Двухкомпонентные связующие**

В качестве связующего были использованы различные марки многокомпонентного синтетического полимерного связующего, представленные на российском рынке:

- двухкомпонентная полиуритановая система «Ерохітах» (характеристики: полное отверждение: 20 мин; рекомендуемая смесь компонентов – 1:1; не требует дегазации);

- двухкомпонентная полиуритановая система «Real Cast М6» (характеристика: время полного отверждения – от 24 до 48 мин при 25 °С; рекомендуемая смесь компонентов – 1:1; не требует дегазации; динамическая вязкость – 85 мПа·с;

- прозрачный эпоксидный компаунд от компании «Арт-Массив» – в основе эпоксидная смола и специальный отвердитель (характеристики: предел по нанесению слоя – 100 мм; без растворителя; динамическая вязкость компонентов А и В – 1 Па·с при 22 °С; плотность – 1100 кг/м<sup>3</sup>).

Образцы для разрушения были изготовлены в соответствии с размерами, установленными ГОСТ 11262–2017 [103] с помощью двухэкструдерного 3D-принтера «MegaBot Dual Kit» (характеристики: диаметр сопла – 0,4 мм; пространство для печати – 200 x 200 x 180 мм; технология печати – FDM/FFF; количество экструдеров – 2; заявленная точность печати – 100 мкм; максимально возможная температура экструдера – 220 °С) [104]. В один из экструдеров загружался водорастворимый пластик PVA компании «eSun» (Китай) (характеристики: биоразлагаемый, нетоксичный, водорастворимый, температура печати – 190–210 °С; плотность – 1140 кг/м<sup>3</sup>; рекомендуемая температура стола – 60–80 °С). Паста, содержащая древесную муку вместе с двухкомпонентной, системой наносилась по контурам водорастворимого пластика.

## **2.2 Оборудование для проведения экспериментальных исследований**

### **2.2.1 Лабораторная мельница для размола древесины**

В качестве древесины использовались различные породы древесины, растущие в ленинградской области, срубленные в осенний период. Размол опилок, взятых с мебельной фабрики, осуществлялся в лабораторной дисковой мельнице при одинаковом режиме работы. Использовалась мельница «Stromberg HXUR 225A3» (Швеция) с характеристиками: мощность –  $N=2,2$  кВт; частота вращения –  $n=940$  об/мин; номинальный ток –  $I_N=5,5$  А; отношение входного тока к номинальному –  $I_S/I_N=4,8$ ; отношение пускового крутящего момента к номинальному –  $T_S/T_N=2,4$ ; отношение максимального крутящего момента к номинальному –  $T_{MAX}/T_N=2,4$ ; коэффициент мощности двигателя –  $\cos \varphi=0,76$ ; коэффициент полезного действия –  $\eta=80$  %; момент инерции ротора –  $J=0,0085$  кг·м<sup>2</sup>. Частицы древесины измельчались в режиме работы мельницы с минимальным зазором [105, 106].

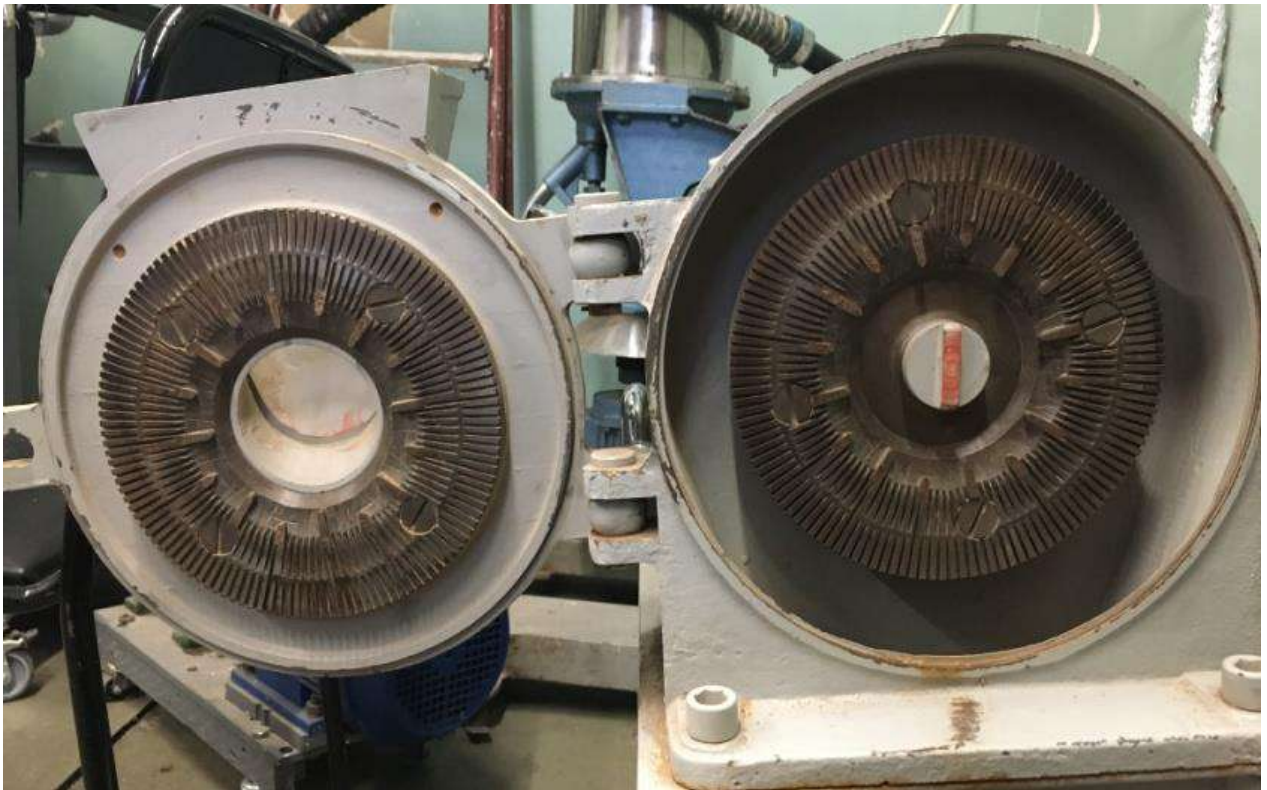


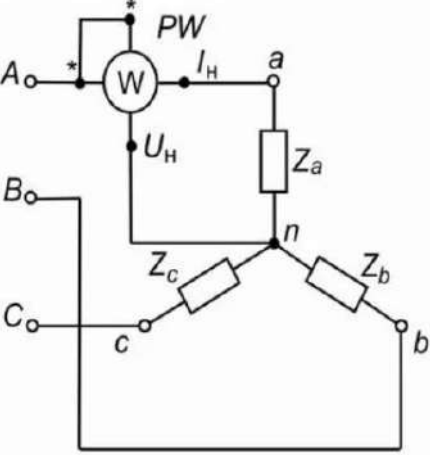
Рисунок 2.1 – Конструкция гарнитуры дисковой мельницы для измельчения древесины лиственницы

Предварительно были определены энергозатраты лабораторной мельницы, через которую было неоднократно пропущено 50 г частиц древесины. Мельница работала при минимально возможном зазоре между дисками ротора и статора.

### **2.2.2 Прибор для оценки мощности на размол древесины**

Оценка удельных энергетических затрат при размоле древесины различных пород: бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны производилась с помощью пересчёта показаний ваттметра «Watt meter ACM-8003», который был подсоединён к трёхфазному электродвигателю переменного тока (380 В), привода лабораторной дисковой мельницы «Stromberg HXUR 225A3». Схема подключения ваттметра к электродвигателю и технические характеристики представлены таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Схема подключения ваттметра к электродвигателю и технические характеристики измерителя мощности

Схема подключения – «Звезда»	Технические характеристики прибора «Watt meter ACM-8003»
	Измерение мощности «TrueRMS»:
	диапазон – 0÷6000 Вт; разрешение – 1 Вт; точность измерения $\pm(1\% + 5 \text{ Вт})$
	Измерение переменного напряжения (TrueRMS): диапазон – 0÷600 В; разрешение – 0,1 В; точность измерения $\pm 0,3\% + 0,3 \text{ В}$
	Измерение переменного тока (TrueRMS): диапазон - 0÷10 А; разрешение – 0,01 А; точность измерения $\pm(0,3\% + 0,03 \text{ А})$
	Измерение коэффициента мощности: диапазон – 0÷1; разрешение – 0,01; точность измерения $\pm(1\% + 0,02)$
Рабочая температура – 0 ÷ 50 °С; питание – 9 В; ток потребления – 10 мА; масса – 398 г; габариты – 190x88x40 мм	

### 2.2.3 Анализатор влажности «Sartorius M-45»

Анализ влажности опилок и древесной муки из различных пород (бука, дуба, лиственницы, ольхи и сосны) осуществлялся с помощью прибора «Sartorius M-45» (Германия), термогравиметрического инфракрасного влагомера. Основные характеристики: диапазон измерения влажности – (0,1 – 90 %); точность измерения массы – 0,001 г; потребляемая мощность – 0,7 кВт.

С помощью этого же прибора проведены испытания композита на основе частиц древесины и связующих на устойчивость к проникновению воды, находящейся на поверхности [54].

### 2.2.4 Пикнометр

При оценке насыпной плотности измельчённых частиц древесины была использована разработанная конструкция пикнометра, защищённая патентом №111663U1 РФ на полезную модель [102]. Разработка позволила повысить точность измерения плотности сыпучих материалов с  $\rho < 1 \text{ г/см}^3$ . Поставленная цель была достигнута тем, что сферическая часть пикнометра выполнена из



двух частей, разделяющих ее в диаметральной плоскости пополам и между которыми размещена перфорированная перегородка с размером отверстий, диаметр которых меньше размера твердых частиц.

Сущность предлагаемой полезной модели поясняется чертежом, где на рисунке 2.2 изображена схема пикнометра.

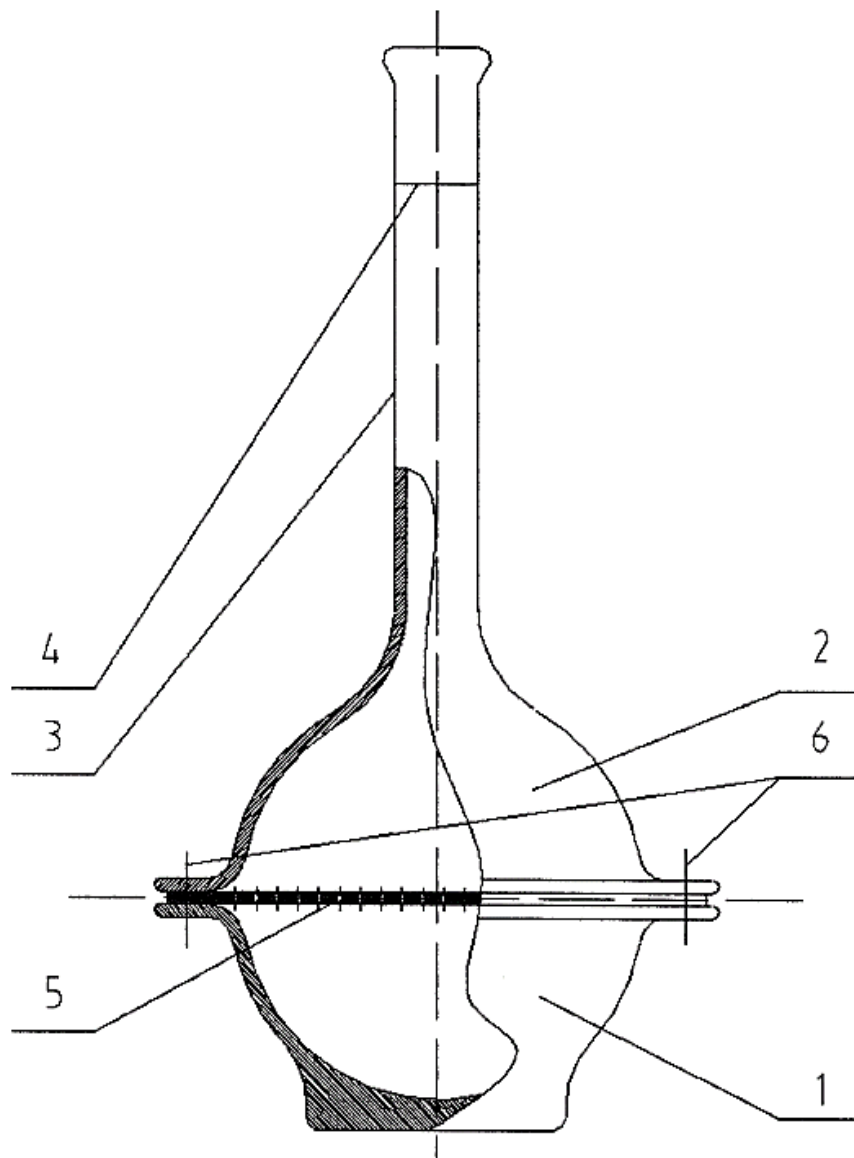


Рисунок 2.2 – Пикнометр: 1 – нижняя часть пикнометра; 2 – верхняя часть; 3 – вертикальная цилиндрическая трубка; 4 – кольцевая горизонтальная метка; 5 – перфорированная перегородка; 6 –крепление [102]

Предлагаемый пикнометр изготавливается для последующих испытаний и реализации на предприятиях химической, целлюлозно-бумажной и других отраслях промышленности.

## 2.2.5 Анализатор частиц «Mastersizer 2000»

Оборудование предназначено для измерений дисперсных параметров (размеров частиц и функций распределения частиц по размерам) суспензий, эмульсий и порошкообразных материалов (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Внешний вид анализатора

Конструктивно анализаторы состоят из измерительного блока и комплекта диспергаторов. Измерительный блок представляет собой оптико-аналитическую систему, основными элементами которой являются источник света лазер, фокусирующая оптическая система, многоэлементное фотоприемное устройство, измерительная ячейка и электронное устройство. В анализаторе «Mastersizer 2000» два лазера с длинами волн 633 нм и 470 нм [105–107]. Несмотря на широкий ряд преимуществ британский анализатор дорогой (18 000 \$ на 2022 г), поэтому при больших сериях измерений

Таблица 2.2 – Технические характеристики «Mastersizer 2000»

Наименование	Значение
Диапазон измерений размеров частиц в жидкой среде, мкм: -анализатор Mastersizer 2000	от 0,05 до 1000
Диапазон измерений размеров частиц порошкообразных материалов, мкм: - анализатор Mastersizer 2000	от 0,1 до 1000
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений размеров частиц, %	±10

Наименование	значение
Напряжение питания от сети переменного тока частотой (50±3) Гц через блок питания, В	220±22
Потребляемая мощность измерительного блока анализатора, В·А, не более	50
Габаритные размеры измерительного блока (длина × ширина × высота), мм, не более	690×300×450
Масса анализатора, кг, не более	30
Рабочие условия эксплуатации: - температура окружающего воздуха, °С - относительная влажность окружающего воздуха, % - атмосферное давление, кПа	от 10 до 35 от 10 до 80 от 84 до 106,7

небольшим фабрикам дешевле и проще использовать оптическую микроскопию и бесплатную программу «ImageJ».

### 2.2.6 Сканирующий электронный микроскоп Teskan Mira LMH

Визуализация микроструктуры различных пород древесины производилась с помощью электронного микроскопа TESCAN MIRA3 LMH, производитель – TESCAN (Чешская Республика). Характеристики сканирующего электронного микроскопа следующие: электронная колонна (FEG SEM) с источником электронов на основе катода Шоттки; ускоряющее напряжение 200 В – 30 кВ; ток зонда 2 – 200 нА; разрешение 1,0 нм (при 30 кВ), увеличение до 1 000 000; детекторы вторичных электронов (SE, In-Beam SE); детектор отраженных электронов (BSE) [100–113].

### 2.2.7 Оборудование для послойного нанесения композита на основе древесины комбинацией методов LDM и FDM печати

«MBot Cube Dual» представляет собой двухэкструдерный 3D-принтер, который работает по технологии экструзионной печати FDM/FFF, произведён в Китае. Основные характеристики следующие: диаметр сопла – 0,4 мм; размер области построения – 200 x 200 x 180 мм; технология печати – FDM/FFF; количество экструдеров – 2 шт.; точность печати – 100 мкм; максимально возможная температура экструдера – 260 °С; материалы для печати – PLA (190 – 220 °С), SBS (225 – 240 °С), ABS (225 – 240 °С) [114–115].

Общий вид 3D-принтера «MBot Cube Dual» показан на рисунке 2.4. Он состоит из корпуса 1, который представляет собой собранные винтами и гайками панели (передняя, левая, защитная, задняя, правая, нижняя, опорная). К корпусу с помощью направляющих 2 и приводного вала 3 установлен рабочий стол, на котором изготавливается деталь. Рабочий стол движется в направлении оси Z с помощью шагового двигателя, установленного в нижней части принтера (на рисунке не показан). Материал для 3D-печати подаётся в устройство для подачи, представляющее собой двухэкструдерную голову, конструкция которой была представлена на рисунке 2.6. Оба экструдера установлены на одной опорной раме (см. рисунок 2.6, поз.16), которая фиксируется на направляющие 4, по которым экструдеры движутся относительно оси X. По направляющим 5 экструдеры движутся по оси Y. Движение экструдеров осуществляется с помощью шаговых двигателей 6, 7 через ремённые передачи 8, 9. Датчики 10, 11, 12 ограничивают движение экструдеров. Когда они срабатывают, экструдер останавливается. 3D-принтер управляется через джойстик 13 и дисплей 14.

Основным элементом 3D-принтера, который позволяет комбинировать технологии FDM и LDM 3D-печати, является двухэкструдерное устройство, которое состоит из корпуса, LDM экструдера 16 (см. рисунок 2.6), который закреплён винтами 17 и приводится в движение двигателем 18. Смесь подогревается от 30 до 90 °С с помощью нагревательного элемента 20 в зависимости от связующего, вязкость которого уменьшается при нагреве, а экструдер, работающий по технологии FDM, подогревается до температуры 220 °С электронагревателем 25. Оба экструдера устанавливаются на общую раму 19.

Экструдер LDM закреплён прижимом и поддержкой 21 и 22. В экструдер LDM подаётся смесь через патрубок 27 для подачи смеси связующего и древесной муки, а в экструдер FDM подаётся пруток водорастворимого пластика 26.

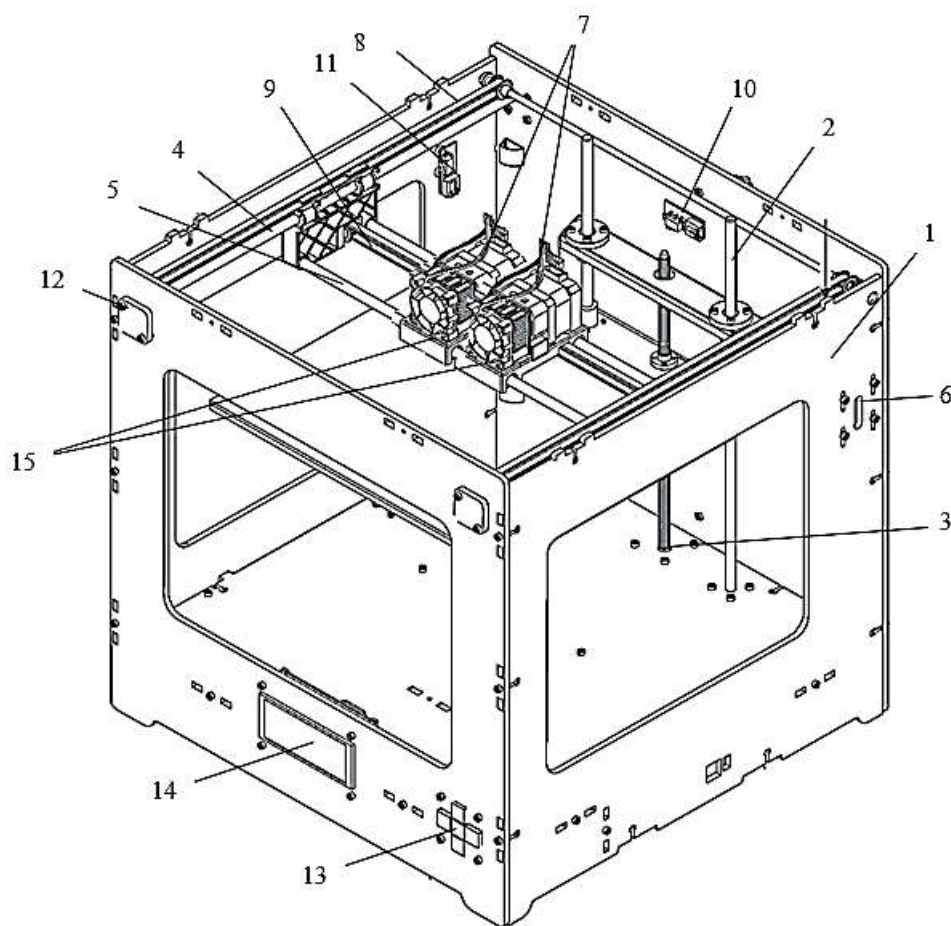


Рисунок 2.4 – Конструкция 3D-принтера, на базе которого была реализована комбинация технологий FDM и LDM печати: 1 – корпус; 2 – направляющие для движения по оси Z; 3 – приводной вал; 4, 5 – направляющие для движения по оси X и Y соответственно; 6, 7 – шаговые двигатели для движения по оси X и Y соответственно; 8, 9 – ремённые передачи для движения по оси X и Y соответственно; 10, 11, 12 – датчики, ограничивающие движение экструдеров по осям X, Y, Z; 13 – джойстик; 14 – дисплей; 15 – устройства для комбинирования технологии FDM и LDM печати

Первым этапом изготовления детали является калибровка стола, определяющая качество изготовления первого слоя. Если первый слой будет нанесён верно, то он зафиксируется на рабочем столе, и проблем с печатью в дальнейшем не возникнет. Для правильной калибровки стола используется лист бумаги плотностью  $80 \text{ г/м}^2$ , толщина которого позволяет получить необходимое расположение экструдера относительно рабочего стола. Второе сопло экструдера LDM должно быть выше не более чем на 3 мм относительно уровня сопла экструдера FDM, для этого прижим 25 поворачивается по

часовой стрелке, при этом натягивается пружина и подвижный корпус LDM экструдера устанавливается в нужное положение.

Затем устанавливается температурный режим изготовления детали. Для разных видов пластика устанавливается своя температура. При печати из пластика PVA (поливинилацетат или поливиниловый спирт) температура экструдера должна быть в диапазоне от 190 до 220 °С для печати контура детали. Второй экструдер, в данном случае левый «Left», подогревается в диапазоне температур от 20 до 90 °С в зависимости от вида многокомпонентного связующего и содержания древесной муки. С увеличением содержания древесной муки рекомендуется повышать температуру с целью снижения вязкости смеси.

После подогрева пластик и смесь загружались в устройство для подачи, для чего выбиралась команда загрузки левого и правого экструдеров поочередно. Печать велась по предварительно разработанным ранее 3D-моделям.

### **2.2.8 Двухэкструдерное устройство для нанесения композиционного материала**

Разрабатываемое устройство должно организовывать подачу смеси из древесной муки и связующего вместе с экструзией полимерного прутка, которая создаёт контур формы изделия. Такое устройство может быть использовано в мебельной промышленности и в строительстве для изготовления декоративных изделий и элементов конструкций оборудования ЦБП, а также для строительных конструкций простой и сложной геометрической формы.

Техническим результатом разрабатываемого устройства является повышение качества поверхности, 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 [116].

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, при этом 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. Полезная модель поясняется чертежами, в которых на рисунках 2.5 и 2.6 отдельно показан экструдер для подачи смеси из подготовленной древесной муки и связующего. На рисунках 2.6, 2.7 показан общий вид синхронной работы экструдеров для подачи смеси и водорастворимого пластика.

Согласно заявленной полезной модели устройство для 3D-принтера для изготовления изделий из композиционных материалов, содержащее ёмкость (корпус) экструдера 1, которая движется по вертикали на 1,5 – 3 мм за счёт пружины 8 вверх, а за счёт вращения шнековой мешалки 5 в высоковязкой среде вниз. Корпус закреплён устройством 2 и прижимом 10 к поддержке экструдера 11, что позволяет снять и провести замену ёмкости, а для непрерывной подачи смесей из древесной муки и связующего используется трубка 16, соединённая с отверстием для загрузки (подачи) в экструдер 3. При вращении шнековой мешалки 5 и дозатора 6 в высоковязкой смеси за счёт привода 4 подвижный корпус перемещается вниз по вертикали на 1,5 – 3 мм и наносит смесь в форме изготовленного из древесной муки и связующего изделие 18.

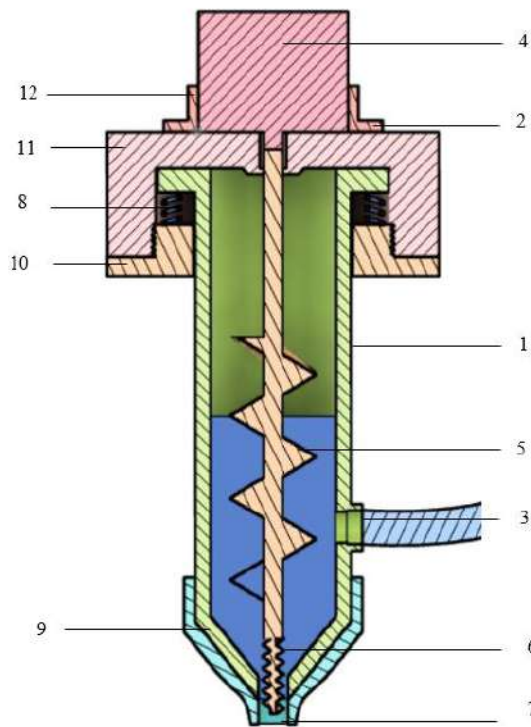


Рисунок 2.5 – Экструдер для подачи смеси (пасты), содержащей до 30 % опилок и связующее: 1 – корпус; 2 – крепление; 3 – отверстие для загрузки (подачи) в экструдер; 4 – привод; 5 – шнековая мешалка; 6 – дозатор; 7 – сопло; 8 – пружина; 9 – нагревательный элемент; 10 – прижим; 11 – поддержка экструдера; 12 – крепления [107]

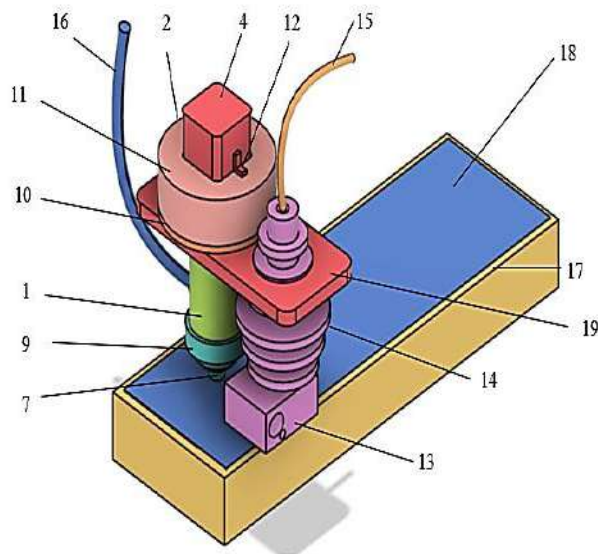
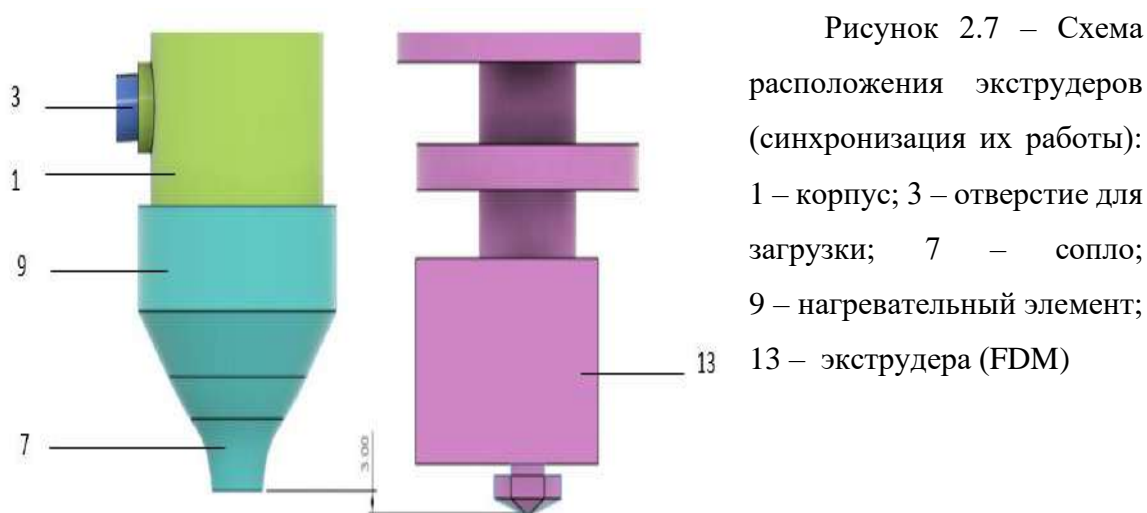


Рисунок 2.6 – Общий вид двухэкструдерного устройства для комбинирования технологии FDM и LDM 3D-печати: 1 – корпус; 2 – крепление; 4 – привод; 7 – сопло; 9 – нагревательный элемент; 10 – прижим; 11 – поддержка экструдера; 12 – крепления; 13 – экструдер (FDM); 14 – электронагреватель экструдера (FDM); 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 [107]





Когда экструдер завершает нанесение слоя из древесной муки и синтетического полимерного связующего, упругость пружины восстанавливает положение корпуса в исходное. Таким образом, наносимый смесь, 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 смесь из древесной муки и синтетического полимерного связующего подогрывается в диапазоне температур от 30 до 90 °С в зависимости от связующего, вязкость которого уменьшается при нагреве. Оба экструдера устанавливаются на общую раму 19.

Синхронизация работы экструдеров необходима, так как согласно заявленному решению, которое позволяет снизить шероховатость поверхности, устройство осуществляет подачу разных материалов, при разном отверстии сопел и при существенно отличающихся температурах при экструзии. Поэтому характеристики печати, которые загружаются в программы, которые пишут команды для 3D-принтеров, различные. Важным условием для реализации полезной модели является использование двухэкструдерного 3D-принтера, который может в отдельности контролировать за перечисленными выше характеристиками печати.

Рекомендованные характеристики 3D-печати двухэкструдерного принтера представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики 3D-печати водорастворимым пластиком и смесью из древесной муки и связующего для синхронной работы [116]

Параметр 3D-печати	Экструдер для печати водорастворимым пластиком	Экструдер для печати смесью из древесной муки и связующего
Технология	FDM/FFF (экструзия полимерного прутка)	LDM (подача жидкого композита через сопло)
Материал	водорастворимый пластик	смесью из древесной муки и связующего
Диаметр сопла, мм	0,4 (определяет шероховатость готового изделия)	1,5 – 3
Поддержка детали	да	нет
Подложка	нет	нет
Коэффициент заполнения, %	50 – 100	20 – 80
Высота слоя	0,3 – 0,6	0,3 – 0,6
Количество граничных слоёв	1 3	1
Скорость подачи материала, мм/с	30 – 60	40 – 60
Скорость движения экструдера, мм/с	30 – 60	100 – 150
Температура печати	180 – 220	20 – 90
Оттяжка материала назад	да/нет	да
Диаметр прутка, мм	1,75	–

Экструдер, подающий смесь из древесной муки и связующего, также может работать в режиме нанесения поддержки. В таком варианте настраиваются режимы 3D-печати поддержки. Следует отметить, что не все 3D-принтеры поддерживают возможность настраивать характеристики поддержки в расширенном формате. Вариант использования второго экструдера для печати из смеси из древесной муки и синтетического полимерного связующего можно исключить, если 3D-принтер не поддерживает возможность задавать температуру печати поддержки, отличную от температуры печати изделия.

## 2.2.9 Оборудование для оценки реологических характеристик жидкого композита на основе древесины

Реологические характеристики древесно-полимерного композита оценивались с помощью ротационного вискозиметра Rheotest® RN4.1 (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Ротационный вискозиметр «Rheotest® RN4.1» [117, 118]

Технические характеристики прибора представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Общие технические данные и требования к системе

Момент вращения	От 0,1 до 150 мНм
Разрешение по моменту вращения	0,002 мНм
Число оборотов	От 0 до 1000 об/мин
Разрешение по числу оборотов	0,015 об/мин
Диапазон угла поворота	-50 ÷ 300°
Разрешение по углу поворота	0,001°
Диапазон температур	-30 ÷ +200 °С
Частота:	0,001 ÷ 10 Гц
Напряжение питания	230 В АС ±10 %; 49 ÷ 61 Гц 110 В АС ±10 %; 49 ÷ 61 Гц

## 2.2.10 Оборудование для исследования термомеханических свойств композита на основе древесины



Рисунок 2.9 – Динамический механический анализатор «DMA/SDTA 861e» [56, 57]

Характеристика прибора: температурный интервал (при контролируемой скорости охлаждения)  $-150 - 500$  °С; максимальный диапазон частот прикладываемой нагрузки – 1000 Гц; максимальное усилие –  $\pm 40$  Н; максимальная деформация,  $\pm 1,6$  мм; максимальное значение тангенса угла потерь – 100; максимальная жёсткость испытуемого образца –  $10^8$  Н/м; максимальные размеры образцов (при трехточечном изгибе) – 100 мм [63].

### 2.2.11 Лабораторный стенд для оценки сопротивления разрыву и сжатию

Сопrotивляемость твёрдого древесно-полимерного композиционного материала сдавливанию является важным параметром, который используется при оценке качества изготавливаемых изделий. Это свойство определяет, насколько сильно твёрдый композит может сопротивляться давлению и разрушению при силовом контакте с другими материалами. Сопrotивляемость изделия сдавливанию зависит от многих факторов, таких как тип пластика, конструкция и форма изделия, а также от условий окружающей среды и способа приложения нагрузки [119].

Например, сопротивляемость композита на сдавливание является важным свойством для декоративных изделий для мебели, так как они могут соприкасаться с элементами конструкции. Декоративные изделия и детали оборудования не должны разрушаться под весом мебели и элементов конструкции оборудования ЦБП. Хотя в обычных условиях они не испытывают сильных нагрузок на сдавливание.

Для оценки сопротивляемости пластиковых изделий сдавливанию использовался универсальный учебный комплекс для статических испытаний материалов КСИМ-40 (производитель – Россия, НПП «Учебная техника»; максимальная нагрузка - 40кН).

### **2.2.12 Прибор для оценки твёрдости по Роквеллу**

Твёрдость образцов с различным содержанием древесной муки с тремя вариантами связующих была определена в соответствии с ГОСТ 24622 – 91, который установил метод оценки твёрдости пластмасс по Роквеллу [120].

Таблица 2.5 – Технические характеристики переносного динамического твердомера с поверкой Novotest Т-УД2

Диапазон измерения твердости: По Роквеллу, HRC По Бринеллю, HB По Виккерсу, HV Временного сопротивления (предела прочности), Мпа	20–70 90–450 230–940 370–1740
Основная погрешность измерения:	± 2 ед. HRC ± 10 ед. HB ± 15 HV
Габаритные размеры, мм	122×65×23
Рабочий диапазон температур, °С	От -20 до +50
Питание	2 элемента питания типа АА
Время непрерывной работы, ч, не менее	20
Масса электронного блока с батареей, не более, кг	0,2

## **2.3 Методы проведения экспериментальных исследований**

### **2.3.1 Метод оценки гранулометрического анализа древесины различных пород с помощью анализатора частиц**

Анализ частиц древесины мелкой фракции исследовали с помощью анализатора «Mastersizer 2000».

Количество исследуемых частиц для каждой пробы (по три на каждую породу древесины) в среднем было более 300 единиц. Данные определения размера частиц представляли собой значения эквивалентных диаметров, по которым велась статистическая обработка. Программа прибора автоматически обрабатывала данные, в том числе рассчитывался интервал повторения размера частиц с помощью формулы Стерджерса, оценивалась частота повторения размера, по которым выстраивалась функция распределения размеров частиц.

В анализаторах серии «Mastersizer 2000» используется метод лазерной дифракции для анализа распределений частиц по размерам в диапазоне от 10 мкм до 3,5 мм. В основе работы прибора заложен метод лазерной дифракции, при котором луч лазера освещает частицы, находящиеся в зоне измерения анализатора, при этом измеряется угловая зависимость интенсивности рассеянного частицами света (индикатриса рассеяния). Профиль интенсивности зависит от размеров и оптических характеристик частиц: интенсивность рассеяния на малые углы выше для более крупных частиц.

На основании данных угловой зависимости интенсивности рассеянного света восстанавливается распределение частиц по размерам, которое обеспечивает получение индикатрисы рассеяния на основании теории Ми, максимально близкой к экспериментальной. При этом вычисляемые размеры частиц – это диаметры сфер эквивалентных (измеряемым частицам) объёмов. Импортные анализаторы частиц находятся в крупных исследовательских центрах, стоимость исследований в которых дорогая, поэтому небольшим фабрикам (которых в стране много) дешевле и проще использовать оптическую микроскопию и бесплатную программу «ImageJ».

### **2.3.2 Методы оценки размеров частиц древесины с помощью обработки микроскопических изображений в программе ImageJ**

После размола древесины различных пород оценивается распределение частиц по размерам с помощью оптической микроскопии и программы ImageJ, которая зарекомендовала себя, как удобный инструмент в оценке

микроструктуры волокнистых композиционных материалов [121–124]. Для этого древесную муку распределяли на предметном стекле оптического микроскопа для получения изображения (рисунке 2.10). На этом рисунке видна область, представляющая собой окружность диаметром 0,15 мм. Четыре изображения микроснимков объединялись, при этом позиционирование осуществлялось по калибровочной окружности [125].

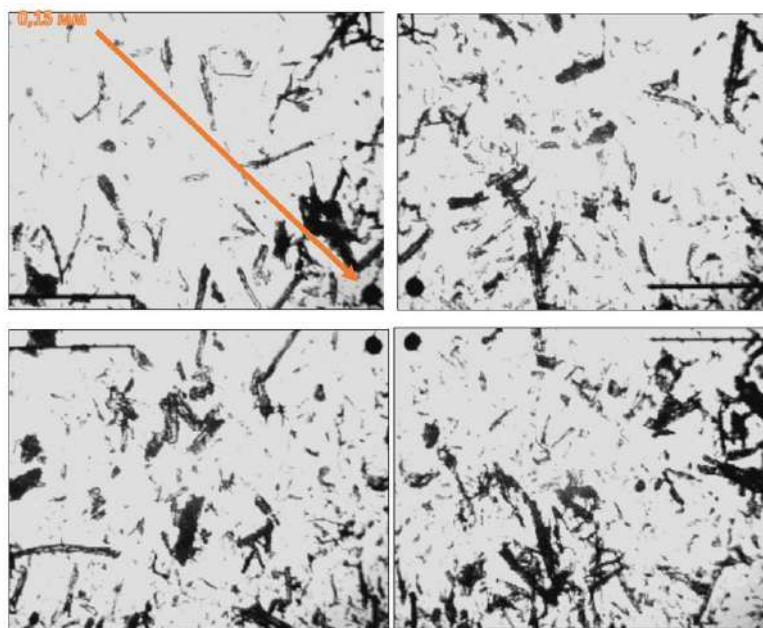


Рисунок 2.10 – Микроснимки частиц древесины

Важно иметь более широкий охват исследования для повышения точности, поскольку программное обеспечение может анализировать больше частиц в процессе расчета. Результат сшивки изображений и выполнения предварительной автоматической графической обработки представлен на рисунке 2.11.

Изображение, показанное на рисунке 2.10, загружается в программу «ImageJ», где оно преобразуется в 8-битный формат для ускорения обработки. Масштаб затем устанавливается путем рисования размерной линии и указания ее длины. Этот шаг необходим программе для точного расчета черных областей, представленных на изображении. Проводят прямую линию, соответствующую диаметру калибровочного круга (рисунк 2.12). Программа «ImageJ» впоследствии представит результаты расчета на основе установленного масштаба. В программе также есть функция, позволяющая

определять размер прямой линии в микронах, миллиметрах или метрах. Для преобразования изображения в 8-битный формат используются команды «Image → Type → 8-bit», как показано на рисунке 2.13.

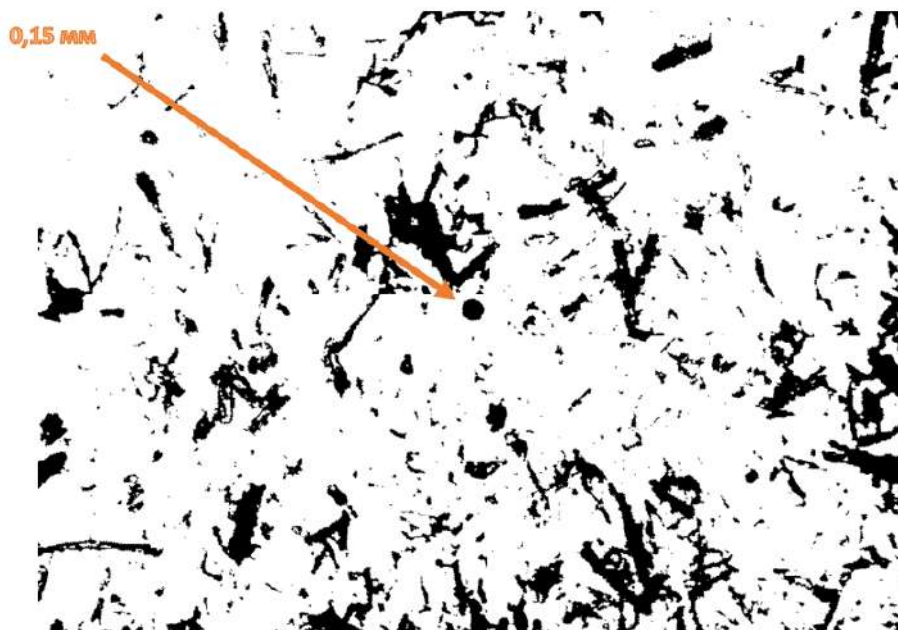


Рисунок 2.11 – Результат объединения четырёх микроскопических снимков в один с предварительной графической обработкой

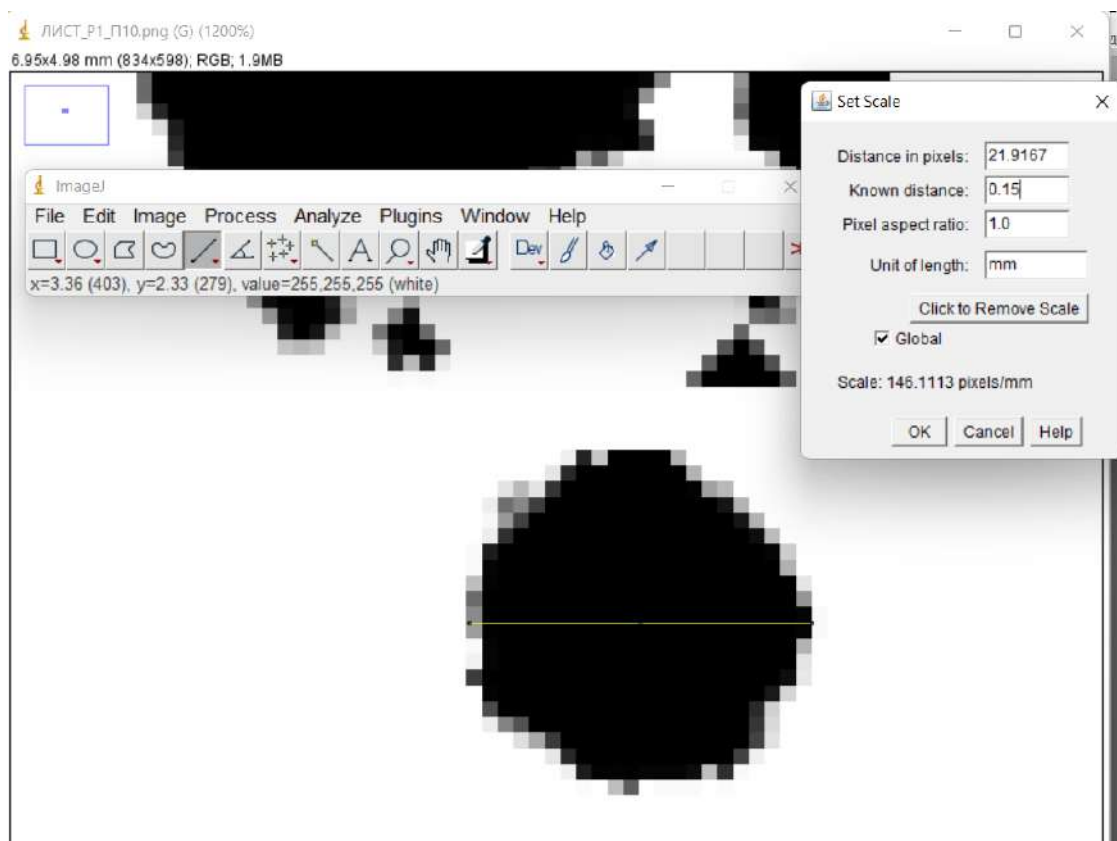


Рисунок 2.12 – Установка масштаба относительно калибровочной окружности диаметром 0,15 мм



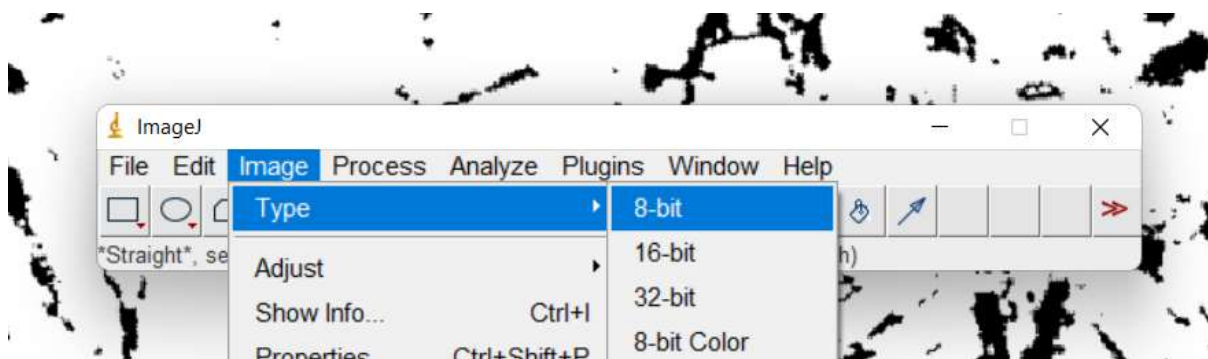


Рисунок 2.13 – Перевод изображения в 8-битный формат

Следующим этапом работы в программе является автоматическая обработка с помощью команды «Threshold», которая вызывается последовательностью команд «Image → Adjust → Threshold (рисунок 2.14)».

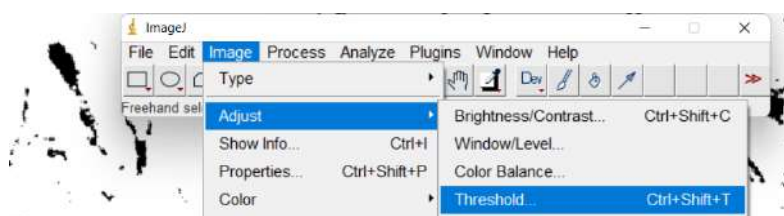


Рисунок 2.14 – Автоматическая графическая обработка изображения в программе ImageJ

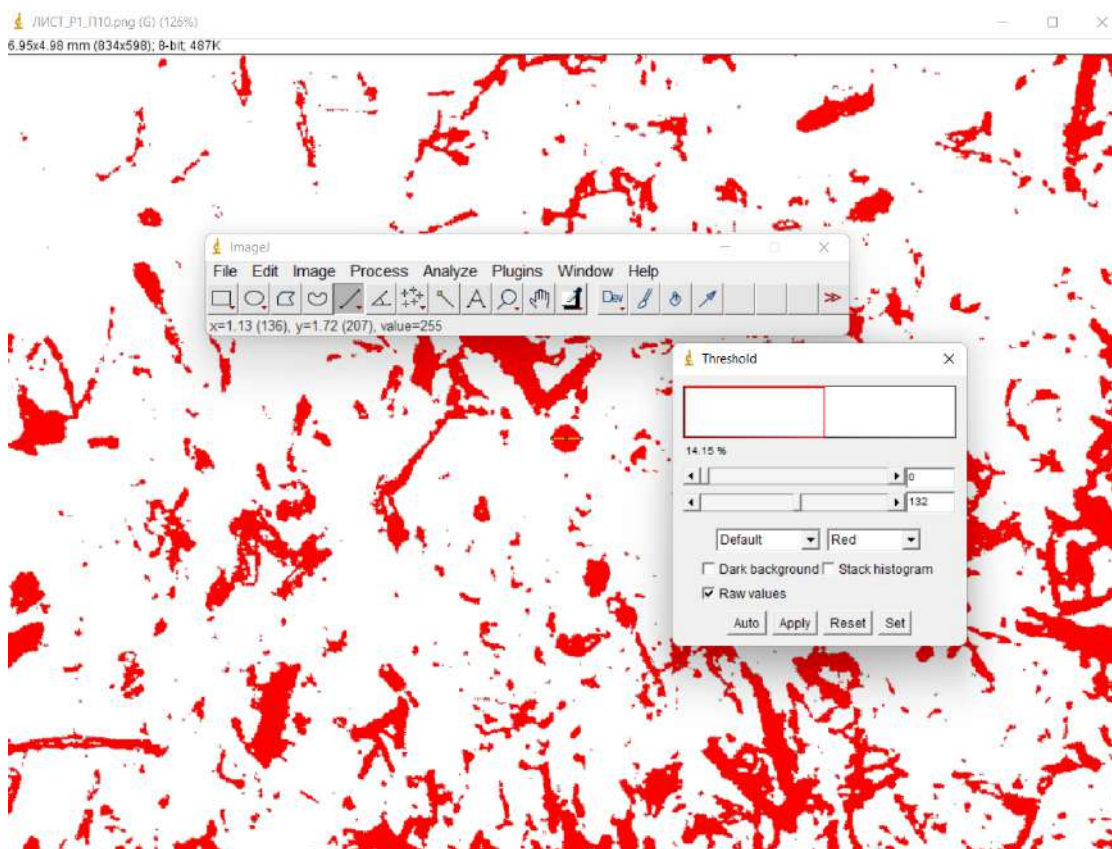


Рисунок 2.15 – Результат автоматической обработки микроскопического снимка командой «Threshold»

В некоторых случаях необходимо произвести графическое фильтрование объектов (рисунок 2.15). Важно отметить, что частицы древесины являются трехмерными и фокусировка микроскопа может исказить их размеры. Проверка геометрии частиц древесины включает небольшую корректировку фокуса и ручное уточнение графического изображения (как показано на рисунке 2.16) Программа «ImageJ» предоставляет необходимые инструменты для этой цели. Графический фильтр использовался в одинаковом режиме для обработки каждого изображения.



Рисунок 2.16 – Ручная правка результатов автоматической обработки программой «ImageJ» (представлена слева) и сопоставление с оригинальным микроснимком (показано справа)

Например, автоматическая обработка командой «Threshold» выдала результат изображения области частицы (по форме, напоминающей щепку) в виде маленьких частиц, расположенных в ряд. Исправить ошибку можно командой кисточка, соединив их в одну область, как показано на рисунке 2.16, слева. По такому принципу исследователь должен оценить объекты, полученные в программе после автоматической обработки.

После проверки областей, соответствующих частицам древесины, программа может выделить и пронумеровать их. Для выделения используются команды «Edit → Selection → Create Selection» (рисунок 2.17, а).

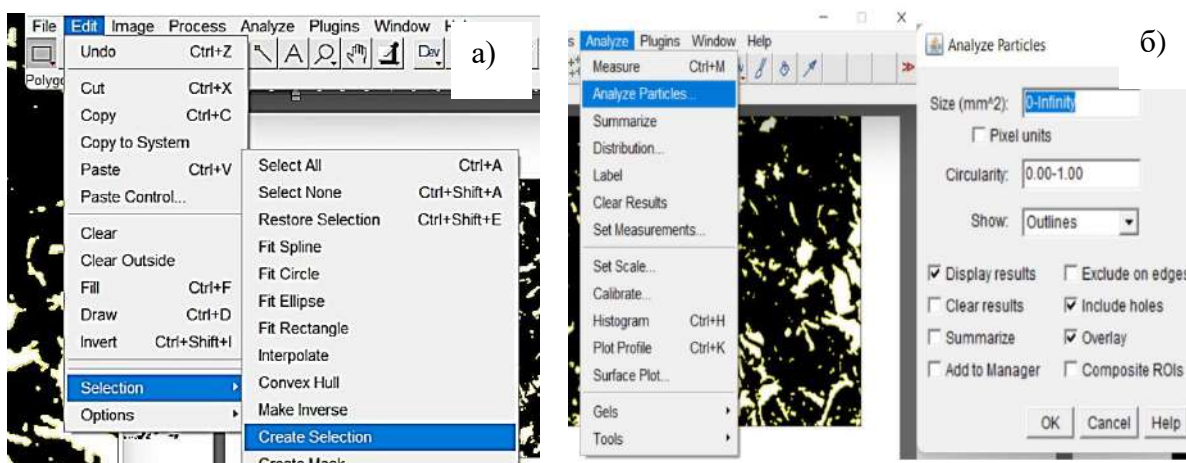


Рисунок 2.17 – Выделение областей, соответствующих частицам древесины и дальнейший анализ

Затем производится расчёт геометрических параметров частиц, выделенных с помощью последовательности команд «Analyze → Analyze Particles» (рисунок 2.17, б). В открывшемся диалоговом окне (см. рисунок 2.17, а) можно выбрать диапазон размеров частиц, которые следует учитывать. В данном случае выделены все частицы. Результат выделения частиц и их нумерация представлены на рисунке 2.18.

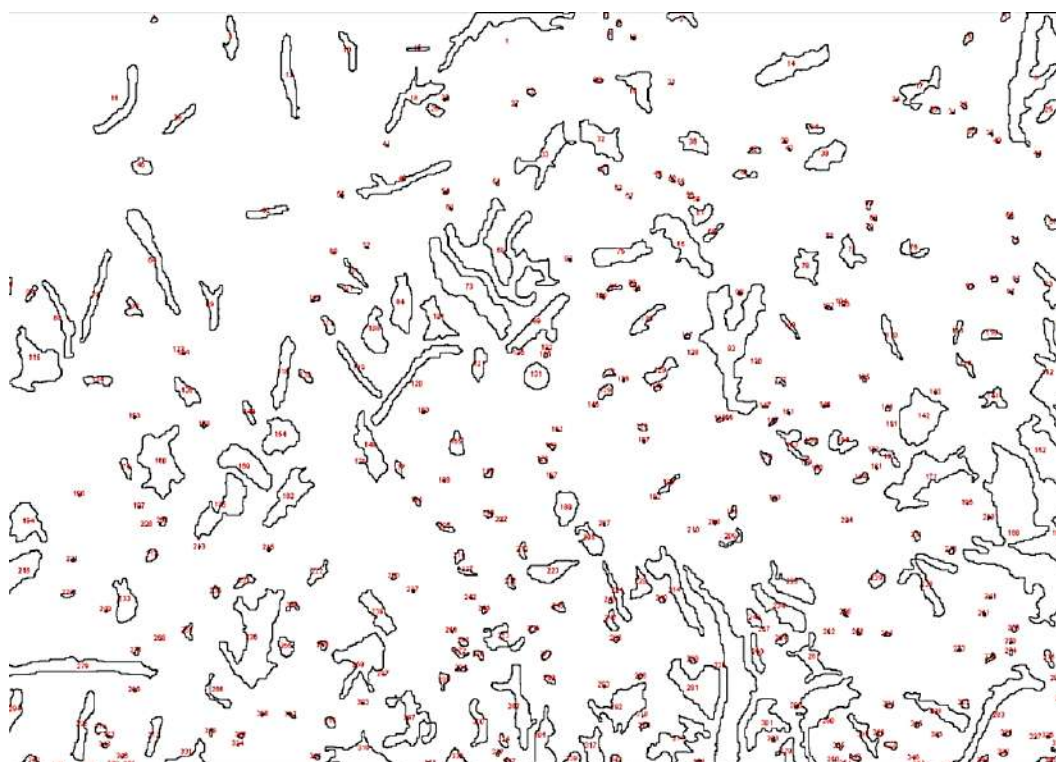


Рисунок 2.18 – Выделение и нумерация исследуемых областей в программе «ImageJ»

Программа «ImageJ» позволяет рассчитать размеры частиц, например, на рисунке 2.19 отображены результаты определения площади (Area) и периметра (Perim.). Всего программа зафиксировала и проанализировала 358 объектов. Проверку достоверности расчёта размеров можно проверить по 131 объекту, который соответствует калибровочной окружности. Площадь калибровочной окружности можно определить по соотношению  $S=\pi d^2/4=0,0168$  мм<sup>2</sup>, что практически соответствует рассчитанному программой ImageJ (0,016 мм<sup>2</sup>). Погрешность измерения составила 4,9 %.

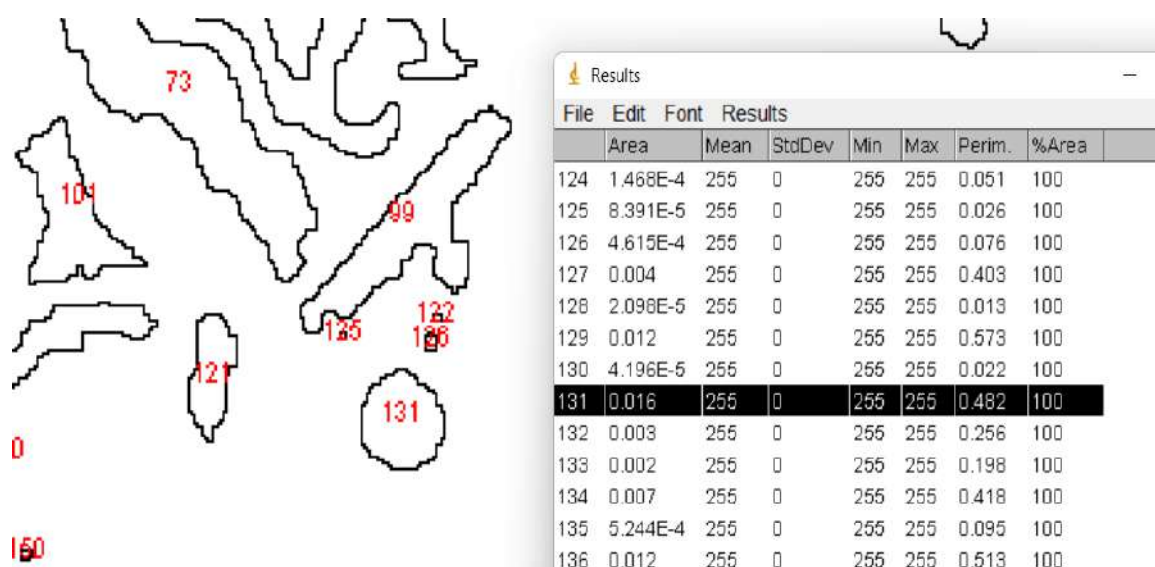


Рисунок 2.19 – Выделенные объекты (слева) и данные их расчёта (справа)

Следующим этапом является статистическая обработка данных, а именно построение диаграммы распределения частиц по размерам. Программа «ImageJ» не имеет функции построения графиков распределения, но может передать данные расчета площади и периметра в «Excel». Для этого был установлен специальный плагин «Excel Writer». После установки получен доступ к команде «Excel ToolBar» в программном меню «ImageJ» (рисунок 2.20).

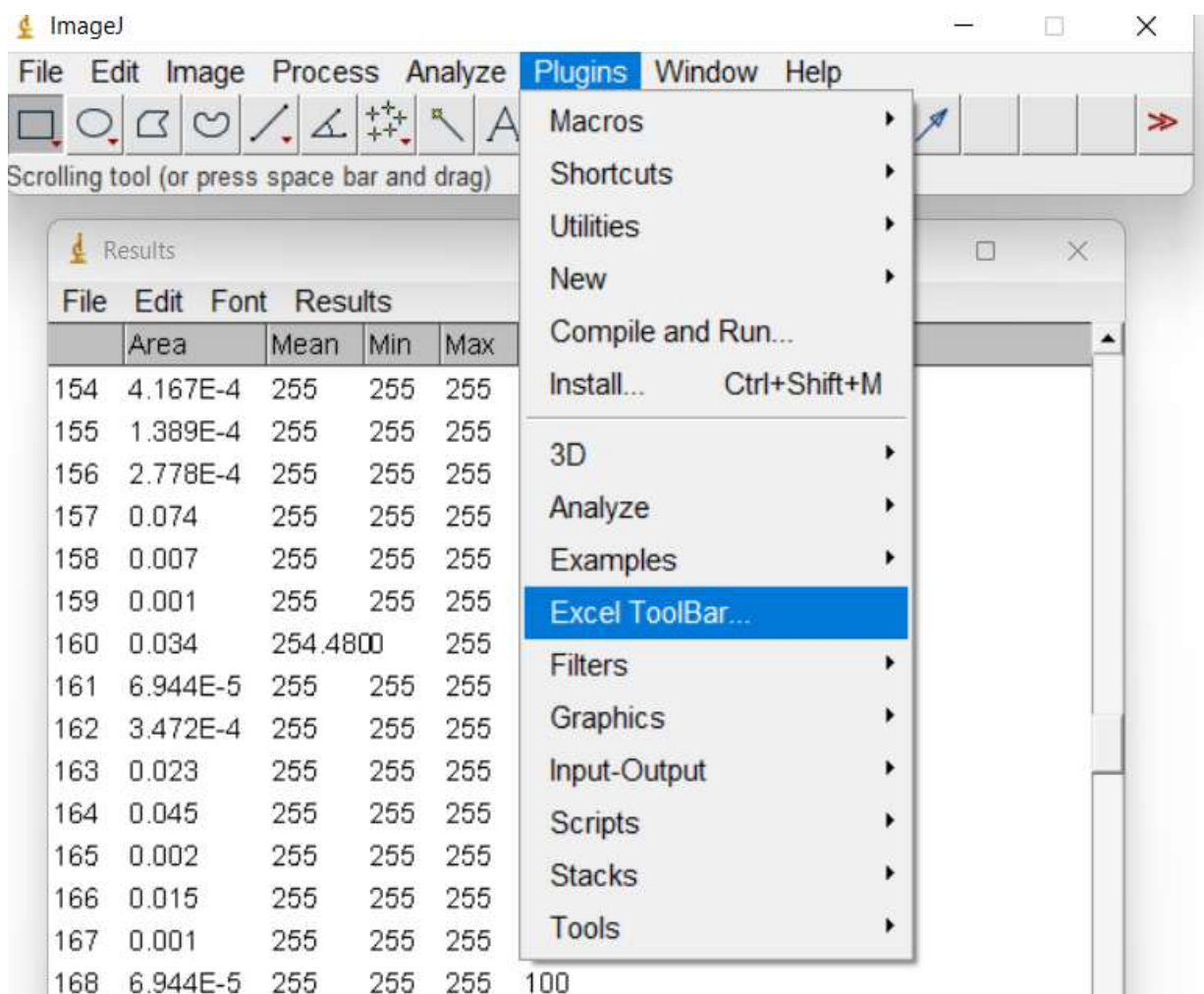


Рисунок 2.20 – Запуск команды Excel Toolbar в программе ImageJ

Как правило, современные анализаторы частиц в качестве результата представляют не площадь и не периметр, а размер частицы, который является эквивалентным диаметром. Этот параметр широко используется при теоретическом описании и расчёте процессов, в которых частицы имеют не шарообразную форму. Эквивалентный диаметр определяется по формуле  $D_{\text{э}}=4S/\Pi$ , где  $S$  – это площадь ( $\text{мм}^2$ ), а  $\Pi$  – периметр ( $\text{мм}$ ) [126].

Распределение частиц по размерам строится по данным эквивалентного диаметра частиц, рассчитанным в программе Excel [127].

Таким образом, с помощью «ImageJ» определены размеры частиц древесины после размола в мельнице, для чего использована оптическая микроскопия. Всего было проанализировано 7158 частиц, разделённых на классы по природе древесины: бук (Б 0-10); дуб (Д 0-10); лиственница (Л 0-

10); ольха (О 0-10); сосна (С 0-10)) и подклассы по числу циклов размола (0 – без размола; 1, 3, 5, 10 циклов размола в дисковой мельнице).

### **2.3.3 Методика оценки плотности сыпучих частиц древесины**

С целью повышения точности измерения плотности сыпучих материалов, в том числе опилок и древесной муки с  $\rho < 1$  г/см<sup>3</sup> была запатентована полезная модель. Поставленная цель достигается тем, что сферическая часть пикнометра выполнена из двух частей, разделяющих ее в диаметральной плоскости пополам и между которыми размещена перфорированная перегородка с размером отверстий,

Пикнометр, представляет собой стеклянный сосуд специальной формы, нижняя часть 1 которого выполнена сферической, верхняя часть 2 также выполнена сферической и соединена с вертикальной цилиндрической трубкой 3, на которой расположена кольцевая горизонтальная метка 4. Между двух частей пикнометра 1 и 2, разделяющих ее в диаметральной плоскости пополам, размещена перфорированная перегородка 5 с размером отверстий, диаметр которых меньше размера твердых частиц. Верхняя 2, нижняя 1 части пикнометра и перфорированная перегородка 5 соединены креплением 6.

Пикнометр для измерения плотности сыпучих материалов с  $\rho < 1$  г/см<sup>3</sup> используется следующим образом. Предварительно взвешенный сыпучий материал засыпается в заранее отсоединенную нижнюю часть пикнометра. Затем на последнюю устанавливается перфорированная перегородка и верхняя часть пикнометра. Далее верхняя перфорированная перегородка и нижняя 1 части пикнометра соединяются креплением 6 (см. рисунок 2.2).

Потом производится заполнение пикнометра жидкостью известной плотности до кольцевой горизонтальной метки 4 на вертикальной цилиндрической трубке 3, фиксирующей определенный объем заполнения пикнометра (25, 50, 100 см<sup>3</sup>) и т.д. Затем осуществляется взвешивание пикнометра, заполненного жидкостью и сыпучим материалом с  $\rho < 1$  г/см<sup>3</sup>, и по известным формулам [8] производится вычисление плотности последнего.

Наличие двух частей пикнометра позволяет заполнить пикнометр исследуемым материалом, а перфорированная перегородка 5 препятствует всплытию материала с  $\rho < 1 \text{ г/см}^3$ , тем самым повышается точность измерения плотности. Разработанное устройство эффективно использовалось в научных работах, связанных с исследованием свойств частиц древесины, входящих в состав древесно-композиционных материалов [128–131].

#### **2.3.4 Методика оценки реологических характеристик жидкого композита на основе древесины и связующего**

Реологические характеристики древесно-полимерного композита оценивались с помощью ротационного вискозиметра «Rheotest RN4.1», параметры которого представлены на сайте производителя оборудования. Прибор внесён в Государственный реестр средств измерений РФ под № 22819–07.

Универсальные ротационные вискозиметры серии «Rheotest» используются согласно ГОСТ 1929–87 «Метод определения динамической вязкости на ротационном вискозиметре», имеют обширную область потенциальных возможностей использования для контроля качества в производстве и лабораторных исследованиях следующих продуктов [43]:

- масла — пищевые масла, моторные масла, жидкие топлива;
- пасты — шоколадные пасты, зубные пасты, кремы для обуви;
- растворы — синтетические растворы, смолы, водные растворы;
- суспензии — краски, лаки, эмалевые шликеры;
- эмульсии — латексы, косметические препараты, буровые растворы, сверлильные эмульсии.

Измерительная система с цилиндром состоит из стакана (стационарно установленного) с затвором и цилиндрическим ротором. Имеются термостатированный сосуд, соответствующий наружному диаметру измерительного стакана, снабженный встроенным датчиком температуры

Pt 100. H1. Система позволяла проводить измерения в диапазоне динамических вязкостей от 1 до  $5 \cdot 10^6$  мПа·с при градиентах скорости от 0,2 до  $2000 \text{ c}^{-1}$ .

Сущность метода состоит в регистрации момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра или конуса измерительного устройства с испытуемым жидким композитом при различных градиентах скорости сдвига и расчете напряжения сдвига и динамической вязкости.

Проводили замеры вязкости эпоксидной смолы отдельно, эпоксидной смолы с отвердителем и двухкомпонентной смесью с добавлением древесной муки. Содержание древесной муки варьировалось от 0 до 30 %.

Процедура измерений заключалась в следующем:

1. Перед заполнением композиционного материала на основе древесной муки измерительный стакан тщательно очищался.

2. После очистки с помощью шприца подавали 40 мл композиционного материала в ёмкость стакана.

3. Ротор соединили с валом привода при поднятой вверх втулке муфты, затем опускали втулку вниз.

4. Открывали муфту измерительной трубки (при повернутой влево рукоятке со сферической головкой).

5. Осторожно поднимали вверх заполненный измерительный стакан через ротор до ограничителя (стакан у ограничителя должен еще легко поворачиваться).

6. Фиксировали измерительный стакан у ограничителя, повернув рукоятку со сферической головкой вправо.

Весь привод с цилиндрическим измерительным устройством помещался в сосуд для термостатирования. После достаточного термостатирования производили измерение. После завершения измерений производили демонтаж в обратной последовательности. Результаты исследований были представлены в виде таблиц, в которых указана динамическая вязкость, градиент скорости, касательное напряжение.



Проводились замеры динамической вязкости отдельно эпоксидной смолы и эпоксидной смолы с отвердителем, а также были получены реологические характеристики смеси с добавлением древесной муки из сосны марки 200. Согласно ГОСТ-16361-79 древесная мука не должна содержать частицы размером более 200 мкм. Это требование было выдержанно благодаря просеиванию через перфорированную сетку. Содержание древесной муки варьировалось от 0 до 30 % по массе. При различных значениях содержания древесной муки температура выдерживалась 20 °С. Также после серий экспериментов был проведён эксперимент по определению вязкости при 40 °С для содержания древесной муки в 30 %, как вероятно возможный уровень нагрева при 3D-печати по технологии LDM (жидкое послойное нанесение). Исследования проводились в диапазоне градиентов скорости сдвига при калибровке прибора глицерином и эпоксидной смолой без отвердителя от 0 до 300 с<sup>-1</sup>, при работе с исследуемым композитом с наполнителем от 0 до 100 с<sup>-1</sup>.

Перед заполнением композиционного материала на основе древесной муки измерительный стакан тщательно очищался. После очистки с помощью шприца подавали 40 мл жидкого композиционного материала в ёмкость стакана. Далее измерительная система помещалась в сосуд для термостатирования. После термостатирования производилось измерение. Результаты исследований представлены в виде данных градиента скорости сдвига, напряжения сдвига и динамической вязкости.

### **2.3.5 Методика исследования термомеханических характеристик композита на основе древесины**

Термомеханические свойства образцов определялись с помощью прибора «DMA/SDTA 861e». Образцы подвергались трёхточечному изгибу (рисунок 2.21) [56, 57].

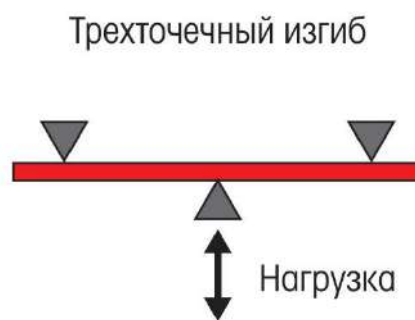


Рисунок 2.21 – Дифференциальный механический анализ по принципу трёхточечного изгиба

Образцы анализировались в диапазоне температур от 20–70 °С. Образцы древесно-полимерного композиционного материала были изготовлены в длину 40 мм, ширину  $\approx 5,1$  мм, толщину  $\approx 1,3$  мм. Разница в размерах образцов была учтена геометрическим фактором.

### **2.3.6 Метод послойного нанесения композита на основе древесины комбинацией технологии LDM и FDM 3D-печати**

Результатом критического анализа источников информации по существующим способам 3D-печати и возможностью использования древесной муки в качестве сырья стала комбинация двух способов 3D-печати: 3D-печать водорастворимым пластиком для создания контура изготавливаемого изделия (FDM 3D-печать) и послойное формование жидким древесно-полимерным композитом, содержащей до 30 % древесной муки (LDM 3D-печать). Технологическая схема представлена на рисунке 2.22. Комбинированная технология FDM и LDM печати позволит изготавливать изделия с более гладкой поверхностью, соответствующей высоте слоя FDM печати (0,1 – 0,4 мм), в отличие от технологии LDM печати из древесной муки, высота слоя при которой варьируется от 8 до 10 мм, что определяет низкое качество поверхности, требующее механической доработки деталей [53, 54].

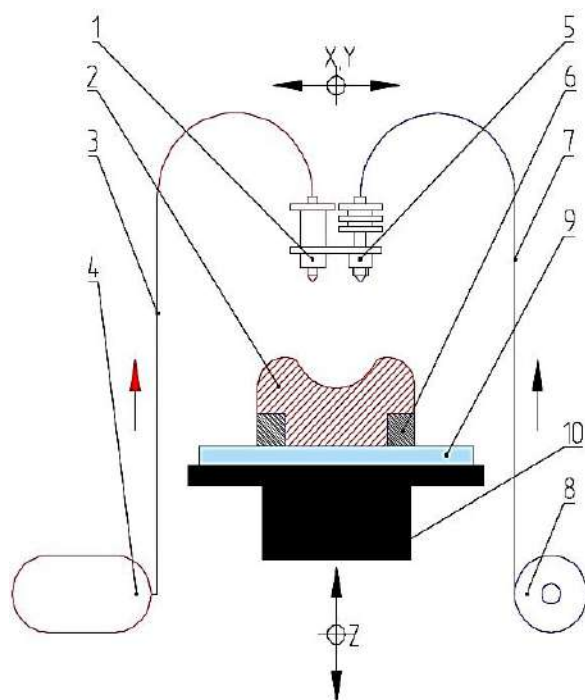


Рисунок 2.22 – Способ комбинирования технологии послойного формования смеси, содержащей древесную муку и экструзии водорастворимого полимерного прутка (LDM+FDM): 1 – экструдер пасты; 2 – изделие; 3– трубка подачи пасты; 4 – бункер пасты; 5 – сопло экструдера; 6 – матрица; 7 – трубка подачи пластикового прутка; 8 – пластиковый пруток; 9 – подложка; 10 – рабочий стол

Для создания изделия со сложной геометрической формой 2 используется двухэкструдерный 3D-принтер, в котором формообразующая поверхность и поддерживающие структуры печатаются растворимым в воде филаментом (прутком) из поливинилового спирта (или PVA-пластика) 8. Пластиковый пруток по трубке 7 проталкивается в предварительно разогретое сопло экструдера 5, в котором пластик расплавляется и наносится слоями на поверхность подложки 9, формируя матрицу будущего изделия 6. Древесно-полимерный композит в жидком виде из бункера 4 поступает по трубке 3 и заполняет образованный слой матрицы за счёт избыточного давления, создаваемого в экструдере 1.

Оба экструдера перемещаются в направлениях X, Y, а при печати каждого нового слоя рабочий стол 10 опускается на толщину слоя вдоль оси Z.

Предварительно проводилось 3D-моделирование образцов для дальнейшего разрушения с помощью программы «AutoCAD» [132, 133]. Моделирование образцов осуществлялось по размерам, представленным в ГОСТ. Согласно предлагаемой технологии 3D-печати выполняется два элемента, один из которых предназначен для печати контура изделия

водорастворимым полимером PVA, который наносили по технологии FDM, а второй для формирования образца 2 из смеси, содержащей древесную муку и связующее, по технологии LDM. Для лучшей фиксации к рабочему столу 3D-принтера, контуры образца могут быть усилены подложкой 3 и ребрами жёсткости 4 (см. рисунок 2.23).

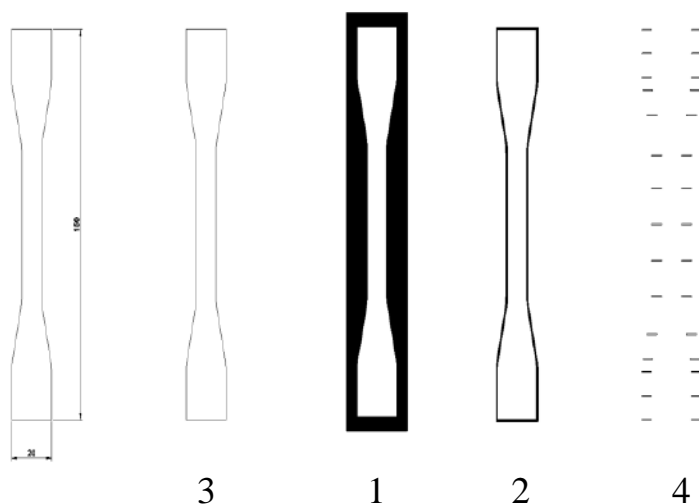


Рисунок 2.23 – Разработка 3D-моделей контуров и образцов для печати по комбинации технологий FDM и LDM:  
 1 – контур образца (PVA);  
 2 – образец (смесь из связующих и древесной муки);  
 3 – подложка (PVA);  
 4 – ребра жесткости (PVA)

Согласно стандарту изготавливается не менее 10 образцов для анализа одного из свойств материала при одинаковом составе компонентов, поэтому на стадии моделирования можно разработать 3D-модель контура изделия для 3 шт. При определении количества моделируемых объектов следует учесть, что в ходе печати возможны сбои, поэтому нежелательно формировать сразу все 10 моделей, достаточно 3, 4 формы. С одной стороны, нет необходимости десять раз загружать 3D-принтер, с другой стороны, если возникнет сбой печати, то в брак «не уйдут» все 10 заготовок. На рисунке 2.24 представлена 3D - модель для трёх контуров, которые изготавливаются с помощью FDM печати.

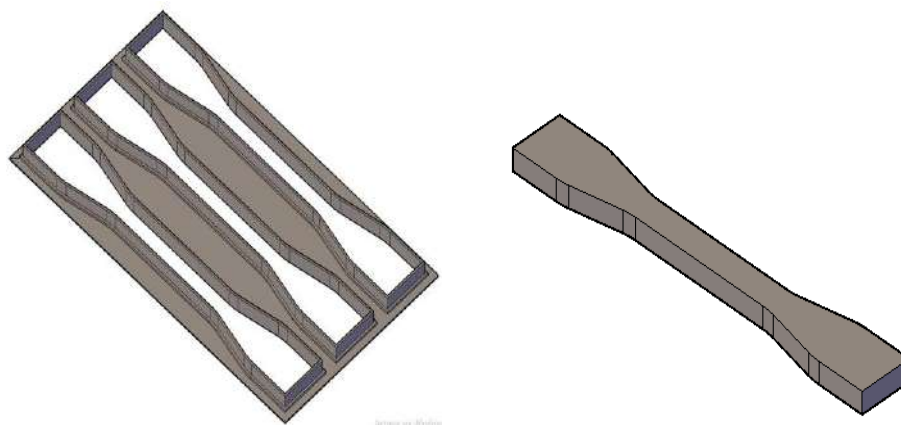


Рисунок 2.24 – 3D-модель контура и образца для печати одним из экструдеров по технологии FDM

Результат 3D-моделирования образца (для изготовления из смеси, содержащей в своей композиции связующее и древесную муку до 30 %) представлен на рисунке 2.24.

Последовательность создания 3D-модели в программах векторного формата следующая:

1. Создание эскиза или чертежа образца, который будет изготовлен из смеси, содержащей опилки по технологии LDM и контура образца, формируемого по технологии FDM водорастворимым полимером по заданным размерам детали в 2D-измерении. Для этого используются команды: линия, полилиния, дуга, окружность, слои, обрезать, удлинить, свойства объекта, переместить.

2. Формирование областей, на основе которых осуществляется твердотельное моделирование образца и контура. Для этого используются команды: редактировать полилинию, область, линия, зеркало, обрезать, удлинить, вычитание, объединение, переместить.

3. 3D-моделирование образца и его контура: 3D-поворот, 3D-перенос, перемещение, выдавливание, вращение, вычитание, объединение.

4. Сглаживание поверхности при необходимости: `facetres` (в AutoCAD).

5. Экспорт файла в формат «.stl».

После твердотельного моделирования «.stl» файл загружается в программу для создания кода, по которому 3D-принтер создаёт образцы для

контроля качества, декоративные изделия и конструктивные элементы оборудования ЦБП. Двухэкструдерные 3D-принтеры, предназначенные для изготовления детали разного цвета, наиболее близки для реализации идеи комбинирования LDM и FDM печатей. Программы кодировки, по сути, являются средствами управления 3D-принтером.

На рисунке 2.25 представлены параметры для программирования 3D-модели, согласно которым указываются наименование экструдера «Left», необходимость подложки, соприкасающейся со столом «Use Raft/Support», и подложки для нависающих поверхностей «Use support material». Для печати жидким древесно-полимерным композитом по технологии FDM необходимо задать заполнение не ниже 90 %, в данном случае 100 %. Высота слоя задаётся максимально возможной 0,3 – 0,4 мм, она будет определять шаг, с которым стол будет снижаться по оси Z. Толщину пограничных слоев «Number of shells» нет смысла задавать при заполнении на 100 % материалом. Большая толщина граней необходима, чтобы качество поверхности при печати не ухудшалось. Важным параметром при печати пастой является отношение скоростей подачи «Feedrate» материала и движения экструдера «Travel rate». В отличие от FDM печати для LDM рекомендуется большая разница на 10–30 мм/с в зависимости от вязкости, которая определяется содержанием опилок в композиции, видом связующего.

Предварительно перед программированием процесса комбинированной 3D-печати по технологиям FDM/LDM необходимо выбрать в программе «Replicator G040» тип машины «Replicator Dual», чтобы программа смогла сформировать файл формата «.gcode», по которому изготавливаются тестовые образцы для разрушения (рисунок 2.26).

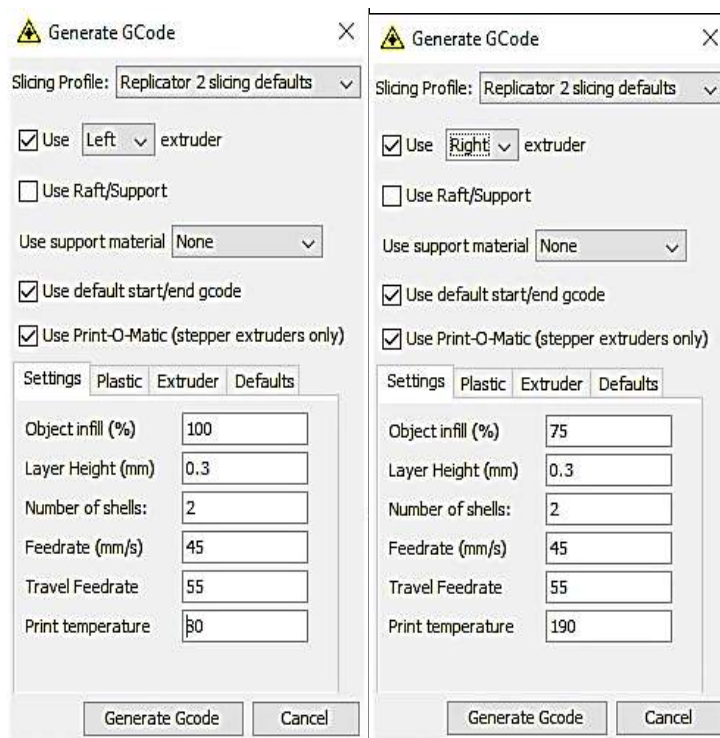


Рисунок 2.25 – Параметры комбинированной 3D-печати по технологии FDM/LDM

В дальнейшем можно контролировать процесс печати, корректируя температуру и скорость обоих экструдеров, один из которых печатает по технологии FDM (характеристики печати для «Right» правого экструдера: «Object infill» (заполнение пластиком) – 75 %; «Layer Height» (высота слоя) – 0,3 мм (предварительное значение); «Feed rate» (скорость подачи) – 45 мм/с; «Travel rate» (скорость движения экструдера) – 55 мм/с (предварительное значение); «Print temperature» – 80 °С. Характеристики второго экструдера «Left»: «Object infill» программируется по следующим показателям для печати водорастворимым полимером (заполнение пластиком) – 100 %; «Layer Height» (высота слоя) – 0,3 мм (предварительное значение); «Feed rate» (скорость подачи) – 45 мм/с; «Travel rate» (скорость движения экструдера) – 55 мм/с (предварительное значение), «Print temperature» – 80 °С.

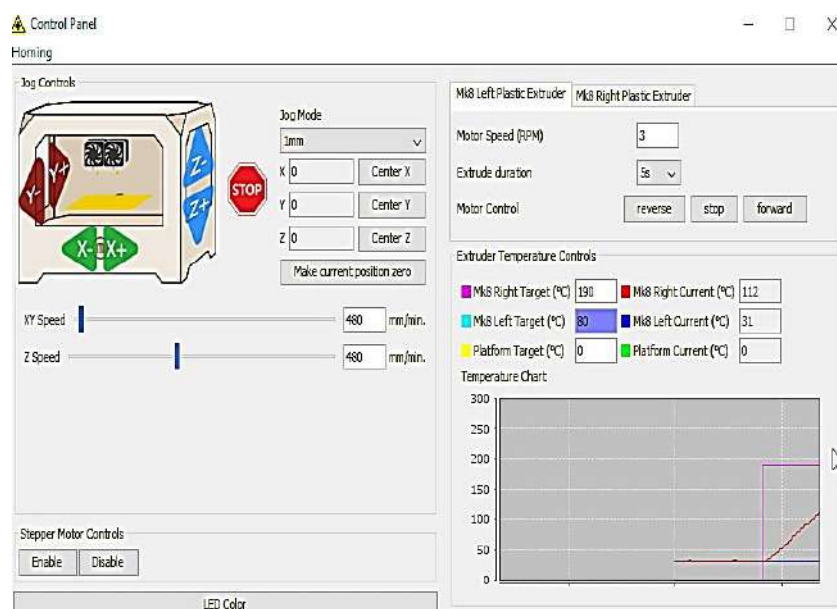


Рисунок 2.26 – Панель контроля за температурой и скоростями печати экструдеров в процессе 3D-печати

### 2.3.7 Методика оценки сопротивления разрыву и сжатию образцов, полученных из композита на основе древесины и связующего

Образцы для разрушения были изготовлены в соответствии с размерами, установленными ГОСТ 11262–80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», ГОСТ 4651–2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие» и с помощью двухэкструдерного 3D-принтера «MBot Cube Dual» [134, 135]. В измерениях использовалось не менее 10 образцов одинакового размера на каждый замер. Образцы соответствовали различным композитам. Были исследованы образцы, содержащие древесную муку от 0 до 40 % с шагом в 10 %.

Изготовленные по предлагаемой технологии образцы фиксировались между рабочими элементами прибора и сдавливались. Скорость, с которой образцы сдавливались, составляла 2 мм/мин, предельное усилие для проведения замеров было установлено в 2000 Н. Устройство позволяет получить типичные кривые напряжения относительной деформации.



Сравнение результатов сжатия различных образцов осуществлялось по усилиям, которые соответствуют пределу текучести (кН) и максимальному усилию сжатия образцов (кН).

Исследовались образцы, полученные на основе эпоксидной смолы с отвердителем, многокомпонентными полиуретановыми пластиками с частицами древесины сосны с содержанием от 0 до 40 %.

### **2.3.8 Методика оценки твёрдости поверхности по Роквеллу**

Существуют различные методы оценки твёрдости материалов. В данном исследовании оценивалась твёрдость материала, а именно способность полученного твёрдого древесно-полимерного композиционного материала сопротивляться пластической деформации или разрушению при местном силовом воздействии.

В данном случае необходимо оценить, в какой степени содержание частиц древесины влияет на твёрдость композиционного материала. При оценке твёрдости был использован метод Роквелла, который позволяет оценивать твёрдость в диапазоне, соизмеримом диапазону твёрдости пластических масс.

Методика испытаний определена ГОСТ 24622–91. «Пластмассы. Определение твердости».

Согласно методу стальной наконечник с индикатором приложенного усилия соприкасается с поверхностью образцов. Диапазон нагрузок, который оценивает данный метод, колеблется от 50 до 115 единиц по Роквеллу.

### **2.3.9 Методика оценки удаления влаги из композиционного материала на основе древесины**

Влагопрочность материалов, содержащих древесную муку, может быть оценена с помощью различных методов испытаний, которые различаются типом материала, его конструкцией. Наиболее простой способ заключается в

испытании на устойчивость к проникновению воды, находящейся на поверхности. Одним из стандартных методов по определению влагопрочности упаковочных материалов, в том числе бумаги и картона, является тест на сопротивление воздействию воды. Этот тест заключается в замачивании образцов в воде на определённое время и проверке потери массы после этого. Результаты теста указывают на надёжность упаковки в условиях высокой влажности. Если рассматривать декоративное изделие для мебели, конструктивные элементы оборудования ЦБП как материал, который может оказаться во влажном помещении или в воде, то применяемый к бумаге и картону метод можно использовать для полной и достоверной оценки. Содержание древесины в композиции смеси, подаваемой с помощью экструдера 3D-принтера, будет определять способность впитывания и удаления влаги.

Исследуемые образцы из двухкомпонентного пластика «Real Cast M6», эпоксидной смолы «Арт-Массив» и специального отвердителя, а также двухкомпонентного пластика «Ерохітах» с содержанием древесной муки из сосны до 40 % с интервалом в 10 % были взвешены с точностью до 0,001 г в воздушно-сухом состоянии при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха в помещении 75 %.

На следующем этапе эксперимента смоченные в течение суток образцы высушиваются с помощью инфракрасной сушилки, установленной в приборе. Устройство позволяет в режиме реального времени оценивать вес образца. Предварительно с образцов удаляется избыток влаги с помощью фильтровальной бумаги. Сушка проводится при температуре 105 °С. Изменение массы образца во времени записываются в таблицу 2.6. Сушка каждого образца проводилась до постоянства массы, о чём свидетельствовал сигнал, который автоматически оповещал по завершении эксперимента [136].

Таблица 2.6 – Запись наблюдений за изменением массы образцов

Время от начала сушки, мин	0	1	$T_{вс}$	3	$T_{к}$
Вес образца, г	$G$	...	$G_{вс}$	...	$G_{к}$

По полученным данным были построены кривые сушки, которые характеризуют способность материала, содержащего древесную муку и связующее, удалять влагу.

## 2.4 Планирование экспериментальных исследований

Экспериментальная часть работы состоит из четырёх основных разделов, соединив которые можно смоделировать процесс изготовления изделий, начиная с подготовки сырья (рисунок 2.27).

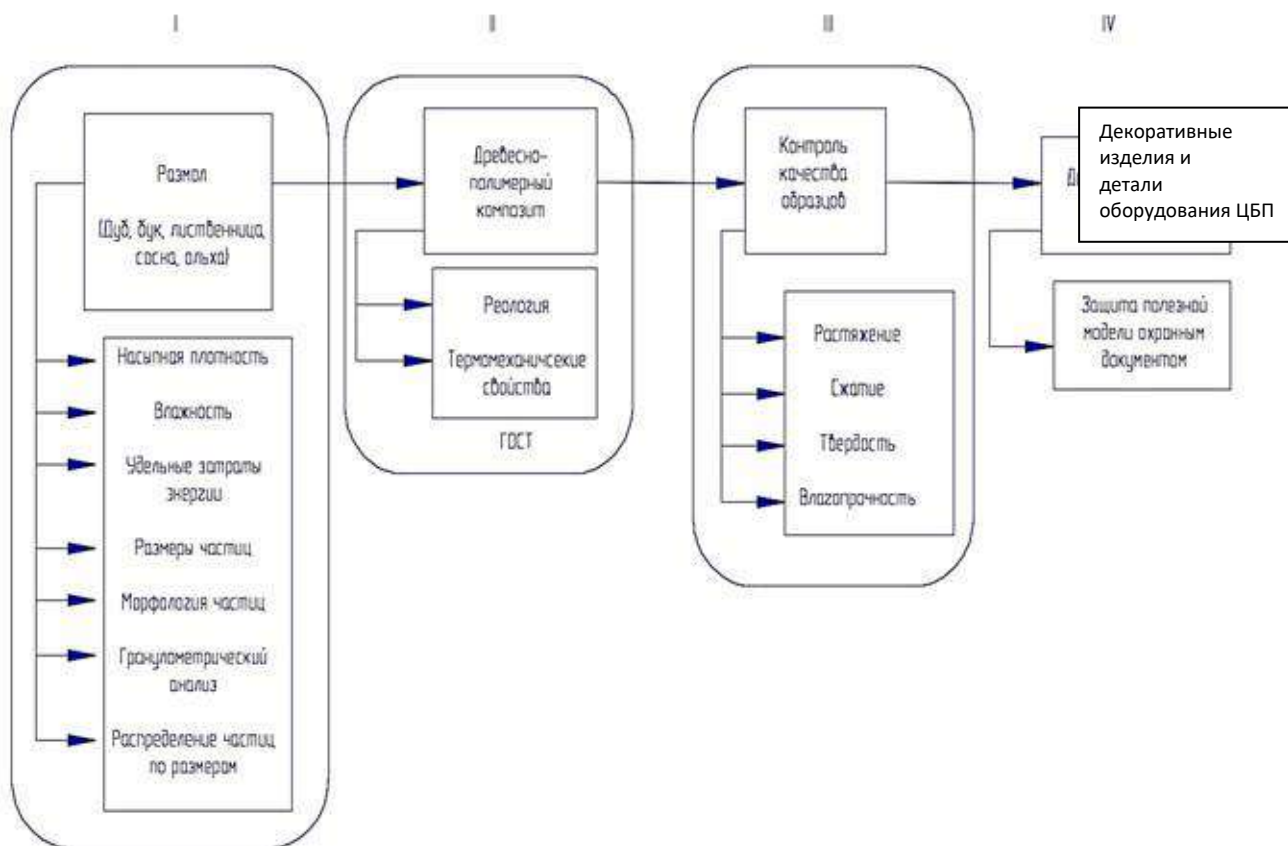


Рисунок 2.27 – План экспериментальных исследований

Раздел I. Экспериментальные исследования по подготовке частиц древесины из различных пород. Этот раздел включает в себя сбор частиц древесины, оценку их физических параметров (влажности, насыпной плотности), экспериментальную оценку удельных затрат энергии на размол с последующим определением размеров частиц древесины различных пород. Целью экспериментов данного раздела является практическая рекомендация по выбору древесины и получение зависимостей удельных затрат энергии от размеров частиц, которые могут быть использованы на практике при подготовке древесной муки из древесины, произрастающей в Северо-Западном регионе нашей страны.

Раздел II включает в себя экспериментальные исследования, которые посвящены свойствам композита, который содержит частицы древесины, рекомендованной по результатам первого раздела. Композиционный материал также содержит двухкомпонентное связующее, которое не встречается в практике изготовления деталей сложной формы путём послойного нанесения. В этой части экспериментов оцениваются реологические характеристики композита в жидком виде при различном содержании частиц древесины. По результатам реологических характеристик при различных содержаниях древесной муки в композите необходимо установить 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 исследований являются основой к разработке устройства для послойного формования по комбинированной технологии экструзии жидкой смесью (LDM) и экструзии прутка из водорастворимого полимера (FDM) (Патент № 220692).

Раздел III. По установленным соотношениям и с учётом предлагаемого способа комбинирования технологий жидкого послойного нанесения композита и экструзии полимерного водорастворимого прутка изготавливаются опытные образцы, по которым оцениваются физико-

механические характеристики. Определяются термомеханические характеристики древесно-полимерного композита, оцениваются сопротивление сжатию, растяжению, изгибу, устанавливается твёрдость и гидрофобность образцов при различном содержании древесины. По результатам третьего раздела предлагается композиционный состав с соотношением компонентов полимера и частиц древесины, который предлагается использовать для выпуска изделий сложной формы.

Раздел IV посвящён опытной выработке сложных по форме изделий с помощью запатентованной модели устройства для послойного нанесения полимера по двум различным технологиям 3D-печати. Экспериментальным путём устанавливаются и корректируются режимы печати двух экструдеров, один из которых наносит композит, содержащий древесную муку, а второй – водорастворимый полимер для поддержания формы.

При проведении испытаний учитывались требования к точности (правильности и прецензионности) методов и результатов измерений [137].

### **3 Экспериментальные исследования по подготовке древесно-полимерной композиции для послойного нанесения**

#### **3.1 Экспериментальные исследования по оценке удельных энергетических затрат на размол древесины различных пород с определённым размером частиц**

В целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей отраслях промышленности на различных стадиях образуется большое количество опилок с разным фракционным составом. Для того чтобы опилки (отходы из древесины) стали сырьем, например древесной мукой, необходим размол. В результате размола получают частицы с небольшим размером, которые можно классифицировать как древесную муку. Для использования частиц в качестве наполнителя в композит, с помощью которого можно послойно наносить изготавливать детали, необходима древесная мука марки 200 с размером частиц не более 200 мкм. Дальнейшее увеличение размеров частиц может привести к ухудшению подачи композита, содержащего древесину, через сопла экструдера. Поэтому необходима экспериментальная оценка размеров частиц после размола. Кроме того, известно, что с уменьшением диапазона размеров получаемых частиц резко возрастают затраты энергии на размол в соответствии с законом Риттенгера от 1867 года [138].

Существует множество способов оценки размеров частиц после размола, одним из них является гранулометрический анализ с помощью анализаторов частиц, например Британского прибора «Mastersizer», который работает по принципу лазерного дифрактометра. Это – дорогой прибор, который, как правило, находится в крупных научных лабораториях. В качестве аналога часто используется оптическая микроскопия в сочетании с графической обработкой полученных изображений. Существует программа с открытым исходным кодом, которая позволяет с определенной и достаточной точностью оценить распределение частиц по размерам. В данном случае погрешность измерений будет связана с погрешностью оптического микроскопа. На практике оптическая микроскопия фиксирует с достаточной

точностью частицы размером более 10 мкм. Качество изображений частиц древесины в основном зависит от встроенной камеры микроскопа и функциональных особенностей программы. В нашем случае необходим диапазон размеров частиц (от 10 до 2000 мкм), который нужен для получения композита, сырья для послойного нанесения экструдером. Размеры частиц менее 10 мкм сложно оценить с высокой точностью, а частицы размером более 200 мкм не интересны с точки зрения использования в качестве основы для композита. На рисунках 3.1 – 3.5 представлены части изображений (для удобства исследованная область, размер которой 50x50 мм не приводилась на всю площадь) областей, полученных с помощью оптического микроскопа для различных пород древесины: бука (рисунок 3.1); дуба (рисунок 3.2); лиственницы (рисунок 3.3); ольхи (рисунок 3.4); сосны (рисунок 3.5).

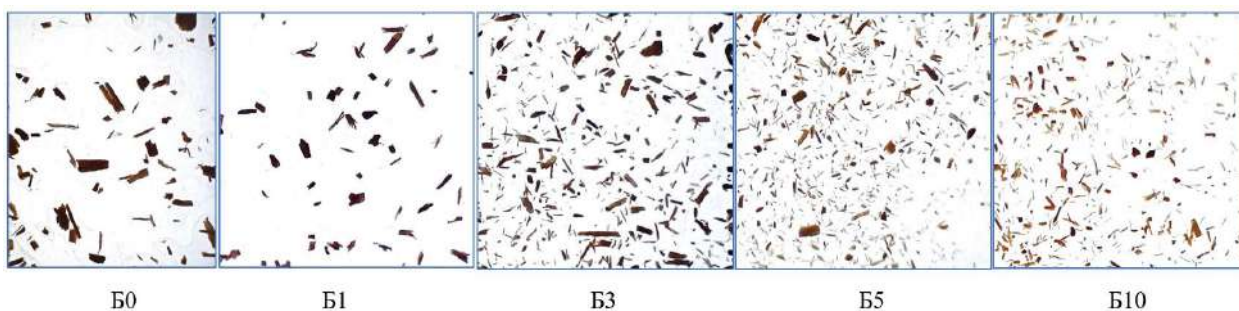


Рисунок 3.1 – Части изображений частиц древесины бука, полученные оптическим микроскопом и цифровой камерой: B0 – частицы до размола; B1 – после первого цикла; B3 – после трёх циклов; B5 – пяти циклов; B10 – 10 циклов

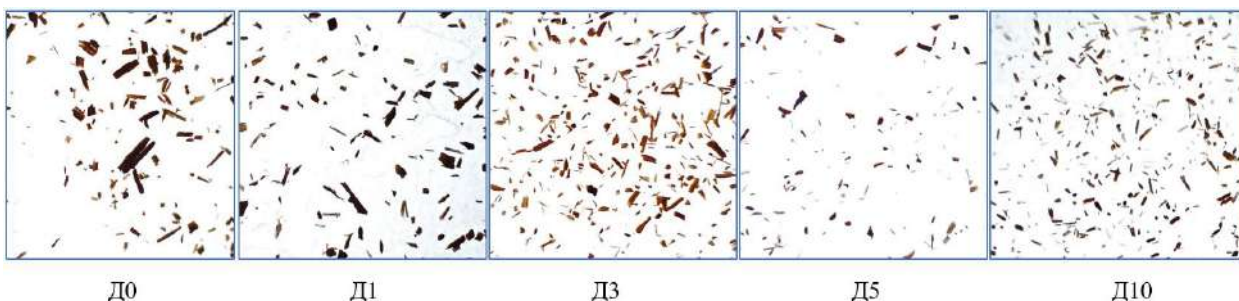


Рисунок 3.2 – Части изображений частиц древесины дуба, полученные оптическим микроскопом и цифровой камерой: D0 – частицы до размола; D1 – после первого цикла; D3 – после трёх циклов; D5 – пяти циклов; D10 – 10 циклов



Л0                      Л1                      Л3                      Л5                      Л10

Рисунок 3.3 – Части изображений частиц древесины лиственницы, полученные оптическим микроскопом и цифровой камерой: Л0 – частицы до размола; Л1 – после первого цикла; Л3 – после трёх циклов; Л5 – пяти циклов; Л10 – 10 циклов



О0                      О1                      О3                      О5                      О10

Рисунок 3.4 – Части изображений частиц древесины ольхи, полученные оптическим микроскопом и цифровой камерой О0 – частицы до размола; О1 – после первого цикла; О3 – после трёх циклов; О5 – пяти циклов; О10 – 10 циклов



С0                      С1                      С3                      С5                      С10

Рисунок 3.5 – Части изображений частиц древесины сосны, полученные оптическим микроскопом и цифровой камерой: С0 – частицы до размола; С1 – после первого цикла; С3 – после трёх циклов; С5 – пяти циклов; С10 – 10 циклов

Таким образом, с помощью «ImageJ» определены размеры частиц древесины после размола в мельнице, для чего использована оптическая микроскопия. Всего было проанализировано 7158 частиц, разделённых на классы по природе древесины: бук (Б 0–10); дуб (Д 0–10); лиственница (Л 0–10); ольха (О 0–10); сосна (С 0–10) и подклассы по количеству циклов размола (0 – без размола; 1, 3, 5, 10 циклов размола в дисковой мельнице). На рисунках



3.1 – 3.5 представлены отдельные области, малая часть от всего анализируемого изображения.

Визуальный анализ изображений, представленных выше, показывает, что с увеличением числа проходов через мельницу размеры частиц уменьшаются в разной степени для различных видов древесины. Причем после 1 цикла размола происходит максимальное снижение размеров частиц. Кроме того, видно, что после размола появляется большое количество частиц с явными признаками изломов, трещин, каверн. Однако для более детального исследования необходимо четко проанализировать размеры каждой частицы в отдельности, после чего получить кривые дифференциального распределения частиц по размерам. С помощью этих кривых можно оценить качество размола на каждой стадии.

Существует рекомендация по выбору параметра дифференциальной кривой распределения, по которой ведётся сравнение. До известной степени выбор наилучшей и наиболее подходящей меры центральной тенденции зависит от шкалы измерений: если имеем данные, извлеченные из номинальной шкалы, то единственно подходящей может быть мода, т.е. пик (вершина кривой) данных размеров частиц. Если данные взяты по ранговой (порядковой) шкале, то подходящей мерой будет и мода, и медиана. Когда данные метрические, интервальные или измерены по абсолютной шкале, то все три меры применимы. Обычно при анализе метрических данных на практике используют более одной меры центральной тенденции. Чаще всего это среднее и медиана [139]. В данном случае в качестве оценки и сравнения кривых распределения частиц по размеру была использована медиана дифференциальной кривой.

Программа «ImageJ» позволила получить данные, по которым можно оценить размеры частиц. В качестве данных были представлены площадь частицы и ее периметр. Для оценки размера частиц используется параметр эквивалентного диаметра, который рассчитывается по формуле  $De=4 \cdot S/P$ , где  $De$  – эквивалентный диаметр частицы;  $S$  – площадь частицы;  $P$  – периметр

частицы. Рассчитанные наборы данных в программе Excel распределялись по интервалам, вследствие чего были получены кривые дифференциального распределения частиц древесины. Всего было исследовано 7158 частиц, представленных ранее на рисунках 3.1 – 3.5. Интервал распределения частиц, как правило, оценивается по формуле Стенджерса [139]. Однако при первом же расчёте оказалось, что рекомендуемый интервал составляет порядка 300 микрометров. В нашем случае необходимым и максимально возможным является интервал в 100 мкм, поэтому кривые распределения были получены в соответствии с этим значением. На рисунках 3.6–3.7 представлены кривые распределения частиц по размерам для разных пород древесины: бука, дуба, лиственницы, ольхи сосны. Кривые дифференциального распределения были сгруппированы по породам древесины. Каждый рисунок включает в себя 5 дифференциальных кривых, которые соответствуют количеству циклов размолва древесины в дисковой мельнице.

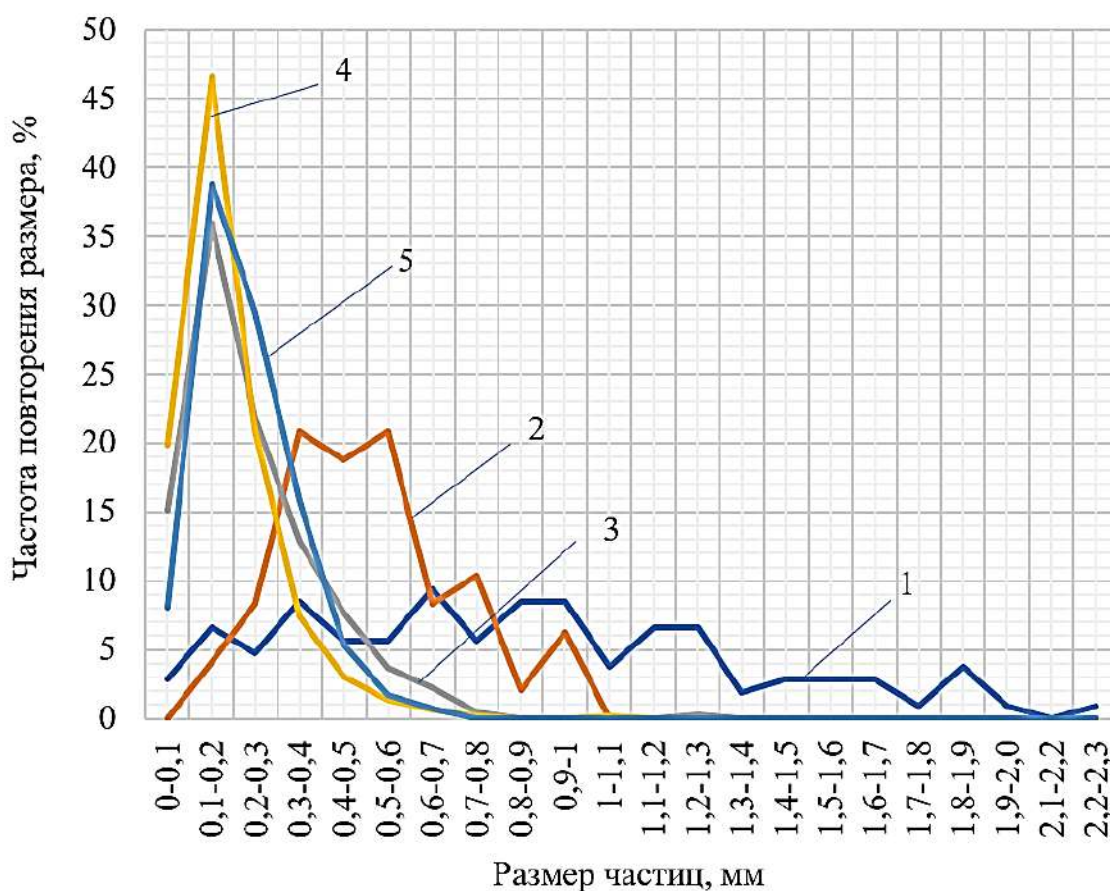


Рисунок 3.6 – Влияние продолжительности размолва бука в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц: 1, 2, 3, 4, 5 – после 0, 1, 3, 5, 10 циклов размолва соответственно

На рисунке 3.6 представлены дифференциальные кривые распределения частиц древесины бука. Кривая 1 соответствует нормальному распределению частиц древесины до размола, среднее значение при этом находится на уровне 851 мкм, наибольший пик соответствует 780 мкм, а медиана составляет 800 мкм. В целом было исследовано 106 частиц. После 1-го размола через дисковую мельницу произошло снижение среднего значения и медианы (493 мкм). Характер распределения остался нормальным, но наблюдалась асимметрия влево, об этом свидетельствует большее значение моды (в пике распределения) в отличие от медианы. Дальнейший размол древесины бука также приводил к снижению размеров частиц. После 10 циклов размола при этом было исследовано уже 661 частиц, медиана составила 161 мкм, а пик 126 мкм. Следует отметить, что при анализе влияния циклов размола на размер частиц отмечено резкое снижение медианы уже после 1-го размола, а в последующем размол с каждым циклом уменьшал значение размеров частиц все меньше и меньше.

На рисунке 3.7 представлена группа дифференциальных кривых размеров частиц древесины дуба. По аналогии с буком с каждым циклом размола древесины снижается размер частиц. Предварительно перед размолом было исследовано 207 частиц в интервале 100 мкм. Среднее значение частиц до размола составила 505 мкм, а характер дифференциальной кривой был нормальный. С дальнейшим увеличением циклов размола также наблюдалось снижение размеров частиц, которое в конечном итоге после 10 циклов составило 127 мкм по медиане, при этом мода, характеризующая пик распределения, была ниже, что говорит об асимметрии влево дифференциальной кривой. Количество частиц с увеличением циклов размола увеличивалась до 808 ед. В целом можно отметить аналогию в изменении частиц в зависимости от числа циклов размола древесины бука. Как известно, эти 2 породы древесины обладают примерно одинаковой плотностью, вероятно поэтому процесс их размола примерно одинаков, о чём

свидетельствует одинаковая динамика изменения частиц, представленная в виде дифференциальных кривых распределения.

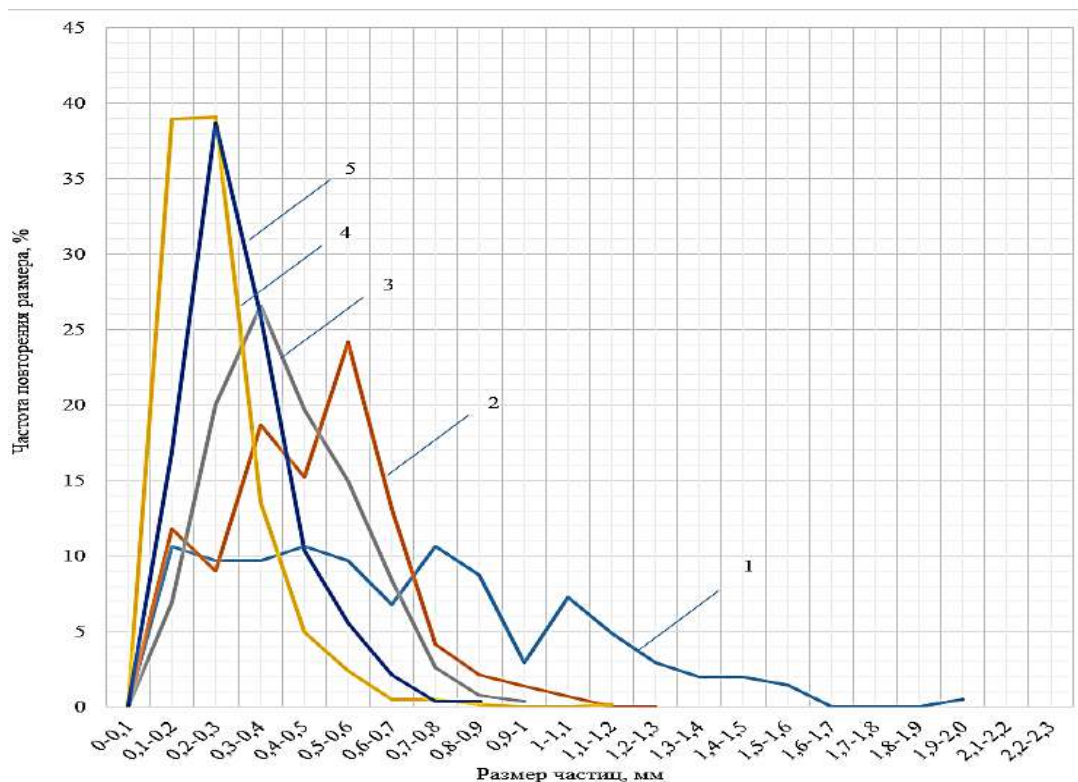


Рисунок 3.7 – Влияние продолжительности размола дуба в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц: 1, 2, 3, 4, 5 – после 0, 1, 3, 5, 10 циклов размола соответственно

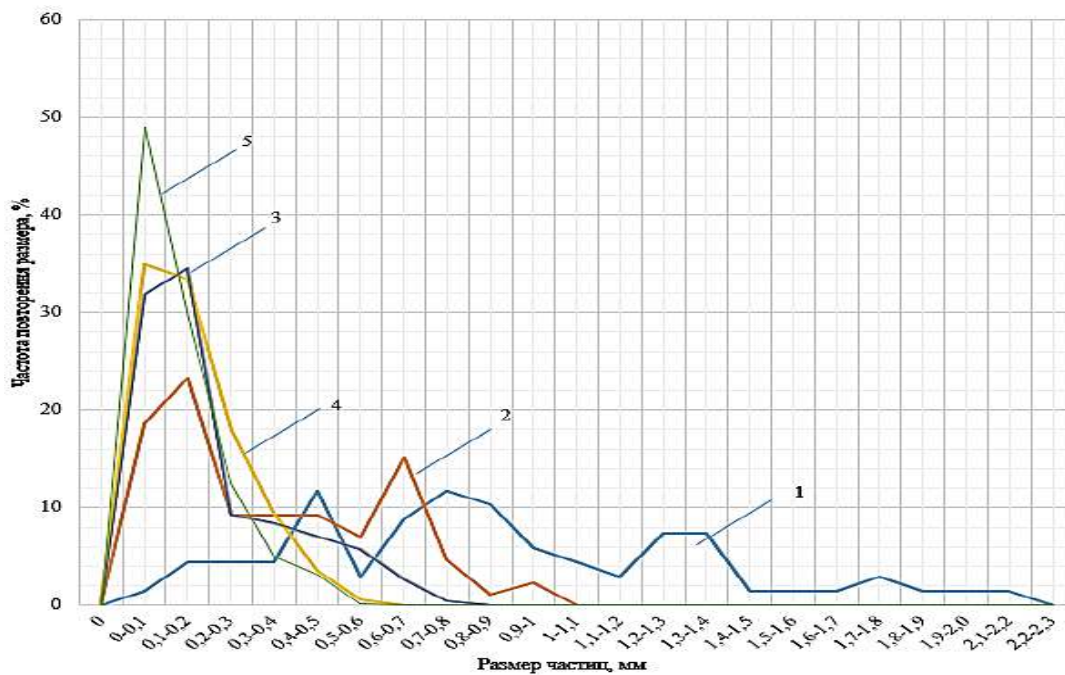


Рисунок 3.8 – Влияние продолжительности размола ливенницы в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц 1, 2, 3, 4, 5 – после 0, 1, 3, 5, 10 циклов размола соответственно

По своей структуре и плотности древесина лиственницы существенно отличается от бука и дуба, а именно плотностью, которая примерно составляет  $370 \text{ кг/м}^3$ . В результате характер распределения частиц по размерам после каждого цикла размола отличается от характера распределения частиц древесины бука и дуба. Каждая кривая, которая соответствует циклам размола имела умеренно асимметричный характер, не подчиняясь нормальному закону распределения частиц по размерам. Кроме того, дифференциальные кривые после 1-го цикла размола и без размола имели ярко выраженную би-модальную составляющую, обладая 2 пиками. Сравнение дифференциальных кривых также проводилась по медиане, которая в начальном варианте находилась на уровне 781 микрометра, после 10 циклов 106 микрометров. Однако уже после 3 циклов медиана была на уровне 135 микрон, который соответствует необходимому значению размера частиц древесины, подходящему для составления композиций. Во всех 3 случаях, соответствующих распределению частиц после 3, 5, 10 циклов размола, мода, то есть пик значений, была ниже медианы, что характеризует асимметрии влево дифференциальной кривой распределения. В отличие от дуба и бука лиственница размолась гораздо быстрее, следовательно, можно утверждать о небольших удельных затратах энергии на размол в отличие от дуба и бука.

На рисунке 3.9 представлены кривые распределения частиц древесины ольхи по размерам. Размер частиц согласно медиане составил 547 мкм. Было проанализировано 155 частиц перед размолом. Первоначально распределение частиц в интервале 100 мкм представило кривую, отличную от нормального распределения, по аналогии с буком и дубом; ольха плавно снижала среднее значение (по медиане) размеров частиц с каждым циклом размола. В конечном итоге, после 10 циклов был достигнут размер частиц 199 мкм, соответствующий медиане кривой 5 на рисунке 3.9 по аналогии с лиственницей, ни одна из кривых не соответствовала закону нормального распределения, за исключением 1-го цикла размола ольхи, остальные кривые были либо отличные от нормали, либо имели умеренно асимметричный

характер распределения. В целом можно утверждать, что и древесина ольхи размалывается при параметрах, средних между характером размола бука и дуба или лиственницы.

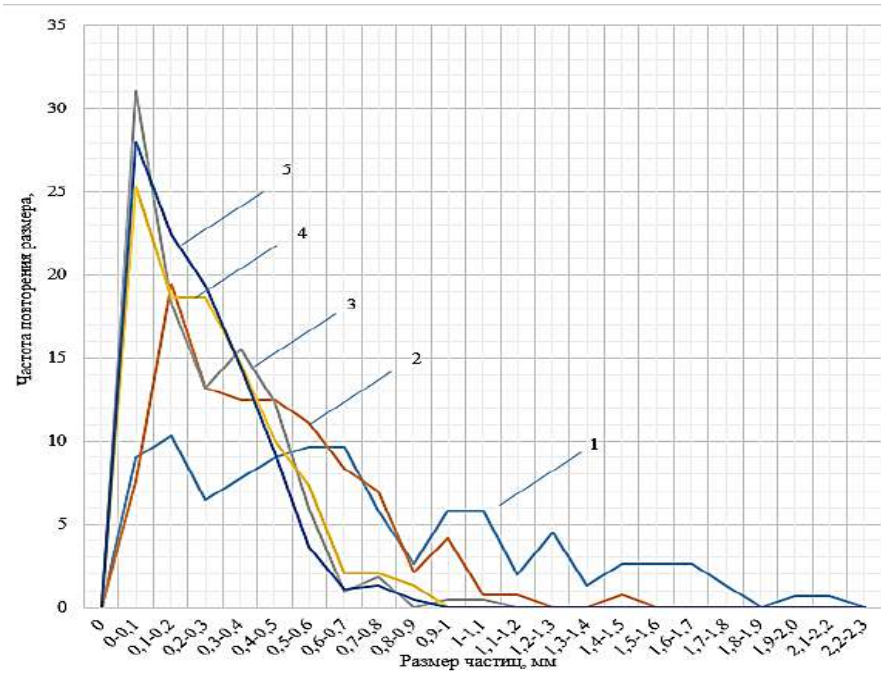


Рисунок 3.9 – Влияние продолжительности размола ольхи в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц: 1, 2, 3, 4, 5 – после 0, 1, 3, 5, 10 циклов размола соответственно

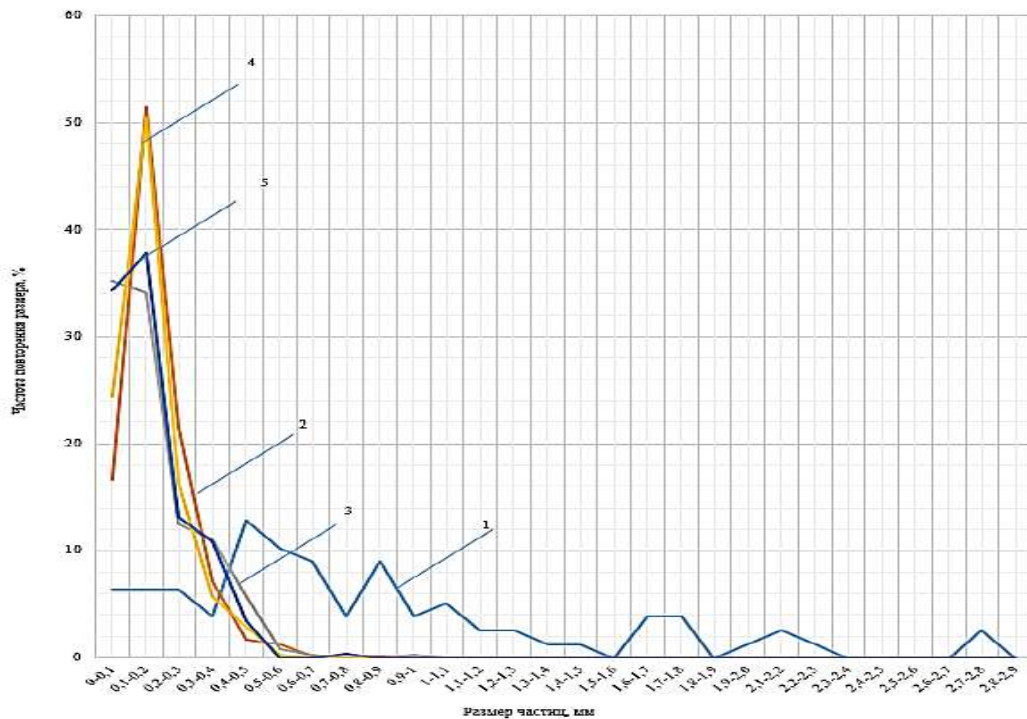


Рисунок 3.10 – Влияние продолжительности размола сосны в лабораторной дисковой мельнице на размеры частиц: 1, 2, 3, 4, 5 – после 0, 1, 3, 5, 10 циклов размола соответственно

Характер распределения частиц древесины сосны, представленной на рисунке 3.10, заметно отличается от распределения частиц других видов древесины. На первоначальном этапе было исследовано 78 частиц, при этом характер распределения кривой отличался от нормального, медиана находилась в пределах 600 мкм, пик повторяемости размеров соответствовал 115 мкм, при этом среднее значение составляла 810 мкм. Такой разброс параметрах распределение частиц означает, что сосна имеет довольно хрупкую структуру и быстро разрушается. Уже после 1-го цикла размола медиана снизилась до 146 мкм, при этом было исследовано 488 частиц, мода, то есть пик распределения частиц, остался на прежнем уровне и составил 112 мкм. Дальнейший размол вплоть до 10 циклов практически не дал результатов, медиана, мода и среднее значение остались практически на том же уровне. Характер распределения частиц был умеренно асимметричным во всех случаях. Вероятно, что дальнейшая обработка в мельнице подобного типа была нецелесообразна, так как практически не менялся размер частиц древесины, однако цель размола заключалась в получении частиц древесины ниже 200 мкм, что было достигнуто после первого же цикла размола, поэтому сосна является наиболее предпочтительной древесиной с точки зрения затрат энергии на размол. Результаты статистической обработки данных представлены в приложении 1.

Представленные ранее графики распределения частиц по размерам позволяют характеризуют особенность размола древесины различных пород. Однако при размоле древесины необходимо оперировать удельными затратами энергии. Эффективность размола определяется зависимостью между удельными затратами энергии и размерами частиц древесины. Сравнив их между собой, можно будет прийти к окончательному выводу о целесообразности использования древесины сосны в качестве сырья для получения древесно-полимерного композита. Для этого были проведены экспериментальные исследования, в которых зафиксировали показания мощности электродвигателя с помощью ваттметра в секунду при размоле

древесины. Размол древесины осуществлялся подачей частиц в дисковую мельницу по 25 г порциями с многократным повторением. Всего было выполнено более 150 замеров мощности, по которым определялись энергетические затраты для каждого вида древесины. При расчете удельных затрат энергии учитывалась влажность древесины, мощности на холостом ходу и пиковые значения мощности, возникающие при подаче материала в мельницу. В результате были получены кривые оценки мощности, зафиксированные при подаче бука, дуба, лиственницы, ольхи, сосны. (рисунок 3.11).

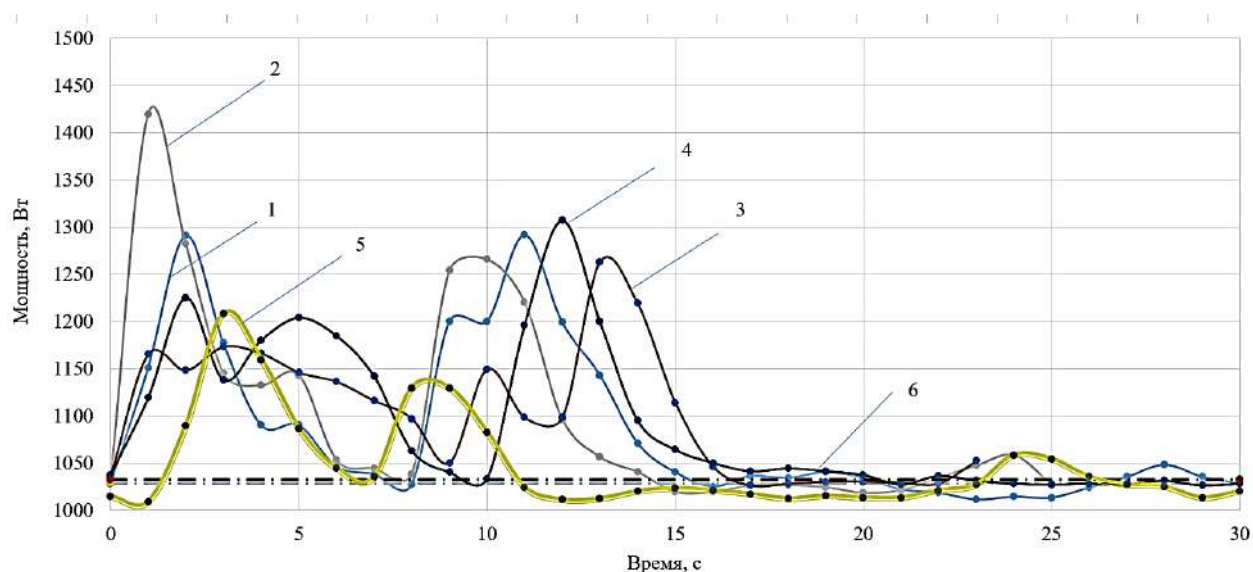


Рисунок 3.11 – Оценка мощности электродвигателя дисковой мельницы при размоле различных пород древесины: 1, 2, 3, 4, 5 – бук, дуб, лиственница, ольха, сосна соответственно; 6 – мощность холостого хода

Из рисунка видно, что наибольший скачок мощности соответствует дубу и буку (1400 Вт). 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 размол в 15 секунд (рисунок 3.11).

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).

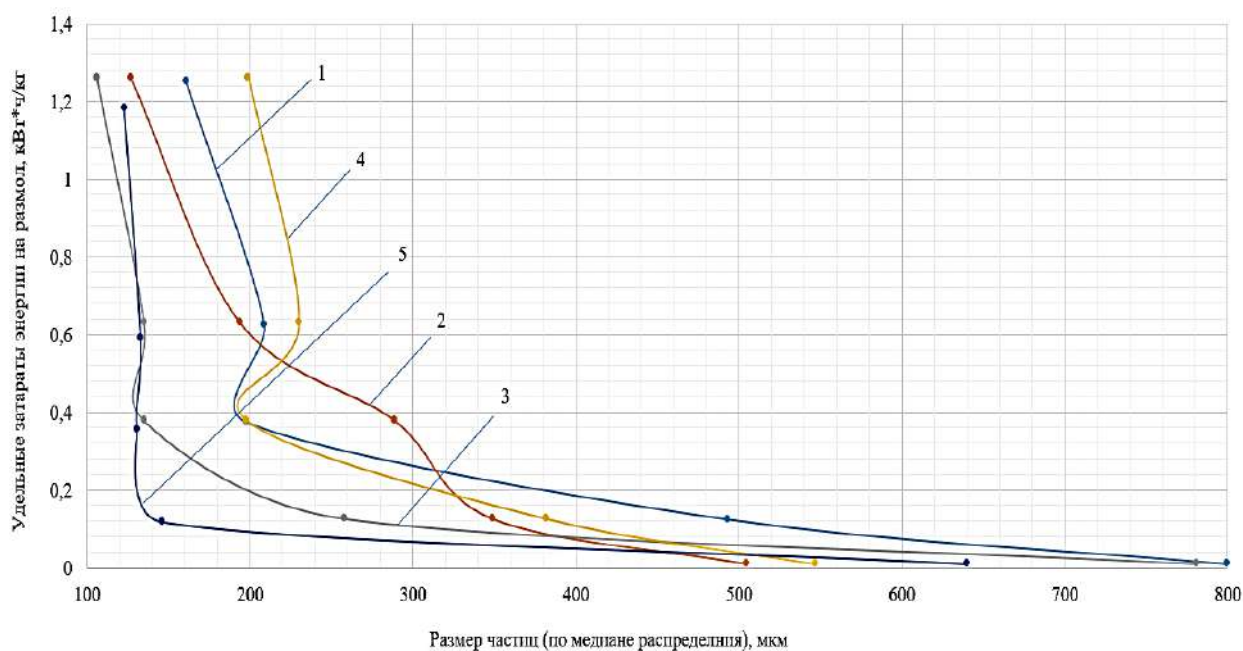


Рисунок 3.12 – Зависимость удельных затрат энергии на размол различных пород древесины от размеров частиц: 1 – бук; 2 – дуб; 3 – лиственница; 4 – ольха, 5 – сосна

Из рисунка 3.12 видно, что сосна после первого цикла, который соответствует 0,118 кВт·ч/кг, размалывается до размеров частиц 131 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.

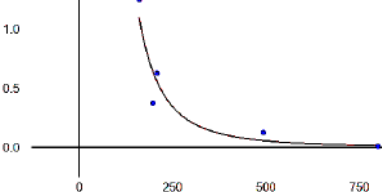
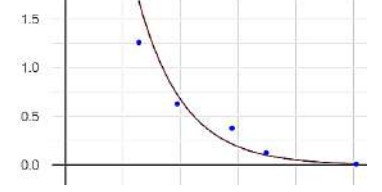
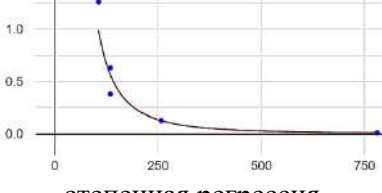
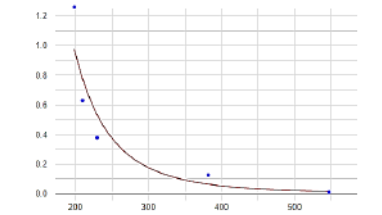
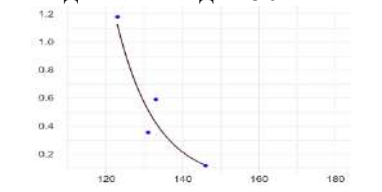
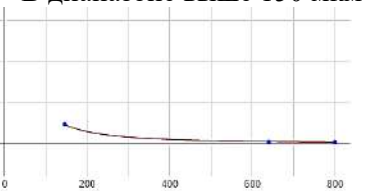
Таким образом, график показывает, что наиболее предпочтительным является древесина сосны, так как на размол древесины требуется гораздо меньше удельной энергии, чем на остальные виды пород древесины. Для разработки практических рекомендаций по оценке затрат энергии на размол с целью получения необходимого размера частиц можно предложить зависимости, полученные на основе экспериментальных данных, представленных на рисунках 3.6 – 3.12. Регрессионный анализ зависимостей удельных затрат энергии ( $E$ , кВт·ч/кг) от размеров частиц древесины ( $\delta$ , мкм), представленных на рисунке 3.12, даёт возможность определить, к какому виду относится уравнение. Коэффициенты в уравнениях определены для конкретного случая, лабораторного размола 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 размолу различные породы древесины:

- для древесины бука  $E=690560,59 \cdot \delta^{-2,6}$  наиболее близка степенная функция;
- для дуба  $E=e^{2,13-0,01 \cdot \delta}$  – экспоненциальная зависимость;
- для лиственницы  $E=47876,5 \cdot \delta^{-2,3}$  – степенная зависимость;
- для ольхи  $E=(35,9 \cdot 10^8) \delta^{-4,2}$  – степенная зависимость.

В отличие от бука, дуба, лиственницы и ольхи, уравнение для сосны пришлось разбить на диапазоны от 150 мкм и выше. В диапазоне до 150 мкм была предложена экспоненциальная зависимость, которая подчинялась уравнению:  $E=e^{12,1-0,1 \cdot \delta}$ . В диапазоне свыше 150 мкм изменение удельных затрат энергии от размеров частиц сосны при размолу подчинялись степенной зависимости, которая определяется уравнением:  $E=236 \cdot \delta^{-1,5}$ .

Индексы корреляции и детерминации были близки к единице во всех представленных выше зависимостях, также были установлены фактические критерии Фишера, которые существенно превышали табличные, поэтому предложенные зависимости можно считать надёжными для конкретных условий проведения размола в лабораторной дисковой мельнице.

Таблица 3.1 – Результаты регрессионного анализа зависимостей удельных затрат энергии на размол различных пород древесины от размеров частиц (приложение к графику рисунок 3.12)

Размалываемая древесина	Зависимость удельных затрат энергии (у) в соответствии с количеством циклов размола от размеров частиц x (по медиане распределения размеров частиц)	Индекс корреляции, R	Индекс детерминации, R <sup>2</sup>	Фактический критерий Фишера	Табличный критерий Фишера
Бук	 <p>степенная регрессия</p>	0,95	0,9	25,7	10,13
Дуб	 <p>экспоненциальная регрессия</p>	0,88	0,78	10,5	10,13
Лиственница	 <p>степенная регрессия</p>	0,94	0,88	22,3	10,13
Ольха	 <p>степенная регрессия</p>	0,93	0,87	19,5	10,13
Сосна	<p>В диапазоне до 150 мкм:</p>  <p>экспоненциальная регрессия</p>	0,95	0,91	19,72	18,51
	<p>В диапазоне выше 150 мкм</p>  <p>степенная регрессия</p>				

Оценены энергетические затраты на размол древесины различных пород с учетом требуемого размера частиц в диапазоне до 200 мкм для последующего создания расходного композита для 3D-печати. Получены зависимости между удельными затратами энергии и размерами частиц древесины различных пород. Оценены удельные энергозатраты на размол различных пород древесины, которые произрастают в Северо-Западном регионе нашей страны. Было установлено, что сосна является наиболее предпочтительной с точки зрения удельных затрат энергии на размол, которая позволяет с минимальными затратами энергии получить необходимый фракционный состав при создании композита с последующим послойным его нанесением с целью изготовления деталей сложной формы с помощью 3D-печати. Для условий подготовки древесины в сравнительно небольших объемах, 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 (Приложение 2).

### **3.2 Определение морфологических характеристик компонентов древесины различных пород с помощью анализатора частиц, электронной и сканирующей микроскопии**

При подготовке древесно-полимерного композита для использования в аддитивных технологиях, таких как 3D-печать, разные породы древесины будут давать дробленые частицы разного размера и формы, будут иметь разную способность поглощать и выделять влагу, а также разную насыпную плотность. Поэтому важным является анализ морфологических характеристик, насыпной плотности и гидрофобности частиц древесины разных пород для определения их пригодности для использования в аддитивных технологиях. Этот анализ дает информацию для разработки

технологии и оборудования для 3D-печати, которая определяет в последствии режимы послойного нанесения древесно-полимерного композита. Выбор оптимальных пород древесины имеет большое значение при адаптации частиц древесины для использования в 3D-печати. При подготовке к 3D-печати особые требования предъявляются к морфологии волокнистого композиционного материала на основе древесины, который должен быть максимально возможно измельчён и должен иметь наиболее равномерный фракционный состав. С помощью сканирующей электронной микроскопии, обладающей большим разрешением, можно детальнее оценить геометрию частиц. На рисунке 3.13 представлены результаты исследования формы частиц, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа.

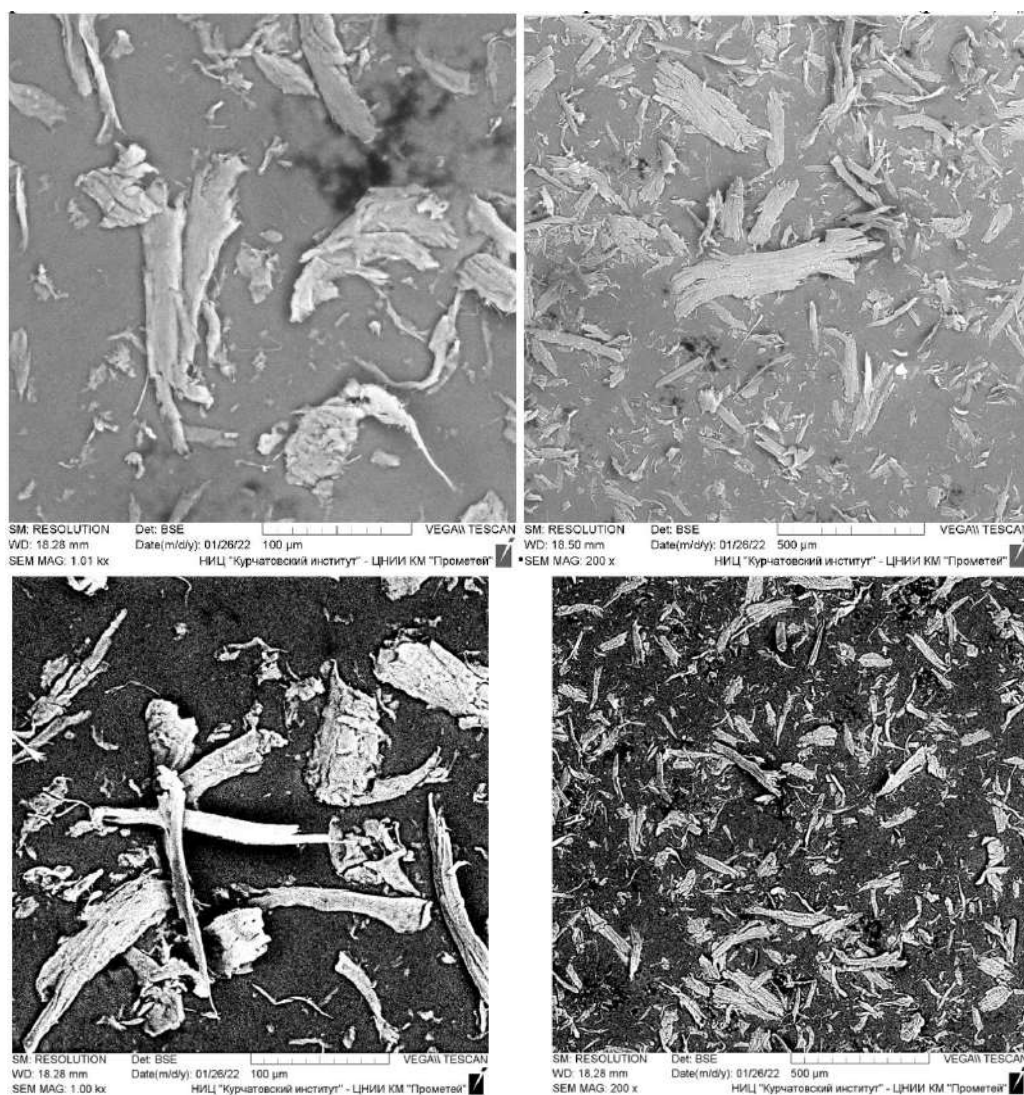


Рисунок 3.13 – Результаты сканирующей электронной микроскопии измельчённых частиц древесных из сосны

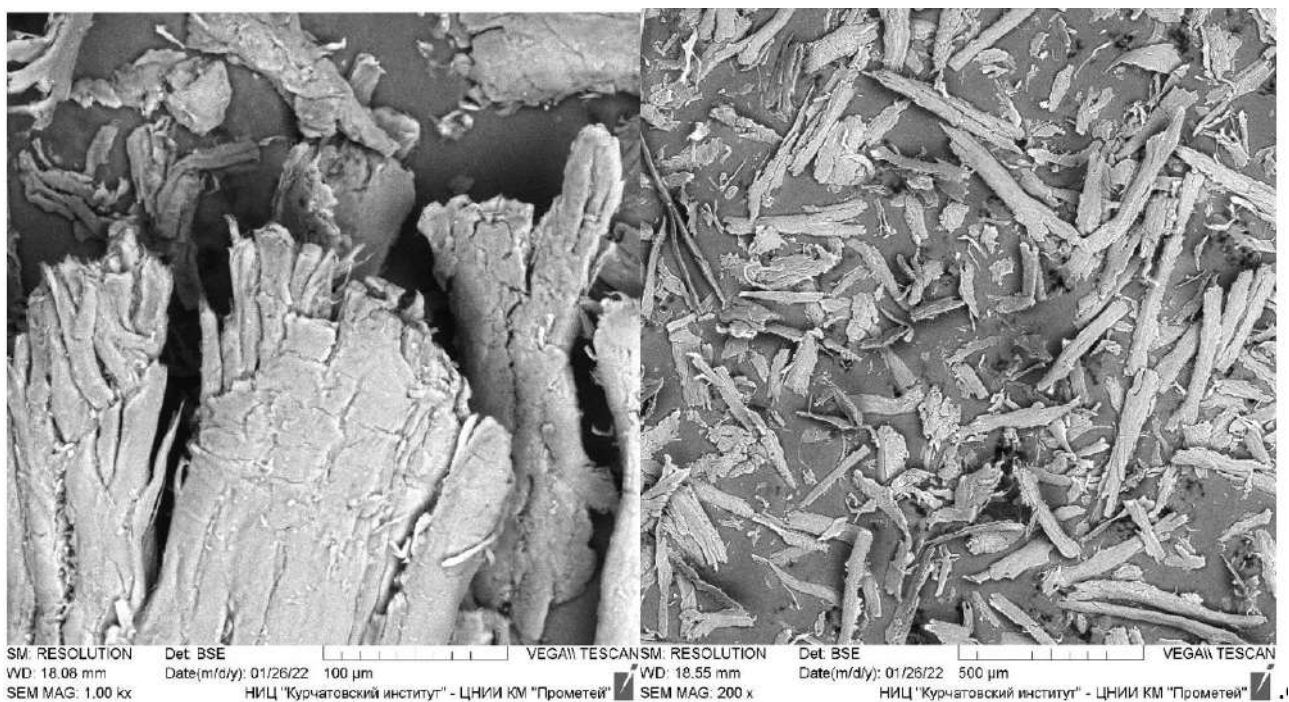


Рисунок 3.14 – Результаты сканирующей электронной микроскопии измельчённых частиц древесных из лиственницы

Сосна и лиственница являются хвойными породами древесины, поэтому в отличие от лиственных пород не имеют перфорированную стенку (рисунок 3.13).

Известно, что древесина покрытосеменных деревьев (лиственных пород) имеет перфорированные волокнистые стенки [140]. На рисунке 3.15

наглядно видны перфорации на стенках волокон. Такое строение стенки может привести к появлению древесно-полимерного композита с неравномерным фракционным составом древесной муки, также может сказаться на впитываемости и насыпную плотность частиц, подготовленных к 3D-печати.

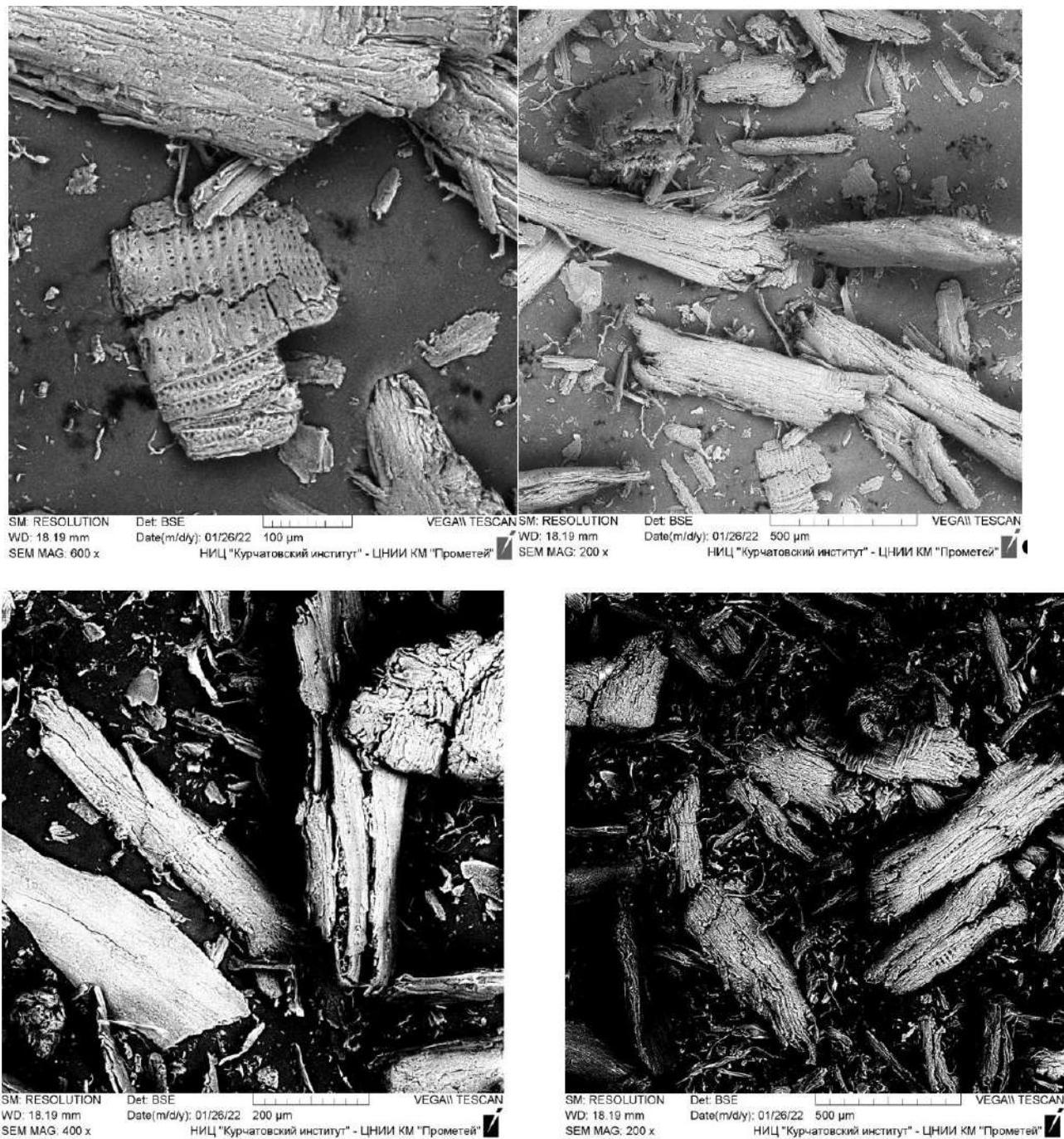


Рисунок 3.15 – Результаты сканирующей электронной микроскопии измельчённых частиц древесины из дуба

Подобное дубу распределение частиц по размерам соответствует буку и ольхе. Ольха, как и дуб относится к лиственным породам древесины и при

равных условиях размола содержит некоторое количество крупной фракции, а более мелкая фракция также оказалась в основном в диапазоне размеров частиц до 200 мкм с небольшим смещением в большую сторону в отличие от дуба и бука. Результаты визуальной оценки (рисунок 3.16) позволили определить формы и размеры частиц получены с помощью сканирующего электронного микроскопа.

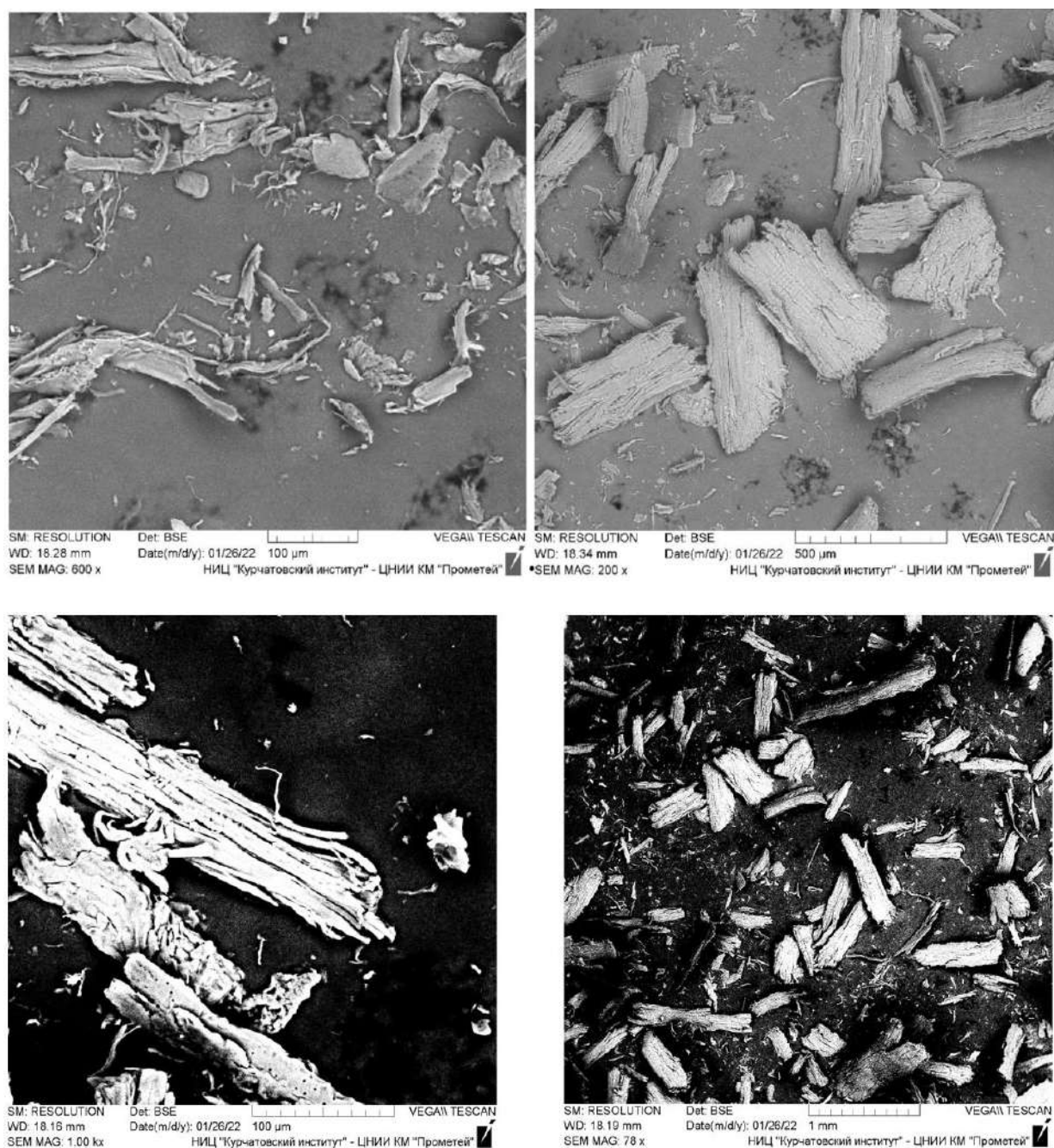


Рисунок 3.16 – Результаты сканирующей электронной микроскопии измельчённых частиц древесины из ольхи



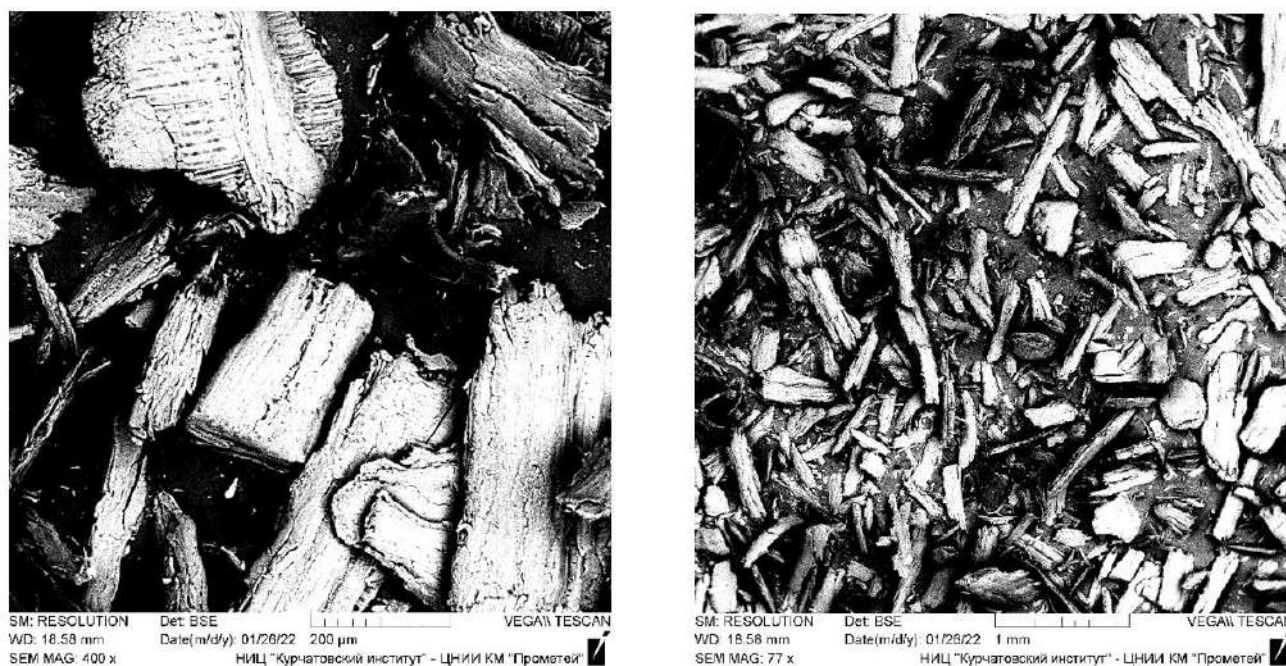
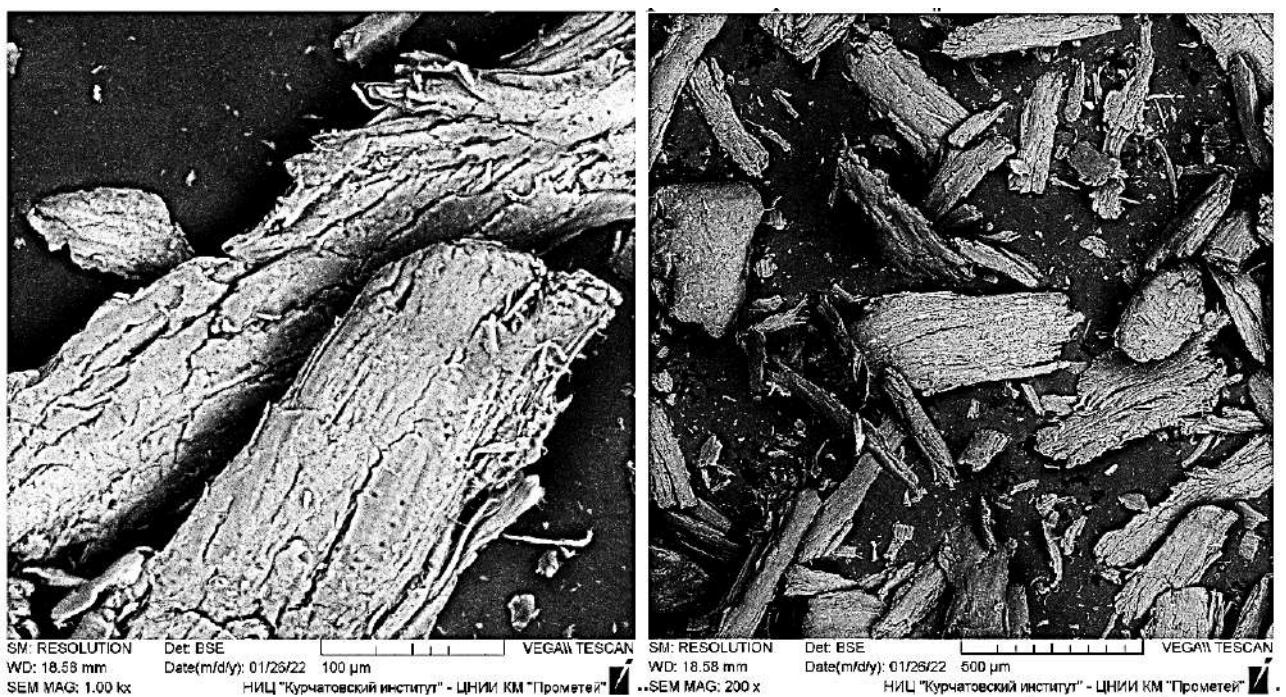


Рисунок 3.17 – Результаты сканирующей электронной микроскопии измельчённых частиц древесины из бука

Для сравнения был исследован гранулометрический состав частиц гипсополимера, который в виде порошка используется для 3D-печати по технологии «Binder Jetting» (рисунок 3.18). Согласно данным оценки современного состояния исследований материалов для 3D-печати это

единственный полимер, который в насыпном виде наносится на рабочий стол 3D-принтера.

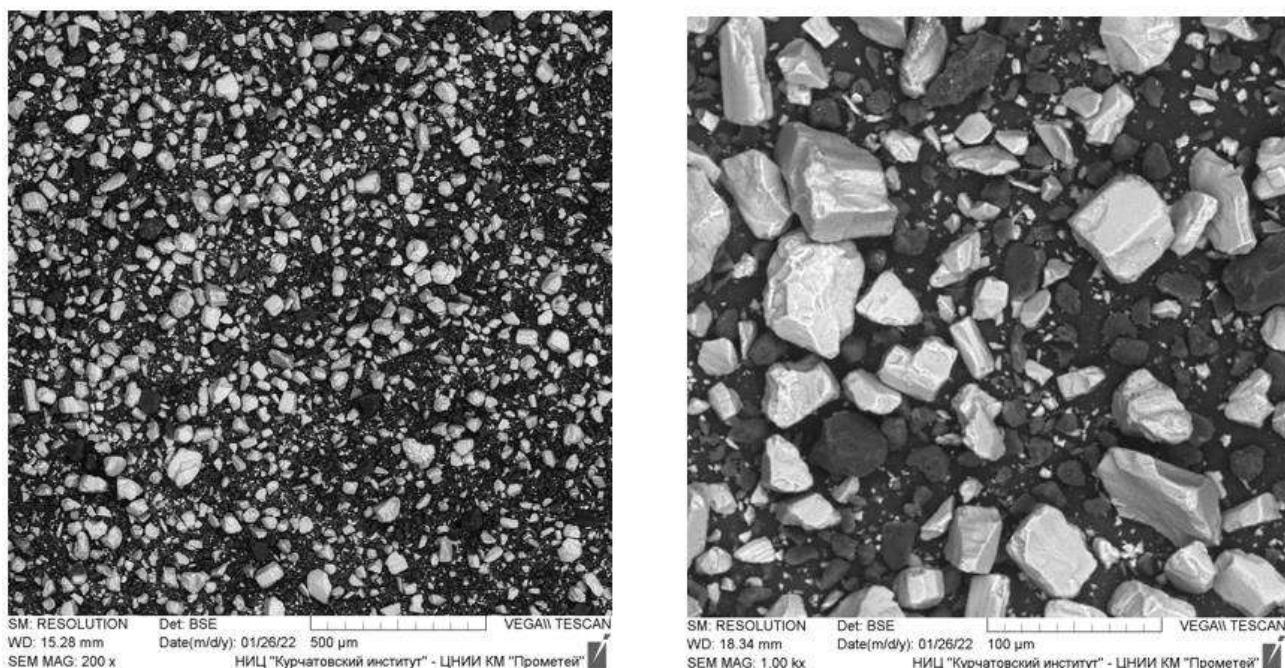


Рисунок 3.18 – Результаты сканирующей электронной микроскопии частиц гипсополимера

Результатом гранулометрического анализа являются зависимости, характеризующие распределение размеров частиц древесины. В идеальном варианте график распределения размеров волокнистого материала должен полностью совпадать с графиком гипсополимерного композита, который сегодня используется при 3D-печати.

Из рисунка 3.19 видно, что при равных условиях подготовки древесины, частиц в диапазоне от 10 до 100 мкм больше у волокон сосны. Остальные виды древесины, в особенности ольха, по фракционному составу существенно отличаются от замещаемого композита.

Согласно данным рисунка 3.19 доля частиц древесины в сосне составляет 37,4 % в диапазоне размеров частиц от 10 до 100 мкм.

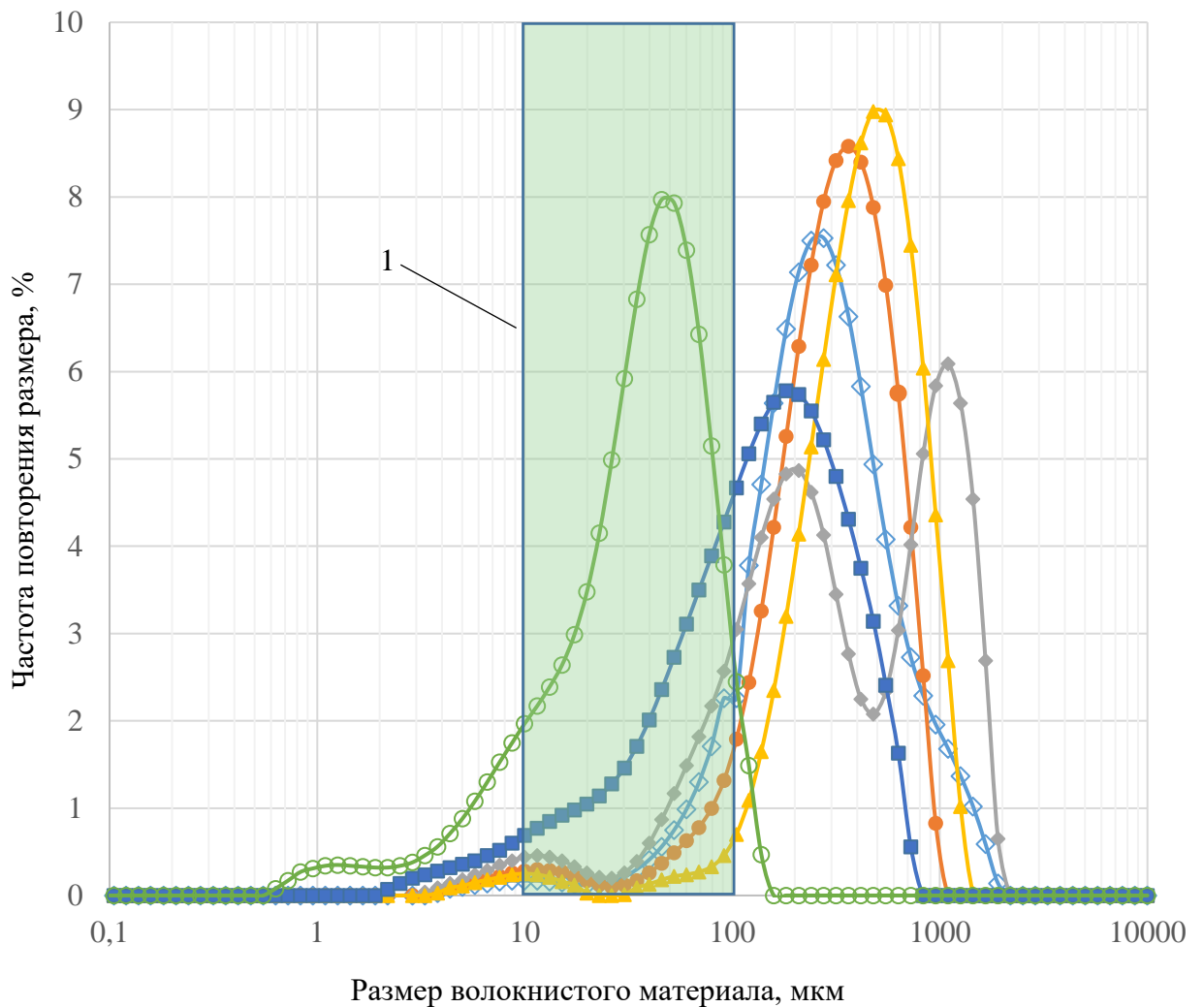


Рисунок 3.19 – Распределение волокон по размерам различных пород древесины:  
 — бук; — дуб; — лиственница; — ольха; — сосна;  
 — гипсополимер зарубежного производства; 1 – область для сравнения импортного сырья для 3D – печати в диапазоне от 10 до 100 мкм

Из рисунка 3.19 можно заключить, что частицы древесины сосны являются наиболее предпочтительными для замены импортного материала аддитивной технологии. Выход древесной муки, пригодного для 3D-технологии при замещении гипсополимера, составил 37,4 % при использовании сосны; 17,1 % – лиственницы; 11,9 % – бука; 8,7 % – дуба; 3,6 % – ольхи. Содержание частиц гипсополимера, которые находятся в диапазоне от 10 до 100 мкм составляло 86,2 %. Следует также отметить, что поверхность

частиц древесины, в отличие от гипсополимера более развитая, что может положительно сказаться на образовании связей между волокнами. Частицы гипсополимера более гладкие, ровные, близки к шарообразной форме. Можно дать рекомендации для изделий, прочность которых не является определяющей величиной [54, 105].

Из рисунка 3.19 можно заключить, что волокна древесины 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 3D-печати.

### **3.3 Исследование реологических характеристик древесно-полимерного композита в жидком виде**

Использованный в работе метод и прибор позволили установить неньютоновское состояние жидкости по показателю текучести. При широком диапазоне текучести существует возможность обработки данных по закону Кросса, при котором фиксируется кажущаяся вязкость [45]. Такой вариант рекомендуется использовать для пастообразных смесей, в том числе для древесно-полимерных композитов. В зависимости от концентрации твердых частиц смесь может иметь предел текучести, который характерен бингамовскому течению [46, 47]. Законы распределения Гершеля-Балкли и Кассона и Чойшнера в работе не рассматриваются, так как работа 3D-принтера не предполагает свойств твердого тела при подаче ее через экструдер. Предварительно было установлено, что концентрация частиц древесины до 30 % в композиционном материале не переводит материал в твердое состояние.

В качестве калибровки прибора использовался глицерин с заранее известной вязкостью. Для этого в течение 20 минут производилось термостатирование при температуре  $20 \pm 0,05$  °C. Максимальное отклонение

вязкости по закону Ньютона не превысило 5 %. Стандартное отклонение составило 0,998. Помимо экспериментов, проведённых с использованием глицерина, было проведено пять серий эксперимента с разным содержанием древесной муки (в интервале градиента скорости сдвига от 0 до  $100 \text{ c}^{-1}$ ) и отдельно проведён опыт с эпоксидной смолой без отвердителя в диапазоне градиента сдвига от 0 до  $300 \text{ c}^{-1}$ . В данном случае (согласно заявленной производителем информации о двухкомпонентном связующем) система со временем меняет свою структуру и агрегатное состояние, что делает её тиксотропной. Эксперименты проводились в течение 20 мин, поэтому тиксотропность не учитывалась. Для послойного нанесения большое значение имеет диапазон времени от 2 до 10 часов, что является средним временем для изготовления небольших деталей. В качестве удерживающего контура используется водорастворимый полимер (поливиниловый спирт).

Следует отметить, что вид древесины практически не влияет на реологические характеристики полимерного композиционного материала в диапазоне концентрации древесной муки марки 200 до 30 % как отмечается в работе [47].

Согласно предварительным экспериментам было установлено, что в исследуемом диапазоне времени тиксотропия древесно-полимерного композита существенно не проявлялась. При содержании древесины более 35 % материал приобретал вязкоупругие свойства, при этом вязкость выходила за пределы диапазона, характерного для измерительных систем.

Реологическая характеристика представлена в виде зависимости касательного напряжения (напряжения сдвига) от градиента скорости. На рис.3.20 показаны реологические характеристики композиционного материала, содержащего до 10 % древесной муки марки 200, измельчённых до размеров менее 200 мкм.

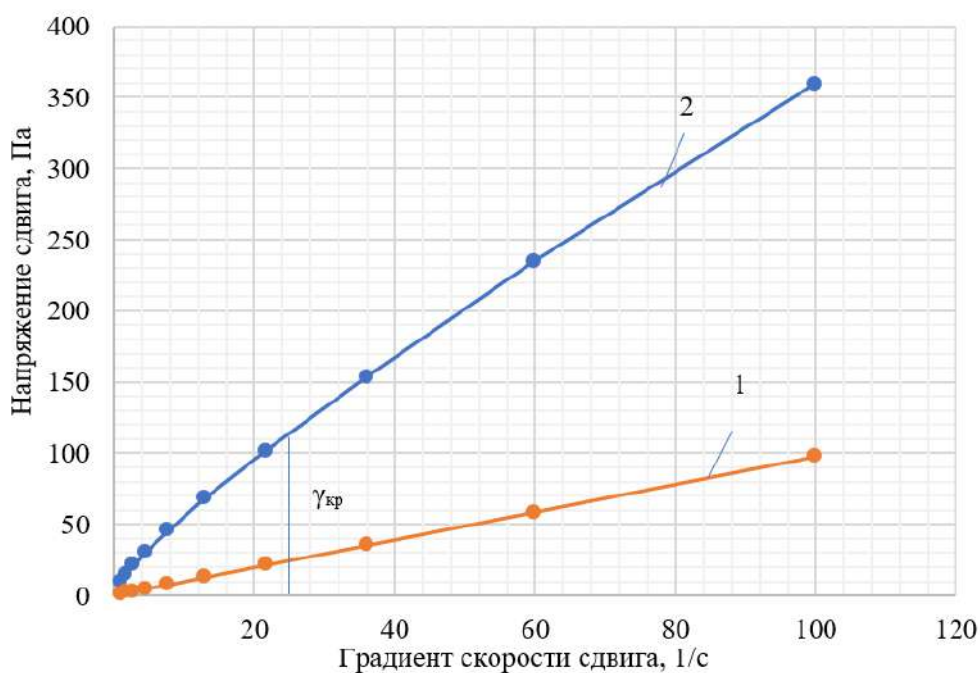


Рисунок 3.20 – Реологические характеристики композита на основе древесной муки из сосны и эпоксидной смолы с отвердителем; 1 – без частиц древесины; 2 – при содержании древесины 10 %

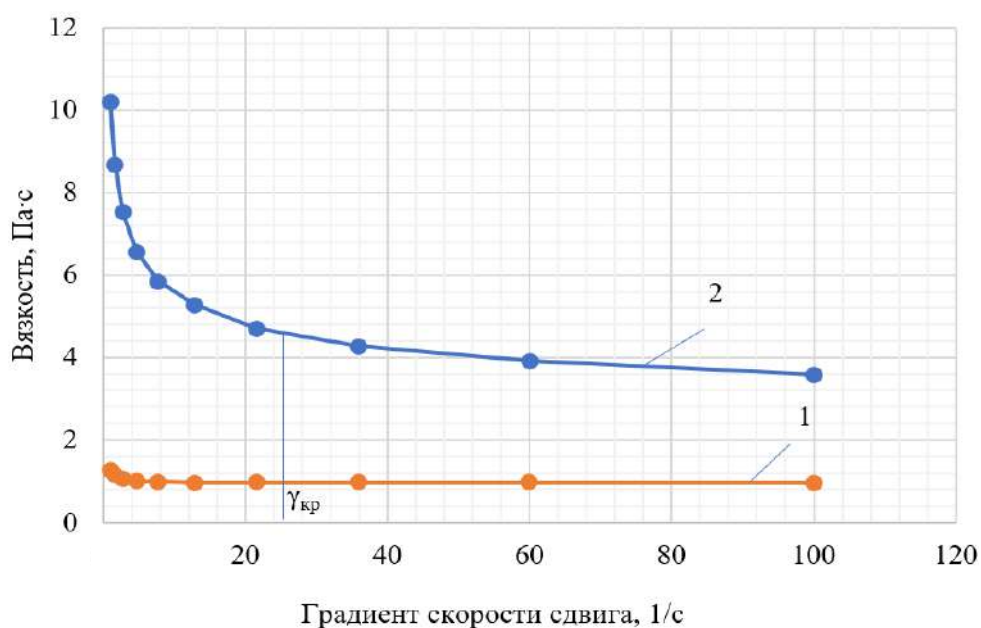


Рисунок 3.21 – Изменение вязкости композиционного материала на основе древесной муки из сосны и эпоксидной смолы с отвердителем в зависимости от градиента скорости сдвига: 1 – без частиц древесины; 2 – при содержании древесины 10 %

Из рисунка 3.20 видно, что двухкомпонентное связующее в чистом виде является ньютоновской жидкостью. Известно, что при добавление древесной муки реологическая характеристика меняется в малых диапазонах градиента

скорости сдвига, в основном в сторону псевдопластичного поведения. Например, небольшое отклонение в сторону псевдопластичности наблюдалось при содержании частиц 10 % (линия 2 рис. 3.20). Критический градиент скорости сдвига, при котором жидкость из псевдопластичного состояния переходила к ньютоновскому, составлял примерно на уровне  $25 \text{ с}^{-1}$ . Можно предположить, что в диапазоне содержания древесной муки от 0 до 10 %, композиционный материал будет в основном обладать свойствами близкими к ньютоновской жидкости.

При концентрации твёрдой фазы до 10 % бингамовской составляющей жидкости не наблюдалось, так как предел текучести композита находился в начале координат. На рисунке 3.21 представлены данные динамической вязкости в зависимости от градиента скорости. Для 3D-печати такой вариант (до 10 % древесной муки в композите) интересен с точки зрения высокого качества получаемых изделий, однако повышение доли древесной муки в композиции позволило бы существенно удешевить материал для аддитивных технологий.

С повышением доли твёрдых частиц неньютоновская составляющая (с признаками псевдопластичности) имеет ярко выраженный характер. При содержании частиц 20 % вязкость увеличилась на два порядка (относительно нулевого содержания) в диапазоне градиентов сдвига до  $10 \text{ с}^{-1}$  (рисунок 3.22, линия 1). При этом неньютоновская составляющая древесно-полимерного композита проявлялась до значений градиента скорости сдвига  $\sim 25 \text{ с}^{-1}$ , однако имела более ярко выраженный изгиб. При концентрации 20 % жидкий композит можно отнести к жидкости имеющей, предел текучести которой находится в диапазоне напряжений сдвига от 300 до 450 Па (рисунок 3.22, линия 1). По результатам регрессионного анализа предел текучести составил 305 Па (таблица 3.2).

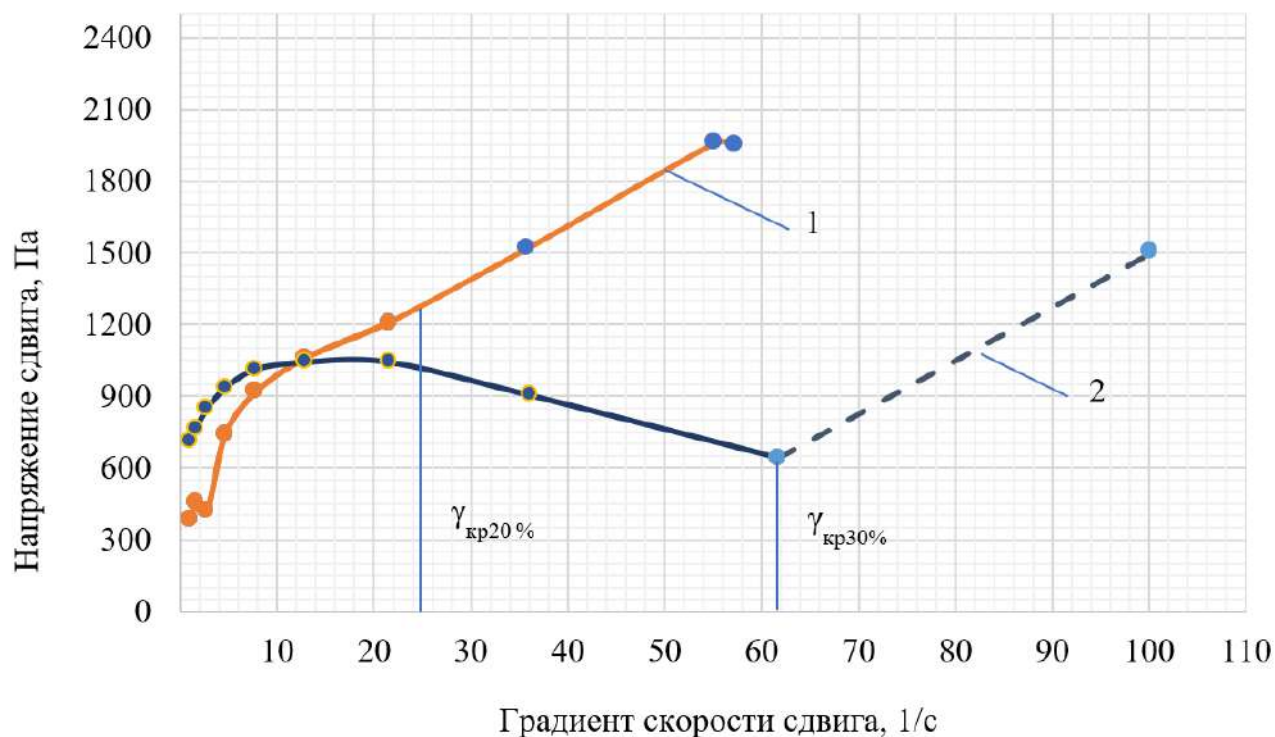


Рисунок 3.22 – Реологические характеристики композита на основе древесной муки из сосны и эпоксидной смолы с отвердителем; 1 – при содержании древесины 20 %; 2– 30%

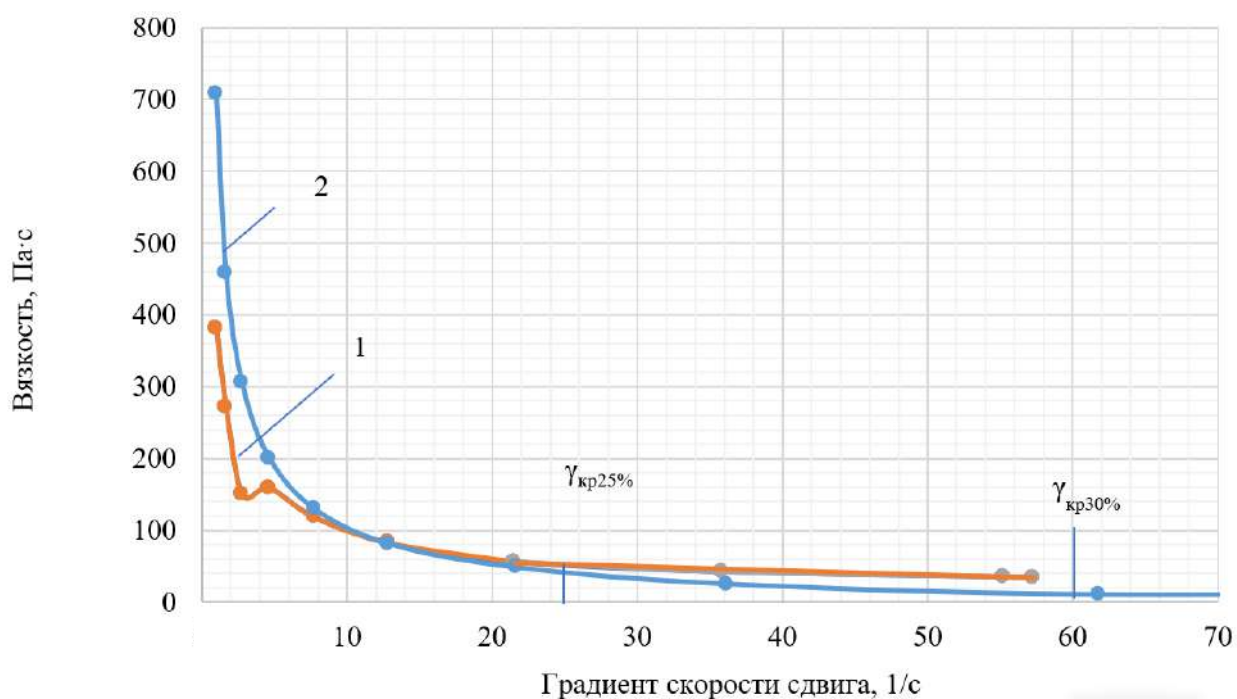


Рисунок 3.23 – Изменение вязкости композиционного материала на основе древесной муки из сосны и эпоксидной смолы с отвердителем в зависимости от градиента скорости сдвига: 1 – при содержании древесины 20 %; 2 – при содержании древесины 30 %



Из рисунка 3.22 видно, что с повышением концентрации до 20 % переход от неньютоновского поведения к ньютоновскому смещается. Можно полагать, что по аналогии с волокнистыми суспензиями, с повышением концентрации будет увеличиваться неньютоновская составляющая при малых скоростях сдвига, а с определённого момента вязкость примет постоянное значение, что характеризуется прямым участком на реологической кривой [37–39]. Поскольку автора интересовала точка перехода от неньютоновского к ньютоновскому состоянию (от структурированного режима к диспергированному [37–39]), была проведена прямая линия по имеющимся точкам. Истинное расположение кривой (рисунок 3.22, линия 2) при 30 % содержания древесной муки требует дополнительного изучения с большим количеством точек и с использованием различных приборов и методов измерения реологических характеристик. При проведении испытаний возможно, что при содержании древесной муки более 30 % необходима замена измерительной системы, либо способа измерения вязкости при градиенте скорости более  $65 \text{ с}^{-1}$ . Но при этом сопоставлять данные различных способов измерений реологических свойств сложных систем с такими реологическими свойствами затруднительно.

Композит при 30 %-м содержании частиц ведёт себя как неньютоновская жидкость с пределом текучести, находящимся в диапазоне напряжения сдвига от 750 до 800 Па. По результатам регрессионного анализа предел текучести составил 795 Па.

Последующее повышение доли твёрдых частиц выше 30 % в системе приводит к резкому возрастанию вязкости с проявлением вязкоупругих свойств у материала (рисунок 3.22, линия 2), что вызывает необходимость замены типа измерительной системы. Такой характер изменения вязкости характерен для многих древесно-полимерных композитов, исследованных в работах [49–51]. Для повышения доли использования древесины в композите рекомендуется увеличить температуру. Предполагается послойное нанесение тиксотропного полимера при температуре не выше  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рабочая температура

при послойном нанесении по технологии LDM не превышает 40 °С при этом вязкость снижается до уровня, соответствующего композиционному материалу с содержанием древесной муки 20%.

В таблице 3.2 представлены данные регрессионного анализа реологических характеристик, показанных на рисунках 3.20 и 3.22.

Таблица 3.2 – Результаты регрессионного анализа реологических характеристик древесно-полимерного композита на основе эпоксидной смолы с отвердителем с частицами сосны размером менее 200 мкм

Древесно-полимерный композит из эпоксидной смолы с отвердителем, с различным	Зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига	Классификация жидкости	Индекс корреляции, R	Индекс детерминации, R <sup>2</sup>	Фактический критерий	Табличный критерий Фишера
0 % (рисунок 3.20, линия 1)	$\tau = 0,986 \cdot \dot{\gamma} + 0,22$ линейная зависимость	ньютоновская	1	1	$6,1 \cdot 10^5$	5,3
10 % (рисунок 3.20, линия 2)	Градиент скорости сдвига: $0 - 25 \text{ с}^{-1}$ $\tau = 9,9 \dot{\gamma}^{0,75}$ степенная зависимость	псевдопластичная	0,999	0,998	4708	6,6
	Градиент скорости сдвига: выше $25 \text{ с}^{-1}$ $\tau = 3,28 \cdot \dot{\gamma} + 34,53$ линейная зависимость	ньютоновская	0,999	0,999	43,8	4,3
20 % (рисунок 3.22, линия 1)	Градиент скорости сдвига: выше $25 \text{ с}^{-1}$ $\tau = -2,23 \dot{\gamma}^2 + 89,88 \dot{\gamma} + 305,4$ квадратичная зависимость	неньютоновская	0,98	0,97	80	5,7
	Градиент скорости сдвига: выше $25 \text{ с}^{-1}$ $\tau = 21,39 \dot{\gamma} + 750,83$	ньютоновская	0,998	0,996	528	18,5
30 % (рисунок 3.22, линия 2)	Градиент скорости сдвига: до $60 \text{ с}^{-1}$ $\tau = -0,34 \dot{\gamma}^2 + 18,19 \dot{\gamma} + 795,04$ квадратичная зависимость	неньютоновская	0,86	0,75	9	5,1

При концентрации древесной муки более 10 % каждая реологическая характеристика разделена на две части точкой перехода от области неньютоновского течения жидкости к области, где поведение исследованных образцов может быть описано законом вязкого трения. Для древесно-полимерного композита в жидком виде с содержанием древесной муки до 20 % такой переход находился на уровне  $25 \text{ с}^{-1}$ , а при 30 % -  $60 \text{ с}^{-1}$ .

Из таблицы 3.2 видно, что реологические характеристики древесно-полимерного композита обладают линейной зависимостью в интервалах градиента скорости сдвига соответствующих ньютоновской жидкости. Во всех случаях регрессионный анализ показал надёжность выбранных зависимостей.

Наиболее сложной зависимостью с точки зрения регрессионного анализа являлась линия 2 (рисунок 3.22). Для расчёта значимости параметров регрессии и корреляции были использованы все данные, зафиксированные прибором. Было использовано 9 значений одной серии эксперимента для оценки значимости параметров регрессии, результаты которых представлены в таблице 3.2. О том, что полученной зависимости можно верить, говорит большее значение фактического критерия Фишера над табличным.

Во всех остальных случаях регрессионный анализ показал высокую надёжность выбранных зависимостей.

По результатам регрессионного анализа реологических кривых жидкого древесно-полимерного композита с содержанием древесной муки более 10 % при градиенте сдвига от 0 до критического значения (рисунки 3.20, 3.22) установлено, что зависимость имеет степенной характер течения. Также с высоким уровнем достоверности была определена параболическая зависимость для древесно-полимерного композита с содержанием древесной муки 30 % при градиенте скорости до  $60 \text{ с}^{-1}$ . Реологическая характеристика качественно совпадает с характеристикой волокнистой суспензии концентрацией более 4 %.

Таким образом, были получены вязкостные характеристики жидкого композиционного материала на основе древесной муки и двухкомпонентного полимера на основе эпоксидной смолы с отвердителем. 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 [25]. 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.

### **3.4 Исследование термомеханических характеристик композиционных материалов на основе древесины**

Термомеханические свойства образцов представлены на рисунке 3.24. Была установлена взаимосвязь между модулем накопления и температурой для древесно-полимерного композита, содержащего древесную муку. Модуль

накопления уменьшался во всём исследуемом диапазоне от 20 –70 °С.

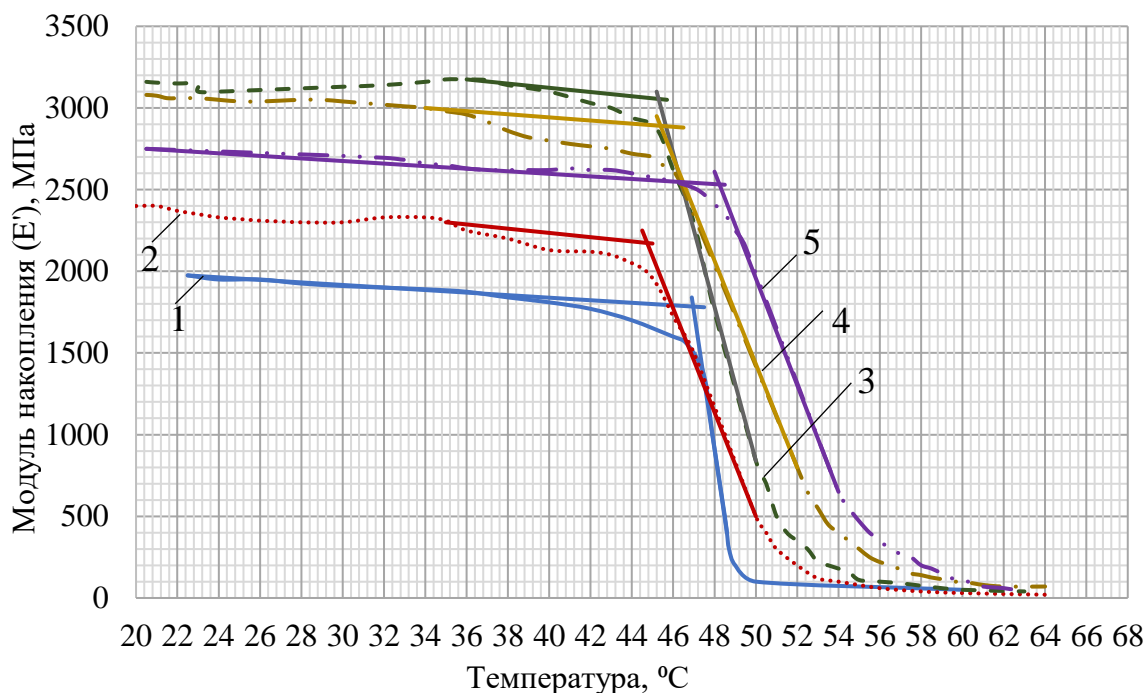


Рисунок 3.24 – Термомеханические кривые исследуемого композита: 1 – содержание древесной муки 0 %; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 25 %; 5 – 30 %

Из рисунка 3.24 видно, что разница между модулем накопления 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 стал резко снижаться во всём исследуемом диапазоне содержания древесной муки. Были зафиксированы граница 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

°C, после этого, вне зависимости от содержания древесной муки, полимер переходил в вязкотекучее состояние.

Важно отметить, что модуль накопления имел непропорциональную зависимость от содержания частиц древесной муки. При температуре 24 °C наблюдается пик механической характеристики (модуля накопления) в диапазоне от 20 до 25 %. Затем этот показатель снижается при 30 % (см. рисунок 3.24).

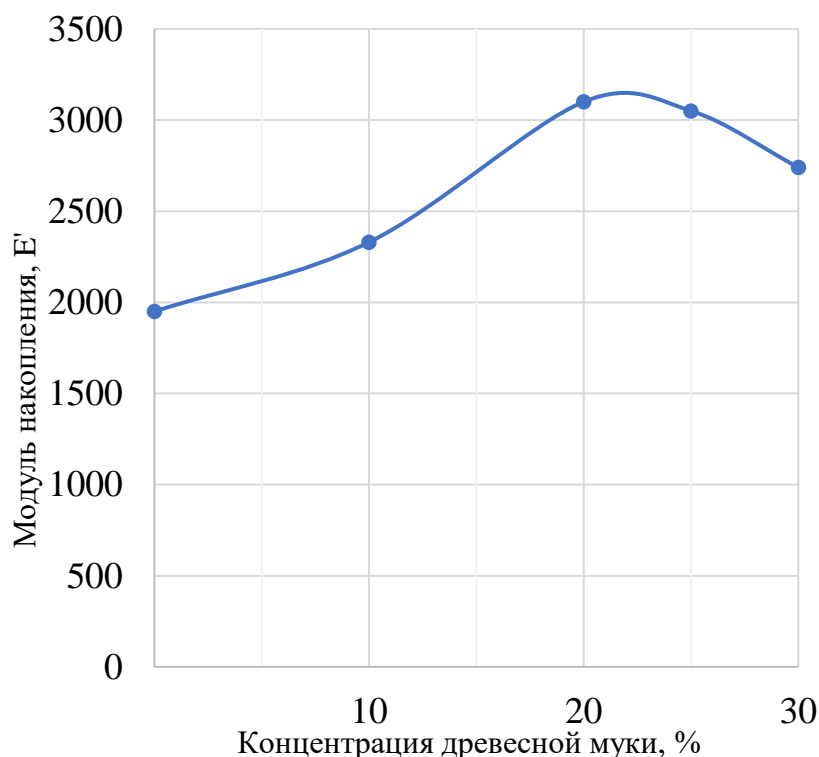


Рисунок 3.24 – Зависимость модуля накопления от содержания древесной муки в композиционном материале при 24 °C

Следует иметь в виду, что 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 [141, 142].

Подобная тенденция была отмечена для некоторых механических характеристиках полимера на основе древесной муки и метакриловой смолы при изготовлении изделий с помощью 3D-печати по технологии

стериолитографии. Авторы работы зафиксировали низкие показатели механических свойств при 0 и 10 % древесной муки, а при 3 % наблюдалось максимальное значение механических свойств [67].

Для обсуждения полученных результатов целесообразно обратиться к проблемам релаксационных состояний полимерных компонентов древесины, путям их направленного смещения и роли релаксационных состояний полимерных компонентов в процессах биорефайнинга. К сожалению, этому вопросу в монографиях по лигнину, даже вышедших недавно [143–145], уделяется мало внимания. Исключением является глава Дэвида Горинга «Полимерные свойства лигнина и его производных» в книге «Лигнины (структура, свойства и реакции, под редакцией К.В. Сарканена и К.Х. Людвига) [146], изданная в США в 1971 году и переведенная на русский язык и изданная в СССР в 1975 году.

Ранее [56–58] было показано, что при взаимодействии полиэтиленового покрытия с бумагой величина адгезии покрытия возрастает в температурном диапазоне, соответствующим температуре расстекловывания целлюлозы. Опубликованные в последние годы работы по роли релаксационных состояний полимерных компонентов в процессах биорефайнинга [147 – 150] показали, что именно направленное изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины играет определяющую роль как при получении композиционных материалов упаковочного назначения, так и при получении биотоплива второго и третьего поколений.

Приведенные в данном исследовании результаты позволяют сделать вывод, что при изменении содержания в композите древесной муки меняются свойства получаемого композита. С другой стороны, открывается возможность направленного изменения функций древесной муки – от инертного наполнителя – к усиливающему компоненту, если область высокоэластического состояния полимерных компонентов древесины

совпадет с областью вязкотекучего состояния связующего при наличии у них реакционноспособных групп.

Можно ожидать, что при температурно-влажностном диапазоне, обеспечивающим нахождение полимерных компонентов древесины в расстеклованном состоянии, а компонентов синтетического реактопласта – в вязкотекучем состоянии, возникают предпосылки для создания между ними связей, во всем их многообразии – от водородных до химических. В древесной муке частицы сохраняют свою капиллярно-пористую структуру; размеры частиц превышают размер микрофибрилл. Иными словами, древесная мука из инертного наполнителя превращается в активный наполнитель, в котором могут реализовываться прочностные свойства целлюлозных фибрилл.

В недавно опубликованных работах Э. Акима, С. Роговиной и Ал. Берлина [151–152] было показано, что капиллярно-пористая структура древесины выполняет в живом дереве не только проводящие функции по транспортировке участвующих в биосинтезе жидкостей, но и обеспечивает, благодаря жидкостному заполнению, усталостную прочность древесины, причем присутствующий в древесине лиственницы комплекс «арабиногалактан (АГ)–вода» может рассматриваться как природный эвтектический растворитель, сочетающий в себе также и свойства эвтектического пластификатора. Позднее было показано, что замещение этого комплекса другим эвтектическим комплексом «глицерин-вода» позволяет сохранить полимерные компоненты древесины в расстеклованном состоянии в широком температурном диапазоне. Таким образом, при использовании в качестве наполнителя древесной муки из лиственницы может измениться характер взаимодействия би-компонентного связующего с частицами древесной муки и это позволит перейти от 3D-печати декоративных элементов к 3D-печати изделий конструкционного назначения.

Таким образом, установлены термомеханические характеристики предлагаемого древесно-композиционного материала для 3D-печати по комбинации технологий LDM и FDM. Композиционный материал при



содержании древесной муки до 30 % может выдерживать механические нагрузки при температуре до 45 °С, что даёт возможность использовать его для изготовления декоративных изделий для мебели и конструктивных элементов оборудования ЦБП. Причём содержание древесной муки в 20–25 % показало максимальное значение модуля накопления при изгибе. Этот диапазон рекомендуется на практике при создании древесно-полимерного композита для аддитивных технологий.

### **3.5 Исследование механических характеристик деталей, полученных по комбинированной технологии LDM и FDM 3D-печати из древесно-полимерного композита**

#### **3.5.1 Влияние различных связующих и содержания древесной муки в композиции на сопротивление разрыву опытных образцов**

В качестве связующего были использованы различные марки многокомпонентного пластика, представленные на российском рынке:

- двухкомпонентная полиуритановая система «Ерохітах» (характеристика: полное отверждение – 20 мин; рекомендуемая смесь компонентов 1:1; не требует дегазации);

- двухкомпонентный пластик «Real Cast М6» (характеристика: время полного отверждения – от 24 до 48 мин при 25 °С; рекомендуемая смесь компонентов – 1:1; не требует дегазации; динамическая вязкость – 85 мПа·с);

- прозрачный эпоксидный компаунд от компании «Арт-Массив» – в основе эпоксидная смола и специальный отвердитель (характеристика: предел по нанесению слоя – 100 мм; без растворителя; вязкость компонента А + В 1 Па·с при 22 °С; плотность А + В 1100 кг/м<sup>3</sup>).

Образцы для разрушения были изготовлены в соответствии с размерами, установленными [103] с помощью двухэкструдерного 3D-принтера «MegaBot Dual Kit» (характеристика: диаметр сопла – 0,4 мм; пространство для печати – 200 x 200 x 180 мм; технология печати – FDM/FFF; количество экструдеров – 2; заявленная точность печати – 100 мкм; максимально возможная

температура экструдера – 220 °С). В один из экструдеров загружался водорастворимый пластик PVA компании «eSun» (Китай) (характеристика: биоразлагаемый, нетоксичный, водорастворимый, температура печати – 190–210 °С; плотность – 1140 кг/м<sup>3</sup>; рекомендуемая температура стола – 60–80 °С). Паста, содержащая древесную муку вместе с двухкомпонентной системой наносилась по контурам водорастворимого пластика.

Изготовленные образцы разрушались с помощью универсального учебного комплекса для статических испытаний материалов «КСИМ-40» (производитель – Россия, НПП «Учебная техника»; максимальная нагрузка – 40 кН).

При составлении композиции из связующего состава и древесной муки может возникнуть большое количество воздуха в изготавливаемых образцах, что отрицательно скажется на механических свойствах изделия, поэтому при исследовании образцов на растяжение была использована измельчённая древесная мука из сосны с многокомпонентными полимерными связующими. На рисунке 3.25 представлены данные по исследованию влияния содержания частиц древесины сосны на предельное разрушающее усилие при разрыве для образцов, изготовленных по предлагаемой технологии комбинирования LDM и FDM печати.

Из рисунка 3.25 видно, что с увеличением содержания частиц сопротивляемость разрыву образцов снижается. 40 % содержания древесной муки в композиции с любым проклеивающим составом приводит к критическому, очень маленькому значению предельного разрушающего усилия. Диапазон значений концентрации от 20 до 30 % для изготовленных с помощью 3D-принтера изделий можно считать оптимальным, так как изделия сложной формы, используемые в качестве декора для мебели и конструктивных элементов оборудования ЦБП, редко испытывают большие нагрузки. Российский производитель предлагает на рынке множество вариантов двухкомпонентного пластика, который обеспечивает максимальную прочность.

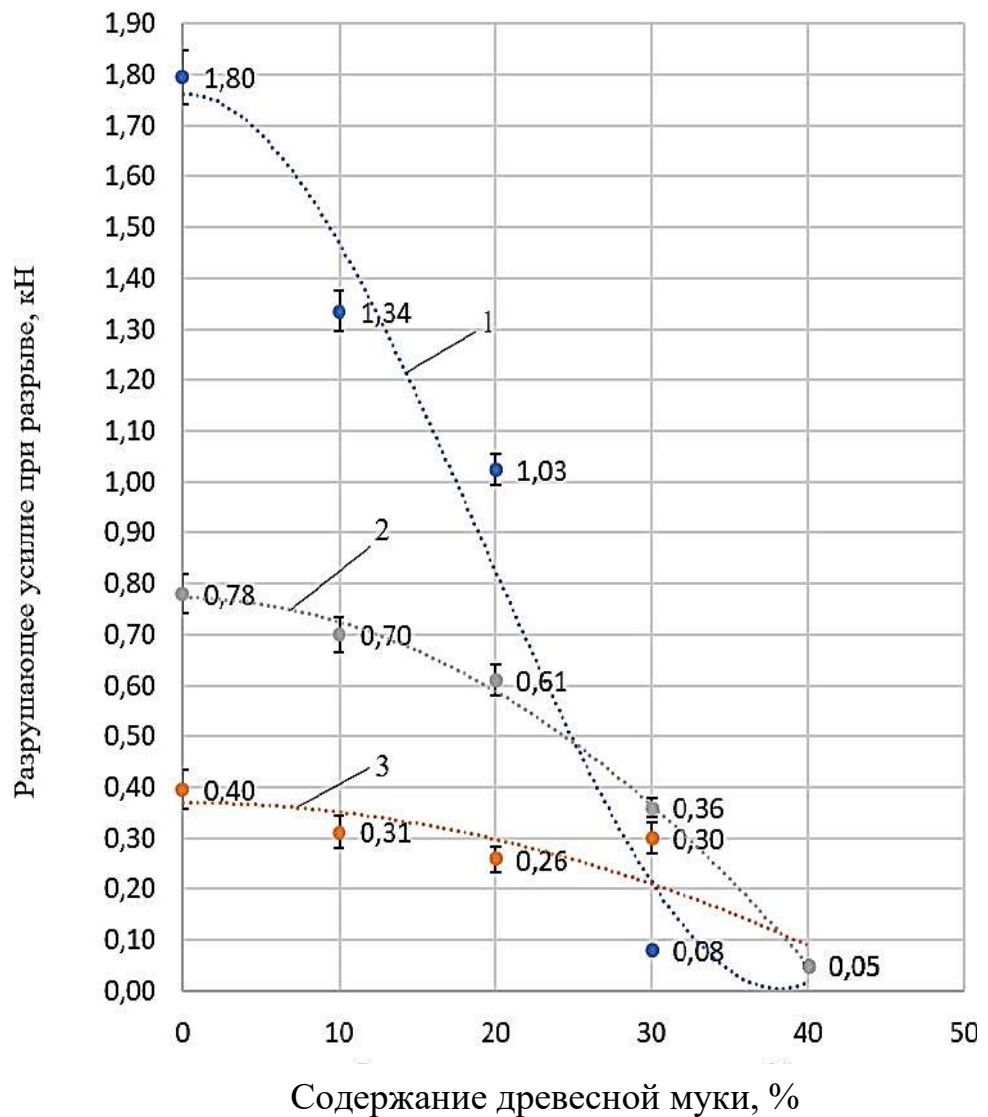


Рисунок 3.25 – Результаты оценки предельного усилия при разрыве образцов, с различным содержанием древесной муки в композиционном материале: 1 – двухкомпонентный пластик «Real Cast M6»; 2 – эпоксидная смола «Арт-Массив» и специальный отвердитель; 3 – двухкомпонентный пластик «Ерохітах»

Стоимость первого и третьего вариантов (рисунок 3.25) гораздо выше по сравнению со связующим «Арт-Массив». Важно отметить, что в работе рассмотрена лишь небольшая часть представленных на рынке связующих для создания композиции, поэтому окончательно утверждать в пользу какого-то производителя нельзя. В данном конкретном случае большую роль может иметь двухкомпонентность системы, которая позволит разделить составы, что облегчит обслуживание экструдера 3D-принтера.

Необходимо учитывать тот факт, что отверждение пластика происходит для различных составов за разное время. Например, двухкомпонентная полиуритановая система «Ерохітах» переходит в твёрдое состояние через 20 мин; а двухкомпонентный пластик «Real Cast М6» затвердевает через 30 мин при 25 °С, прозрачный эпоксидный компаунд от компании «Арт-Массив» за несколько суток. В третьем варианте с обслуживанием сопла экструдера проблем не возникнет, так как после печати будет достаточно времени, чтобы прочистить, а в первых двух вариантах экструдер может забиться частицами древесины. При первых двух вариантах экструдеры должны работать синхронно так, чтобы компоненты пластика не смешались на сопле экструдера, для этого предусматривается отвод сопла экструдера для подачи смеси на 3 мм вверх, когда 3D-печать наносит второй экструдер из водорастворимого пластика. Полученная заготовка, оставаясь в жидком состоянии, окончательно принимает форму матрицы, заполняя все её полости. Изменяя температуру заготовки, возможно повлиять на скорость затвердевания. Изготовленные и разрушенные образцы позволили установить, что рекомендуется содержание древесной муки от 20 до 30 %, при этом наиболее прочными на растяжение были образцы, выполненные из двухкомпонентного пластика «Real Cast М6» со временем затвердевания 30 мин при температуре 25 °С.

Таким образом экспериментально полученные зависимости между разрушающим усилием при разрыве и содержанием древесной муки до 30 % в композиционном материале показали возможность использования предлагаемой технологии LDM/FDM 3D-печати и устройства для 3D-принтера

### **3.5.2 Влияние различных связующих и содержание древесной муки на сопротивление раздавливанию опытных образцов**

Сопротивляемость пластика разрушению сжатием является важным параметром, который используется при оценке качества изготавливаемых изделий. Это свойство определяет, насколько пластик может сопротивляться

давлению и разрушению при силовом контакте с другими материалами. Сопротивляемость изделия разрушению сжатием зависит от многих факторов, таких как тип пластика, конструкция и форма изделия, а также условия окружающей среды и способ приложения нагрузки.

Например, сопротивляемость композита на разрушение сжатием является важным свойством для декоративных изделий для мебели и конструктивных элементов оборудования ЦБП, так как они могут соприкасаться с элементами конструкции. Декоративные изделия по возможности не должны разрушаться под весом мебели. Хотя в обычных условиях они не испытывают сильных нагрузок на сдавливание. К конструктивным элементам оборудования требования к сопротивлению сжатию могут быть выше.

Для оценки сопротивляемости пластиковых изделий сдавливанию использовался универсальный учебный комплекс для статических испытаний материалов КСИМ-40 (производитель – Россия, НПП «Учебная техника»; максимальная нагрузка - 40кН). По аналогии с испытанием образцов на растяжение были исследованы три типа связующих: двухкомпонентная полиуритановая система «Ерохітах»; двухкомпонентный пластик «Real Cast Мб»; прозрачный эпоксидный компаунд от компании «Арт-Массив».

Образцы для разрушения были изготовлены с помощью двухэкструдерного 3D-принтера «МBot Cube Dual» [153]. В измерениях использовалось не менее 10 образцов одинакового размера на каждый замер. Образцы соответствовали различным композитам. Были исследованы образцы, содержащие древесную муку от 0 до 40 % с шагом в 10 %.

Изготовленные по предлагаемой технологии образцы фиксировались между рабочими элементами прибора и прессовались. Скорость, с которой образцы прессовали составляла 2 мм/мин, предельное усилие для проведения замеров было установлено в 2000 Н. Устройство позволяет получить типичные кривые напряжения относительной деформации.

Сравнение результатов сжатия различных образцов осуществлялось по усилиям, которые соответствуют пределу текучести (кН) и максимальному усилию сжатия образцов (кН). На рисунке 3.26 представлены результаты испытания образцов на сжатие по пределу текучести. Из рисунка 3.26 видно, что с повышением доли содержания опилок в целом наблюдается тенденция к снижению предела текучести. Наиболее заметно это для образцов, содержащих эпоксидную смолу и отвердитель. Предел текучести снизился до 35 % при содержании опилок 30 %. Согласно экспериментальным данным, наиболее благоприятная композиция полимера соответствует диапазону содержания древесины 20–30 %.

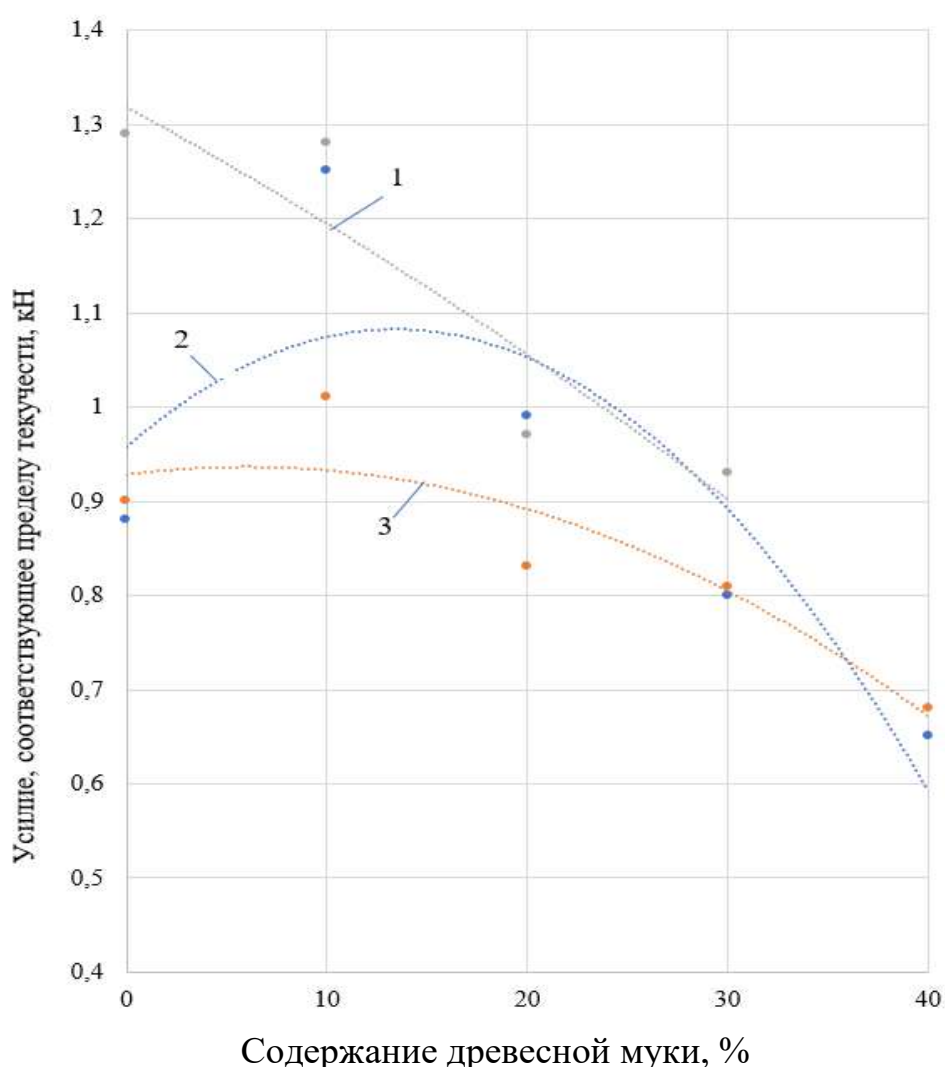


Рисунок 3.26 – Результаты оценки предельного усилия при разрыве образцов, с различным содержанием древесной муки в композиционном материале: 1 – двухкомпонентный пластик «Real Cast М6»; 2 – эпоксидная смола «Арт-Массив» и специальный отвердитель; 3 – двухкомпонентный пластик «Ерохітах»

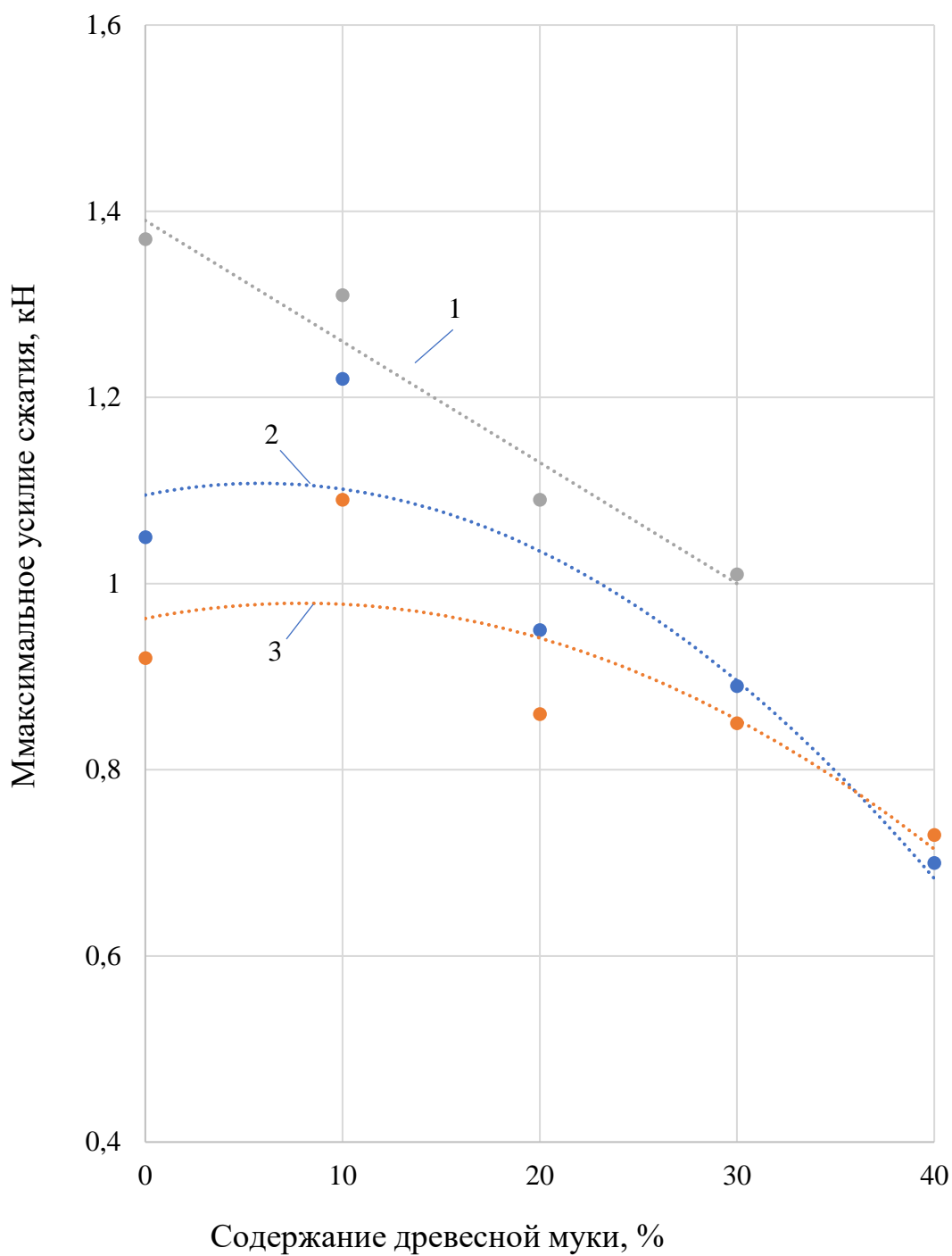


Рисунок 3.27 – Результаты оценки предельного усилия при разрыве образцов, с различным содержанием древесной муки в композиционном материале: 1 – двухкомпонентный пластик «Real Cast M6»; 2 – эпоксидная смола «Арт-Массив» и специальный отвердитель; 3 – двухкомпонентный пластик «Ерохітах»

На рисунке 3.27 представлены результаты измерения максимального усилия при сжатии образцов. Так же, как и с предыдущей зависимостью при повышении доли содержания древесной муки максимальное усилие сжатия снижается. Из графиков видно, что диапазон от 20 до 30 % можно рекомендовать для составления композиции связующего из полиуретана и эпоксидной смолы, так как он соответствует приемлемым значениям прочности образцов на сжатие при сравнительно высоком содержании недорогой составляющей композита, древесной муки.

### **3.6 Исследование твёрдости поверхности деталей, полученных комбинацией LDM и FDM технологий 3D-печати из древесно-полимерного композита**

Твёрдость поверхности композиционного материала, состоящего из древесной муки и связующего, определяется в основном связующим при концентрации древесной муки до 30 %. Известно, что материал, обладающий большей твёрдостью, царапает материал, которому соответствует меньшая твёрдость. Твёрдость является важным показателем для композиционных материалов, которые содержат в составе древесную муку и являются основой для создания декоративных изделий и конструктивных элементов оборудования ЦБП. Такие изделия часто контактируют по поверхности с другими материалами при эксплуатации при этом на их поверхности остаются вмятины, царапины, каверны и др., что ухудшает их внешний вид и снижает стоимость. Поэтому оценка твёрдости полученных по предлагаемой технологии 3D-печати образцов являлась одной из целей экспериментальных исследований.

Твёрдость образцов с различным содержанием древесной муки с тремя вариантами связующих была определена в соответствии с ГОСТ 24622 – 91, который установил метод оценки твёрдости пластмасс по Роквеллу [120]. Согласно методу стальной наконечник с индикатором приложенного усилия



соприкасается с поверхностью пластмассы. Диапазон нагрузок, который оценивает данный метод колеблется от 50 до 115 единиц по Роквеллу.

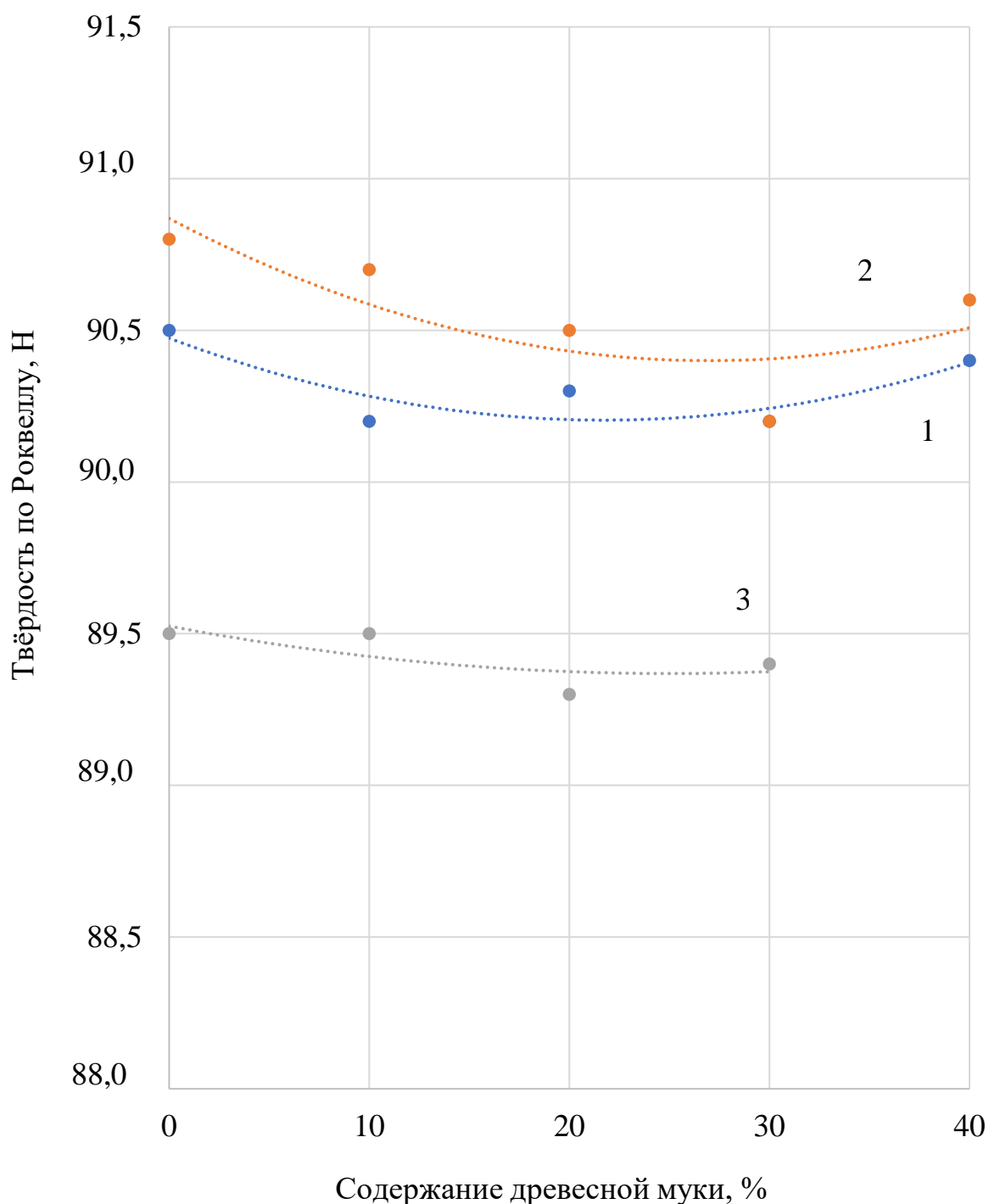


Рисунок 3.28 – Результаты определения твердости по Роквеллу:

1 – двухкомпонентный пластик «Real Cast М6»; 2 – двухкомпонентный пластик «Ерохітах»; 3 – эпоксидная смола «Арт-Массив» и специальный отвердитель

Образцы имели достаточную толщину и поверхность для проведения 10 замеров при каждом значении концентрации древесной муки в композите. Испытания всех образцов проводились при постоянных условиях (давлении, температуры, влажности). Перед проведением испытаний была произведена калибровка прибора.

На рисунке 3.28 представлены результаты оценки твёрдости по Роквеллу для опытных образцов, изготовленных при различном содержании древесины со следующими связующими: двухкомпонентный пластик «Real Cast M6»; двухкомпонентный пластик «Ерохітах»; эпоксидная смола «Арт-Массив» и специальный отвердитель.

Данные, представленные на рисунке 3.28, соответствуют шкале измерения по Роквеллу L с диаметром шарика  $6,35 \text{ мм} \pm 0,015$ . Предварительная нагрузка для калибровки составляла 98,07 Н.

Из рисунка видно, что большей твёрдостью обладают двухкомпонентные пластики на основе полиуретана, причём наблюдается небольшое снижение (в пределах погрешности эксперимента) при содержании древесной муки в диапазоне 20 – 30 %. Композит, содержащий древесную муку и двухкомпонентный пластик на основе эпоксидной смолы, обладает меньшей твёрдостью. Для сравнения ABS пластик, который широко применяется в аддитивных технологиях, имеет твёрдость по Роквеллу в этих же условиях 74,9 [153, 154].

Таким образом, можно заключить, что композиты на основе древесной муки вместе со синтетическим полимерным связующими, состоящими из двухкомпонентной полиуритановой системы или из эпоксидной смолы с отвердителем, обладают приемлемым уровнем твёрдости для создания декоративных изделий. Предлагаемая технология комбинированной 3D-печати смесью из синтетического полимерного связующего и древесной муки с содержанием до 40 % может быть использована в качестве сырья для аддитивных технологий. Существенного снижения твёрдости при повышении содержания древесной муки в диапазоне от 0 до 40 % не наблюдалось.

### **3.7 Исследование водопоглощения изделий из древесно-полимерного композита**

Способность впитывать влагу определяет влагопрочность декоративных изделий и конструктивных элементов оборудования ЦБП из композита, содержащего древесную муку и связующее. Влагопрочность — это способность материала сохранять свои свойства и качество при контакте с влагой на протяжении длительного времени. По аналогии с древесно-волокнистыми материалами, например, древесно-волокнистой (ДВП) или древесно-стружечной (ДСП) плитами, бумагой и композитами на основе растительных волокон декоративные изделия для мебели впитывают влагу и теряют свои механические свойства. В случае с бумажными изделиями, влагопрочность достигается с помощью нанесения барьерных слоёв из полиэтилена или полипропилена либо в композицию добавляют специальные клеящие агенты, например, крахмальный клей вместе с АКД (алкилкитендимер). Придание влагопрочности ДВП и ДСП также достигается с помощью специальных синтетических полимерных добавок.

Влагопрочность материалов, содержащих древесную муку, может быть оценена с помощью различных методов испытаний, которые определяются типом материала, его конструкцией. Наиболее простой способ заключается в испытании на устойчивость к проникновению воды, находящейся на поверхности. Одним из стандартных методов определения влагопрочности упаковочных материалов, в том числе бумаги и картона, является тест на сопротивление воздействию воды. Этот тест заключается в замачивании образцов в воде на определённое время и проверке потери массы после этого. Результаты теста указывают на надёжность упаковки в условиях высокой влажности. Если рассматривать декоративное изделие для мебели и конструктивный элемент оборудования ЦБП как материал, который может оказаться во влажном помещении или в воде, то применяемый к бумаге и картону метод можно использовать для полной и достоверной оценки. Содержание древесины в композиции смеси, подаваемой с помощью

экструдера 3D-принтера, будет определять способность впитывания и удаления влаги из изделия.

Исследуемые образцы из двухкомпонентного синтетического полимера «Real Cast М6», эпоксидной смолы «Арт-Массив» и специального отвердителя, а также двухкомпонентного пластика «Ерохітах» с содержанием древесной муки из сосны до 40 % с интервалом в 10 % были взвешены с точностью до 0,001 г в воздушно-сухом состоянии при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 75 %. После чего образцы с заданным размером замачивались в течение суток в воде (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Размеры и вес образцов в воздушно-сухом состоянии

Вид пластика	Содержание опилок, %	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Объём, см <sup>3</sup>	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Площадь поверхности образцов, мм <sup>2</sup>
Полиуретановый пластик «Real Cast М6»	0	50	10	4	2,00	2,229	1,114	1480
	10	50	10	4	2,00	2,183	1,091	1480
	20	49	9,4	3,5	1,61	1,744	1,082	1330
	30	49	9,4	4,4	2,03	1,879	0,927	1435
	40	49,7	9,6	4,5	2,15	1,564	0,728	1488
Полиуретановый пластик «Ерохітах»	40	50	10	4	2,00	1,712	0,856	1480
	30	49,6	9,6	4,9	2,33	2,119	0,908	1532
	20	49,7	9,8	4,4	2,14	2,191	1,022	1498
	10	49,7	9,4	3,7	1,73	1,837	1,063	1372
	0	49,7	9,8	3,7	1,80	1,815	1,007	1414
Эпоксидная смола «Арт-Массив» и специальный отвердитель	0	49,5	9,7	3,4	1,63	1,778	1,089	1363
	10	49,4	9,8	3,7	1,79	1,983	1,107	1406
	20	49,4	9,9	4	1,96	2,375	1,214	1453
	30	49,2	9,6	3,6	1,70	2,070	1,217	1368

Из таблицы 3.3 видно, что с повышением содержания опилок сосны в композиции с эпоксидной смолой и отвердителем, и отвердителями плотность образцов снижается.

По полученным данным были построены кривые сушки, которые характеризуют способность материала, содержащего древесную муку и связующее, удалять влагу.

Содержание древесной муки в материале существенно влияет на скорость удаления влаги из материала. На рисунках 3.29–3.30 представлены кривые сушки, соответствующие трём различным видам связующих с содержанием древесной муки в 0, 10, 20, 30, 40 %.

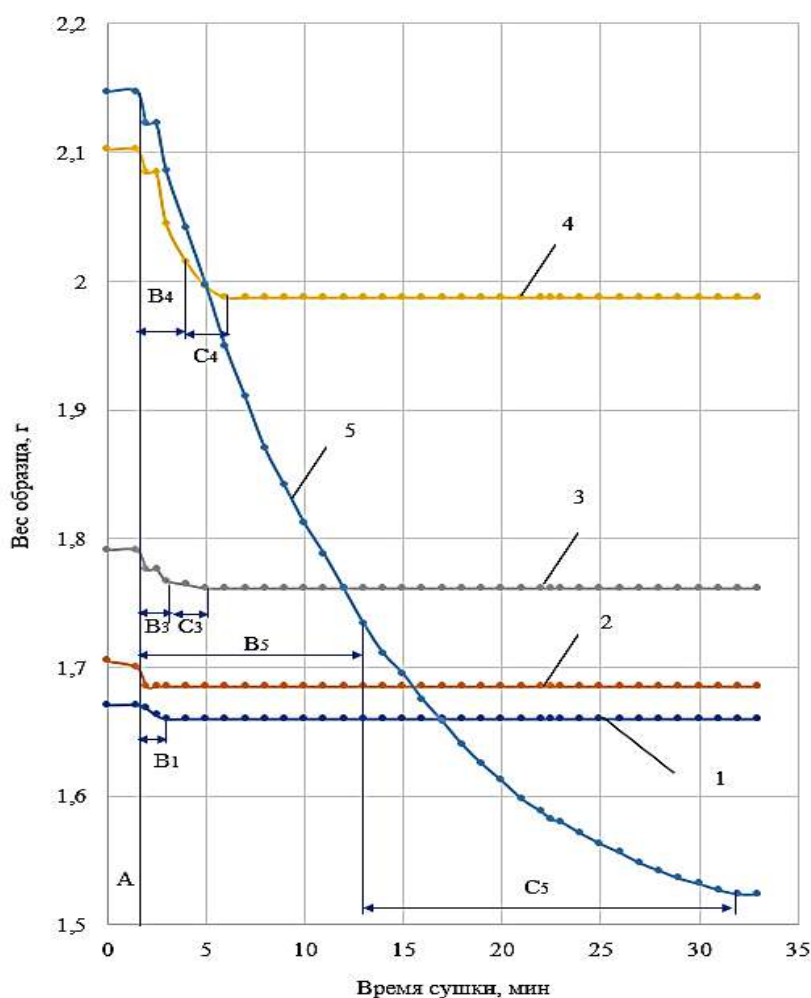


Рисунок 3.29 – Кривые сушки для композита, содержащего частицы древесины и двухкомпонентный полиуретановый пластик Real Cast: 1 – 0 % древесной муки; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 30 %; 5 – 40 %

Из рисунка 3.29 видно, что процесс удаления влаги из композиционного материала во многом зависит от содержания древесной муки. Двухкомпонентный полиуретановый пластик при концентрации до 20 % практически не впитывает влагу, так как количество удалённой воды не превысило 0,05 г (2,5 %) за 5 минут. Первые три кривые сушки характерны для пластиковых изделий. С повышением доли древесных отводов до 30 % кривая сушки имеет выраженный период постоянной скорости сушки (рисунок 3.29, В<sub>4</sub>) и падающей С<sub>4</sub>. Длительность этих периодов несколько минут, поэтому можно предположить, что основная влага была удалена с поверхности. Небольшое увеличение продолжительности сушки при 30 % по сравнению с 0, 10, 20%-м содержанием древесины объясняется тем, что часть древесной муки, находящихся близко к поверхности, впитали влагу, а внутри материала частицы древесины были закрыты от проникновения влаги.

При содержании 40 % древесной муки, древесно-полимерный композиционный материал ведёт себя как пористый впитывающий влагу (кривая 5, рисунок 3.29). Как и в первых четырёх случаях имеется период нагрева А. До 13 мин сушки наблюдался период постоянной скорости В<sub>5</sub>, который связан с удалением влаги из пор материала. Затем скорость сушки снижается (С<sub>5</sub>), что характерно для удаления влаги, которая связана с материалом физико-химически. По наличию периода падающей скорости сушки можно утверждать, что влага пропиталась глубоко в пористый материал. Анализируя графики, можно сделать вывод, что содержание древесной муки в 40 % нежелательно для изготовления образцов по предлагаемой технологии, так как это уровень, при котором существенно меняются и механические свойства, и влагопрочные характеристики изделий. Двухкомпонентный полиуретановый пластик Real Cast может быть использован в качестве связующего при содержании древесины в 30 %, при этом существенного снижения влагопрочных свойств и механических характеристик не было. На рисунках 3.31 и 3.32 представлены подобные

характеристики для двухкомпонентного связующего на основе полиуретана «Ерохітах» и эпоксидной смолы с отвердителем «Арт-Массив».

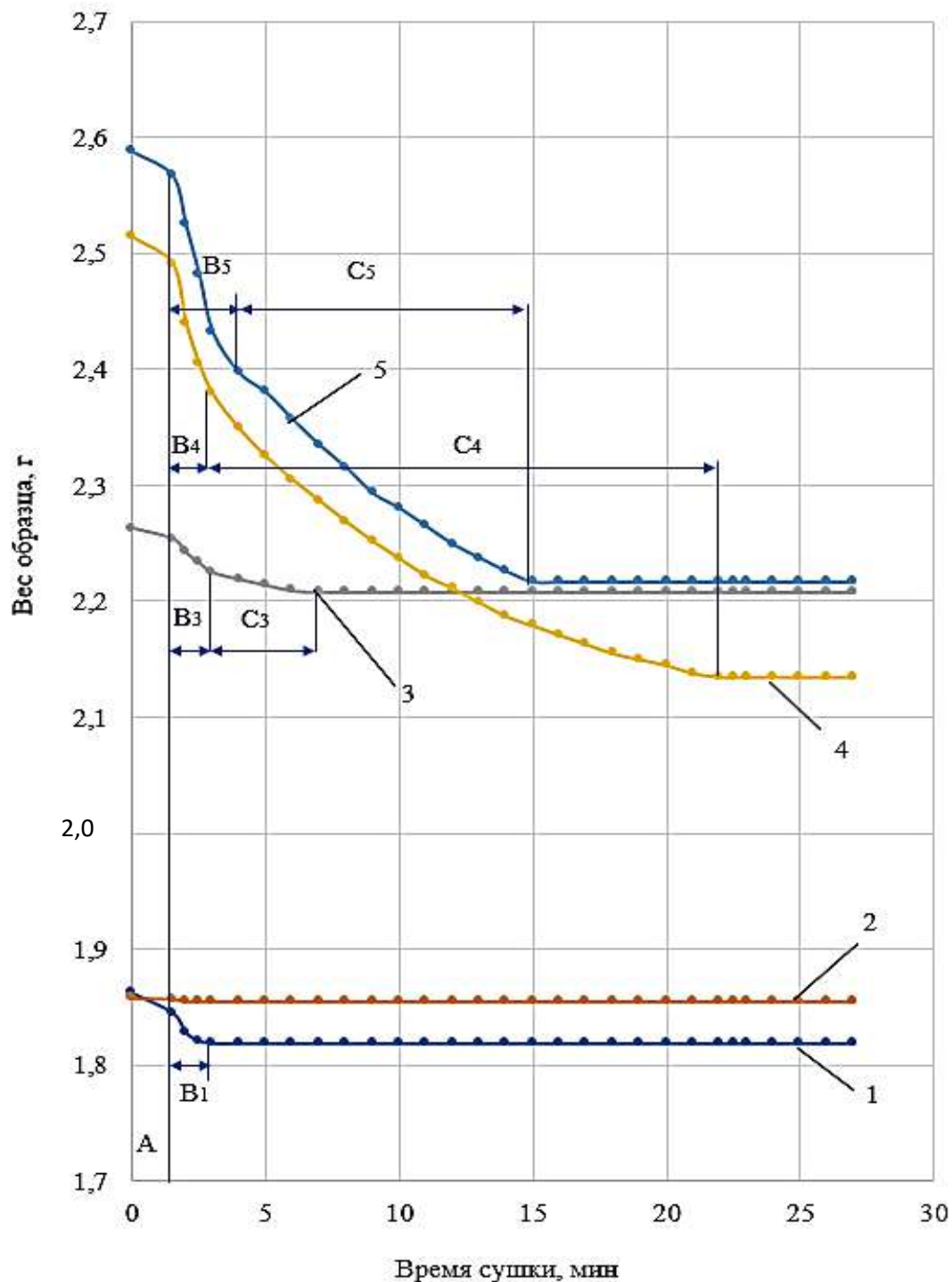


Рисунок 3.30 – Кривые сушки для композита, содержащего частицы древесины и двухкомпонентный полиуретановый пластик «Ерохітах»: 1 – 0 % древесной муки; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 30 %; 5 – 40 %

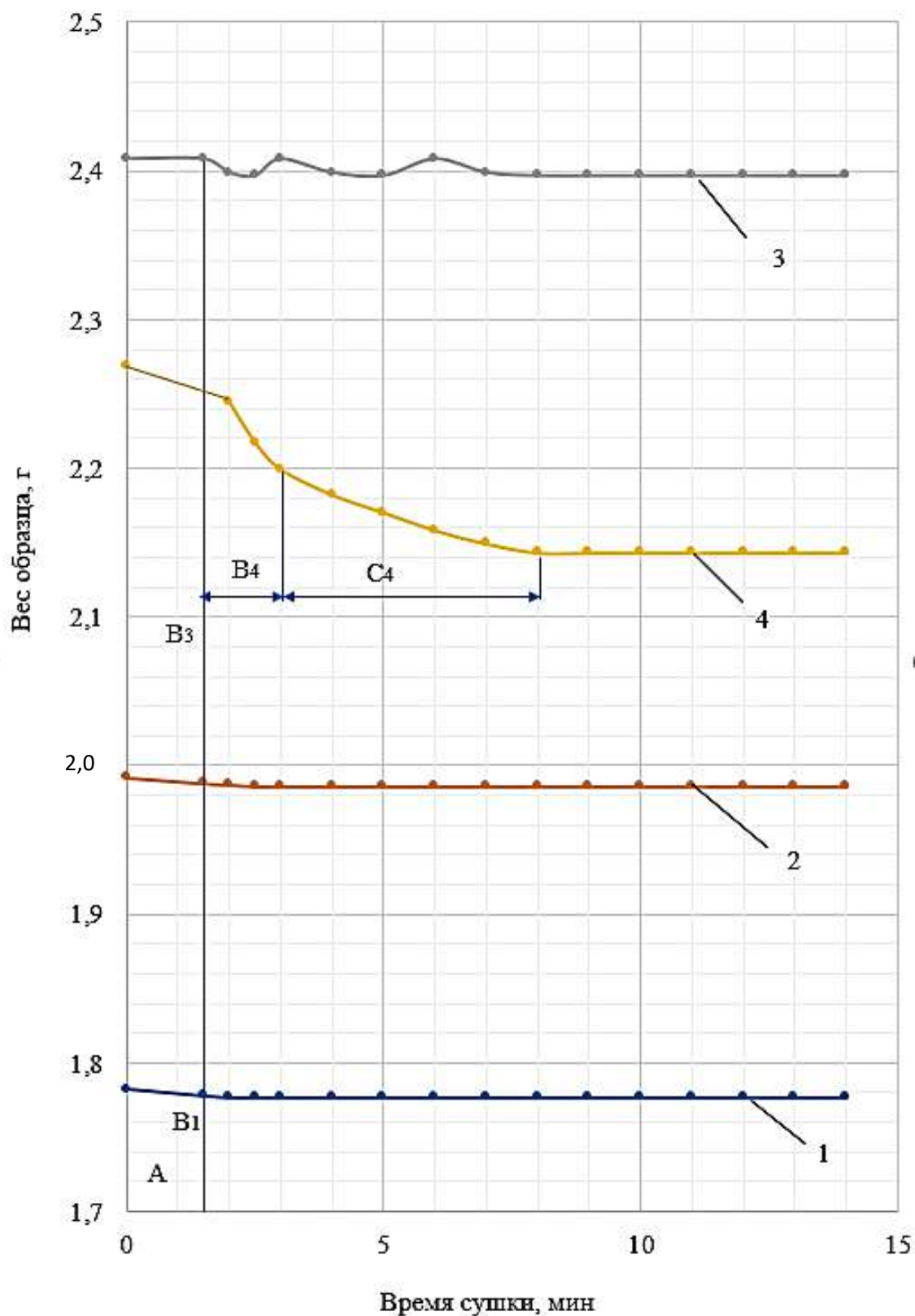


Рисунок 3.31 – Кривые сушки для композита, содержащего частицы древесины и эпоксидную смолу с отвердителем: 1 – 0 % древесной муки; 2 – 10 %; 3 – 20 %; 4 – 30 %



Из графиков, представленных на рисунке 3.30, видно, что двухкомпонентный полиуритановый пластик «Ерохітах» и при 30, и 40 % содержания древесной муки имеет схожий механизм удаления влаги. 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.

Эпоксидная смола с отвердителем оказалась более устойчивой к воздействию влаги при 30 % (см. рисунок 3.30). 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 многокомпонентными синтетическим полимерным связующими и древесной мукой.

## **4 Практическое использование предлагаемой комбинированной технологии LDM и FDM 3D-печати древесно-полимерным композитом**

### **4.1 Изготовление декоративного изделия для мебели из композита, содержащего частицы древесины**

Древесную муку перспективно рассматривать как сырьё для 3D-принтеров в виде подготовленной смеси или порошка. Например, такой продукт, как смесь (древесная мука и связующие) будет иметь высокую стоимость. Например, стоимость 500 г пасты превышает 350 руб. Однако для использования пасты для послойного формования изделий сложной формы необходимо высокотехнологичное оборудование, такое как 3D-принтер. 3D-принтер должен быть адаптирован для печати жидким древесно-полимерным композиционным материалом. В этой главе описывается апробация технологии создания декоративного изделия для мебели из композиционного материала в виде смеси, содержащей древесную муку и синтетическое полимерное связующие.

Для 3D-печати требуется 3D- модель изделия. На сегодняшний день существуют библиотеки уже готовых 3D-моделей, откуда можно загрузить необходимую, например, модели декоративных изделий для мебели представлены на сайте <https://www.thingiverse.com>.

Твердотельная электронная модель изделия, как правило, требует дополнительной доработки и преобразования в специальный, понятный ЧПУ станку или 3D-принтеру код, такой как «gcode». «Gcode» представляет собой набор команд выполняемых станком, осуществляющим формообразующую функцию. Для преобразования в «gcode» используются специальная программа «слайсер», таких программ много в открытом доступе в сети интернет, например: "CURA", "Repiter-Host", "Slic3D" и др. [155–160]. Каждая программа имеет обновлённые версии, которые расширяют перечень параметров, контролируемых в ходе 3D-печати. В данной работе использовался наиболее простой программный продукт ReplicatorG, который был рекомендован к 3D-принтеру «MBot Cube Duo» [160, 161].

Для формирования изделия использовались опилки сосны с содержанием 30 % и прозрачный эпоксидный компаунд от компании «Арт-Массив».

Результатом 3D-моделирования стала форма изделия, которая была получена путем импорта «.stl» файла модели в программу Fusion360.

После загрузки модели в программе формируется прямоугольная область, размеры которой немного больше, чем размеры изделия (рисунок 4.1).

С помощью команды «вычитание» в прямоугольной области остаётся след от изделия, из которого можно формировать контур или оставить как форму для заливки смесью .

Готовая 3D-модель формы может быть использована для создания декоративного изделия для мебели. Существует вариант изготовления формы путём создания подложки из водорастворимого пластика. В таком варианте жидкий древесно-полимерный композит наносится с помощью специального экструдера, переоборудованного для выдавливания материала через сопло диаметров от 1 до 3 мм. После того как смесь, содержащая многокомпонентное связующее и древесную муку, кристаллизуется, изделие помещается в сосуд с горячей водой, в которой с поверхности удаляется водорастворимый пластик. Такой приём потребует больших усилий на стадии 3D-моделирования, но будет более технологичным при изготовлении с помощью двухэкструдерного 3D-принтера.

На рисунке 4.1 представлены готовые изделия, полученные с помощью жидкого древесно-полимерного композита, содержащей опилки и связующее.



Рисунок 4.1 – Готовые изделия, полученные нанесением жидкого древесно-полимерного композита с формированием контура из пластика

Во многих случаях фигуры, полученные по предлагаемой технологии, не требуют дополнительной обработки. Качество поверхности зависит от толщины слоя, при котором 3D-принтер печатает контуры формируемого объекта. При печати изделий, представленных на рисунке 4.1, использовалась сравнительно большая толщина (0,3 мм), которая позволила быстрее сформировать контур, но немного ухудшить качество поверхности.

Предлагаемая технология комбинированной 3D-печати жидким древесно-полимерным композитом, содержащим древесную муку и многокомпонентное синтетическое полимерное связующее и с экструзией пластика (в том числе водорастворимого), позволяет изготовить изделие

сложной формы. Описанный и протестированный способ может заменить тяжёлый ручной труд при создании сложных форм декоративных изделий для мебели и конструктивных элементов оборудования ЦБП, что позволит эффективно использовать отходы древесины.

Таким образом, частицы древесины, образованные при производства целлюлозы могут стать основой для создания композиционного материала для аддитивных технологий.

#### **4.2 Создание цифровых копий объектов с помощью 3D-сканера с дальнейшим изготовлением декоративного изделия для мебели из композита, содержащего древесную муку**

При создании изделий сложной формы и на основе прототипов, либо при реставрации изделий сложной формы на основе композита рационально использовать 3D-сканер для моделирования мастер модели. 3D-сканер позволит ускорить процесс создания цифровой копии изделия сложной формы.

3D-сканирование детали осуществлялось с помощью 3D-сканера «Maker Bot Digitizer», имеющего следующие характеристики: технология сканирования – лазерная; точность сканирования – 200 мкм; количество лазеров – 2 шт; время сканирования (настраиваемое): 2–12 мин; зона сканирования – 203 x 203 x 203 мм; разрешение камер 1280x960; точность –  $\pm 2,0$  мм; максимальная нагрузка на поворотный столик – 3 кг; шаг сканирования  $0,9^\circ$  с 1/16 микрошаговым режимом; совместимые операционные системы – Windows (7+), Mac OSX (10.7+), Linux (Ubuntu 12.04+); формат ввода данных – STL, выходной формат – STL, Thing.

При потере и разрушении таких элементов (нестандартного) декора сложно найти и восстановить их. Геометрически сложные поверхности усложняют 3D-моделирование детали. Одним из вариантов быстрого и недорогого создания цифровой копии является 3D-сканирование.

3D-сканер позволяет получить необходимое облако точек для создания сложной поверхности (см. рисунок 4.2). На рисунке 4.2 представлена область рабочего стола 3D-сканера, на котором тригональный лазерный сканер фиксирует точки с координатами трёхмерного пространства.

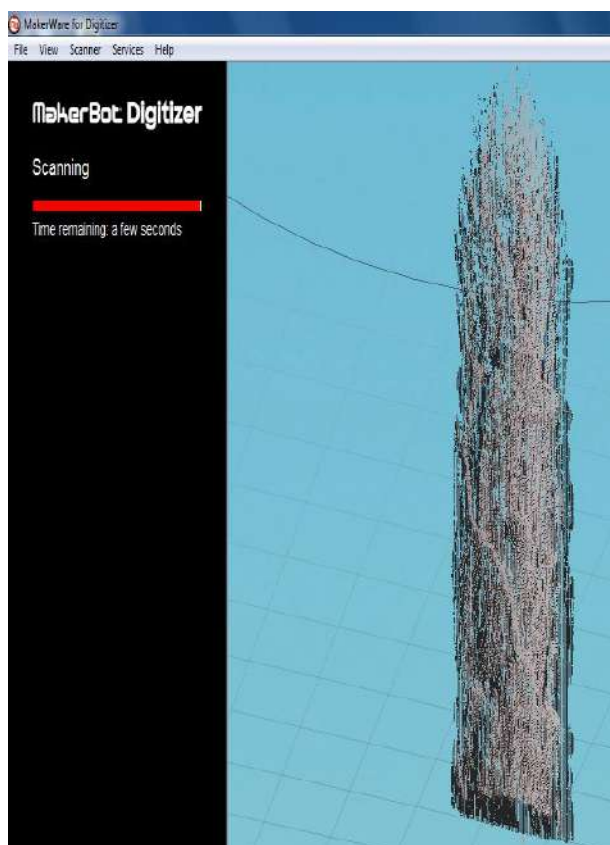


Рисунок 4.2 – Формирование облака точек декоративного изделия для мебели

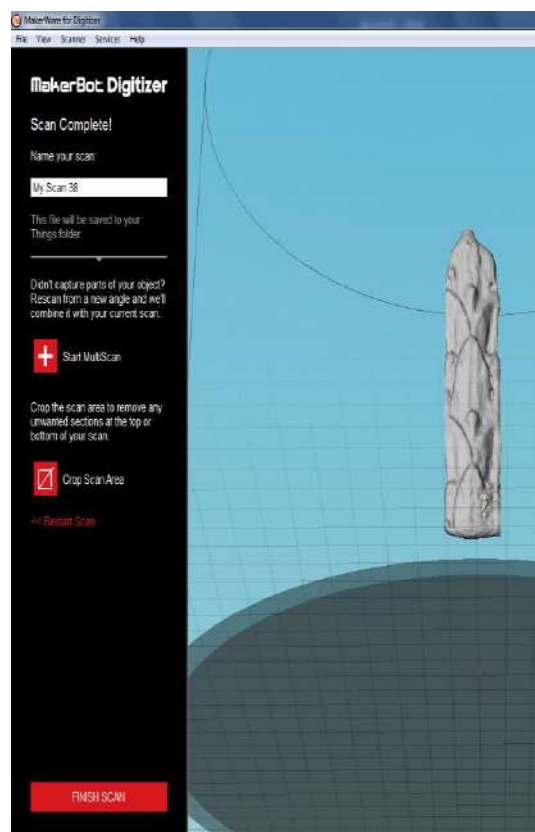


Рисунок 4.3 – Создание сети из облака точек для формирования 3D-модели изделия

Затем программа разработчиков компании «MakerBot» генерирует сеть по полученным точкам. Результат генерации сети представлен на рисунке 4.3. Сканер обладает функцией «MultiScan», с помощью которой можно производить сканирование с нескольких положений изделия, что увеличивает количество точек, повышая качество поверхности. На практике изготовления изделий обычно после 3D-сканирования целесообразно доводить цифровую копию до нужной точности с помощью графических программ.

В отличие от 3D-моделирования 3D-сканирование связано с большими ошибками. Это особенно актуально при изготовлении изделий сложной формы, где предъявляются высокие требования к согласованию размеров спроектированного и изготовленного объекта. Важно отметить, что точность должна быть настолько высокой, чтобы практически ни один принцип сканирования не обходился без уточнения 3D-модели. После сканирования требуется дополнительная «чистка» и геометрическое моделирование. Для этих целей используются специальные программы, и на сегодняшний день доступно множество простых и бесплатных. Функциональность программ постобработки различается, но одним из основных критериев является возможность импорта и экспорта файлов с помощью программ 3D-моделирования или «слайсеров» для 3D-печати. Кроме того, программа должна позволять пользователю создавать простые трехмерные фигуры, растягивать, вращать, перемещать и соединять объекты.

Использование 3D-сканера существенно ускоряет и упрощает работу по созданию новых и восстановлению существующих декоративных изделий для мебели, а предложенная технология комбинированной печати повышает точность изготовления из композита, содержащего древесную муку. Причём расходы на закупку оборудования и материалов окупаются быстрее, если изделие обладает уникальностью и сложной геометрией.

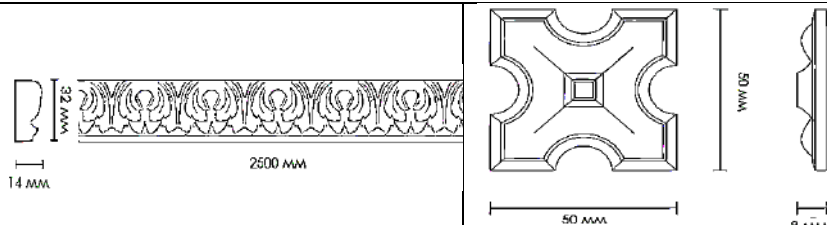
#### **4.3 Экономическая эффективность использования предлагаемой технологии 3D-печати**

В России декоративные изделия для мебели производится в ряде компаний, информация о которых представлена в таблице 4.1. Для оценки экономической эффективности предлагаемой технологии рассмотрим два примера образцов декоративных изделий с расчётом стоимости изделий по предлагаемой технологии и существующим вариантом (таблица 4.2).

Таблица 4.1 – Производители декоративных изделий для мебели

Компания	Ссылка	Город
Мебельная мастерская Строгановых	<a href="http://m-stroganov.ru/files/shop/price/14.pdf">http://m-stroganov.ru/files/shop/price/14.pdf</a>	Россия, Иваново
Ставроц	<a href="https://www.stavros.ru/products/izdeliya-iz-massiva/">https://www.stavros.ru/products/izdeliya-iz-massiva/</a>	Санкт-Петербург
Резьба по дереву	<a href="http://резьба-по-дереву.рф/fasadi/">http://резьба-по-дереву.рф/fasadi/</a>	Ростов-на-Дону.
Декоративное бюро	<a href="https://decorburo.com/katalog/dekor-iz-massiva/elementi/">https://decorburo.com/katalog/dekor-iz-massiva/elementi/</a>	Московская область, Щелковский р-н
Эклектика-декор Эклектика-декор Эклектика-декор	<a href="https://eclectica-decor.ru/reznoj-pogonazh">https://eclectica-decor.ru/reznoj-pogonazh</a>	Московская область, г. Щелково,
3Д-декор	<a href="https://3dekor.ru">https://3dekor.ru</a>	г. Санкт-Петербург, Васильевский остров,
Декор Лайн	<a href="http://www.decorline.pro/shop-reznoj-dekor-iz-dereva.html">http://www.decorline.pro/shop-reznoj-dekor-iz-dereva.html</a>	Московская область, г. Апрелевка, ул. Парковая

Таблица 4.2 – Расчёт экономической эффективности использования предлагаемой технологии и устройства

Вид затрат				
	Существующая	Предлагаемая	Существующая	Предлагаемая
Объем изделия, см <sup>3</sup>	1120	1120	20	20
Стоимость на рынке, руб.	1040	–	280	–
Удельная стоимость, руб/см <sup>3</sup>	0,93	–	14	–
Стоимость связующего из эпоксидной смолы, с отвердителем, руб/кг	–	1333,3	–	–
Стоимость измельчённой древесины, руб/м <sup>3</sup>	150	150	150	150
Стоимость композита с содержанием древесной муки за 1 деталь, руб.	20 %	–	1,23	–
	30 %	–	1,10	
	40 %	–	0,96	



Вид затрат	Существующая		Предлагаемая	Существующая		Предлагаемая	
Стоимость часа работы 3D-принтера	–		1,37	–		1,37	
Время изготовления изделия, час	–		18	–		1	
Средняя стоимость водорастворимого пластика (PVA), руб./кг	–		8000	–		6400	
Доля объёма контура от объёма изделия, %	–		2– <u>5</u>	–		2–5	
Себестоимость изделия, руб.	20	1040	783,8	280	14		
	30	1040	705,6	280	12,6		
	40	1040	627,20	280	11,2		
Стоимость 3D-принтера, руб.	–		50 000	–		–	
Шаговый двигатель	–		820	–		–	
Корпуса деталей из ABS пластика	–		100–150	–		–	
Металлические детали экструдера	–		2000	–		–	

Экономический эффект и срок окупаемости разработки зависит от объёмов изготавливаемой продукции.

#### **4.4 Изготовление деталей оборудования для производства литой тары из макулатуры**

В отличие от декоративных изделий для мебели, которых нужно немного, конструктивные элементы оборудования требуются в больших объёмах, особенно в современных условиях запрета ввоза зарубежного оборудования и запасных частей из ряда стран. В данном разделе представлен пример использования предлагаемой технологии и древесно-полимерного композита для создания лопаток (толкателей) для конвейера линии по производству литой тары из макулатуры.

Для создания толкателя на замену утратившего работоспособность, ввиду отсутствия технической документации, необходимо выполнить эскиз или получить "облако точек" с помощью 3D-сканера. На основании полученных данных выполняется чертёж детали (рисунок 4.4) её твердотельная модель, модель контура. Полученные модели, также как и в случае выполнения декоративных изделий, преобразуются в набор команд G-кода для послойного формования с помощью 3D принтера имеющего разработанное подающее устройство (рисунок 4.5).

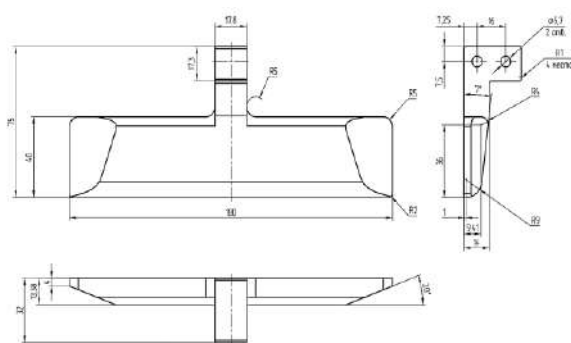


Рисунок 4.4 – Чертёж лопатки для конвейера линии производства литой тары из макулатуры

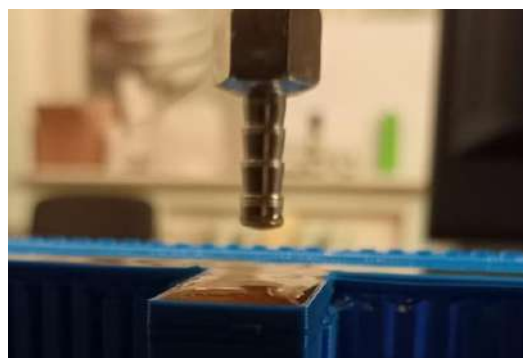


Рисунок 4.5 – Изготовление лопатки для конвейера линии производства литой тары из макулатуры

При подготовке древесно-полимерного композита, содержащего древесную муку марки 200 из сосны, в качестве связующего использовалась модифицированная эпоксидная смола и отвердитель. В соответствии с предложенной комбинированной технологией, один из экструдеров формировал контур из водорастворимого полимера, а второй послойно заполнял контур композитом. После печати лопатки выдерживались при температуре 40 °С до полного затвердевания изделия.

После удаления водорастворимого контура были получены детали не требующие дополнительной обработки (рисунок 4.6), которые были устанавливали на конвейер транспортировки литой тары из макулатуры на бумажной фабрике (рисунок 4.7).

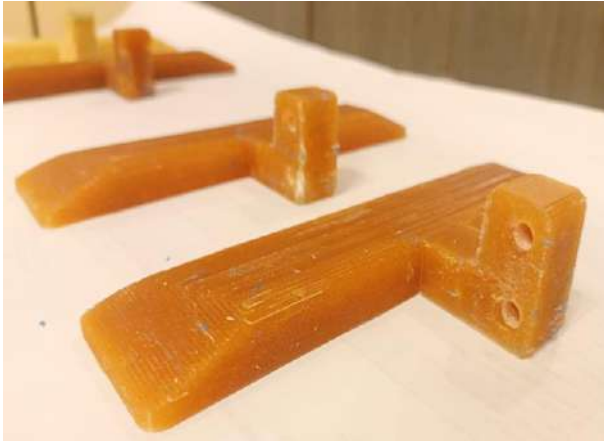


Рисунок 4.6. Лопатка конвейера после изготовления из древесно-полимерного композита двухэкструдерным 3D-принтером



Рисунок 4.7. Изготовленная из древесно-полимерного композита лопатка, работающая на линии по производству литой тары из макулатуры

Акт внедрения с экономическим расчётом эффективности использования данной технологии на примере изготовления одного из многочисленных конструктивных элементов оборудования ЦБП приведён в приложении 3. Установлена экономическая целесообразность использования комбинированной технологии LDM и FDM 3D-печати. Изготовление только 50 единиц лопаток позволяет сэкономить более 100 000 руб. по отношению с теми затратами, которые связаны с покупкой и доставкой зарубежного аналога.

Таким образом, подтверждена практическая значимость проведённых теоретических и экспериментальных исследований. Разработанное двухэкструдерное устройство, работающее по комбинированной технологии LDM и FDM 3D-печати, показало работоспособность.

## Заключение и выводы

Проведена оценка энергетических затрат на размол древесины различных пород с учетом требуемого размера частиц в диапазоне до 200 мкм для последующего создания расходного композита для 3D-печати. Получены зависимости между удельными затратами энергии и размерами частиц древесины различных пород, которые произрастают в Северо-Западном регионе нашей страны. Было установлено, что сосна является наиболее предпочтительной, с точки зрения удельных затрат энергии на размол, так как позволяет с минимальными затратами энергии получить необходимый фракционный состав при создании композита с последующим послойным его нанесением, с целью изготовления деталей сложной формы с помощью 3D-печати. Для условий подготовки древесины в сравнительно небольших объемах, соответствующих потребностям аддитивных технологий на сегодняшний день, доля энергозатрат на размол от общих расходов 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 в области подготовки древесной муки для аддитивных технологий.

Были получены вязкостные характеристики жидкого композиционного материала на основе древесной муки и двухкомпонентного полимера на основе эпоксидной смолы с отвердителем. 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 20-25 %.

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). 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 20–25 % 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.

Определены термомеханические характеристики предлагаемого древесно-композиционного материала для 3D-печати по комбинации технологий LDM и FDM. Композиционный материал при содержании древесной муки в пределах 30 % может выдерживать механические нагрузки при температуре до 45 °С, что даёт возможность использовать его для изготовления декоративных изделий для мебели. Причём содержание древесной муки в количестве 20–25 % показало максимальное значение модуля накопления при изгибе. Этот диапазон можно рекомендовать на практике при создании древесно-полимерного композита для аддитивных технологий.

Из проведённого анализа механических характеристик образцов можно сделать вывод, что содержание 25 % связующих является рекомендованным, с точки зрения составления композиции для 3D-печати многокомпонентными связующими и древесной мукой.

По результатам проведённых исследований композиционного материала было предложено двухэкструдерное устройство 3D-принтера,

которое позволило совместить технологии FDM и LDM для получения изделий высокого качества.

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

1. Проведена оценка энергетических затрат 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 Ленинградской области.

## Библиографический список

1. Пат. № 190068 РФ Портативный шнековый экструдер для производства древесно-полимерной нити / Говядин И.К.; опубл. 17.06.2019, Бюл. № 17.
2. Пат. № 194407 РФ Экструдер для изготовления продукции методом FDM-печати / Говядин И.К., Чубинский А.Н.; опубл. 09.12.2019, Бюл. № 34.
3. Говядин, И.К. Исследование влияния температуры на 3D-принтере на свойства древесно-полимерной нити / И.К. Говядин, А.Н. Чубинский // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – № 229. – С. 231–242.
4. Говядин, И.К. Исследование свойств древесно-полимерного композита на основе PLA / И.К. Говядин, А.Н. Чубинский // Известия вузов. Лесной журнал. – 2020. – №2. – С. 129–145.
5. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. I. Справочные материалы Ч. 1 / под редакцией Осипова П.С. – СПб.: Политехника, 2005. – 452 с.
6. Мордасов, Д.М. Технические измерения плотности сыпучих материалов / Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов // Изд-во ТГТУ. – 2004. – 80 с.
7. Правдин, П.В. Лабораторные приборы и оборудование из стекла и фарфора / П.В. Правдин // Справочное издание. – М.: Химия. – 1988. – 336 с.
8. ГОСТ 22524–77 Пикнометр для жидкостей. – М.: Изд-во стандартов. – 1985. – 22 с.
9. Борисов, Н.А. Производство древесной муки тонкого помола / Н.А. Борисов. – М. – 1964. – 21 с.
10. Пат. № 2318655 РФ Способ получения древесной муки / Политов А.А.; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 3.
11. Цывин, М.М. Производство древесной муки / М.М. Цывин, С.Г. Котцов, И.В. Шмахов. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – 134 с.

12. Karinkanta, P. Fine grinding of wood – Overview from wood breakage to applications / P. Karinkanta, A. Ämmälä, M. Illikainen, J. Niinimäki // Biomass and Bioenergy. – Finland. – 2018. – Vol. 113. – P. 31 – 44.
13. Леонович, А.А. Новые древесноплитные материалы / А.А. Леонович. – СПб.: Химиздат, 2008. – 160 с.
14. Леонович, А.А. Технология древесных плит: прогрессивные решения: учебное пособие / А.А. Леонович. – СПб.: Химиздат, 2005. – 208 с.
15. Леонович, А.А. Физико-химические основы образования древесных плит / А.А. Леонович. – СПб.: Химиздат, 2003. – 192 с.
16. Geeta, P. Properties of Wood–Plastic Composites Manufactured from Two Different Wood Feedstocks. Wood Flour and Wood Pellet / P. Geeta, J.G. Douglas, H. Yousoo // Polymers. – USA. – 2021. – Vol. 2769. – P. 1–13.
17. Geeta, P. Comparative Study of the Properties of Wood Flour and Wood Pellets Manufactured from Secondary Processing Mill Residues/ P. Geeta, H. Yousoo, J. G. Douglas // Polymers. – USA. – 2021. – Vol. 2487. – P. 1–17.
18. Морозов, А.М. Использование сканирующей электронной микроскопии для изучения нанопористой структуры продуктов переработки древесины / А.М. Морозов, Г.Н. Кононов, К.Л. Косарев, А.В. Кудряшов // Лесной вестник. – 2013. – № 2. – С.72–75.
19. Delviwan, A. The effect of wood particle size distribution on the mechanical properties of wood–plastic composite / A. Delviwan, Y. Kojima, H. Kobori, S. Suzuki, K. Aoki, S. Ogoe // Journal of wood science. – USA. – 2019. – Vol. 6567. – P. 1–11.
20. Липилин, А.Б. Тонкий помол и сушка древесного сырья в вихревой мельнице-нагревателе / А.Б. Липилин, М.В. Векслер, Н.В. Коренюгина, А.М. Морозов, Г.Н. Кононов, К.Л. Косарев, А.В. Кудряшов // Лесной вестник. – 2013. – № 3. – С. 139–144.
21. Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности / 2–е изд., перераб. / П.М. Сиденко. – М.: Химия. – 1977. – 368 с.



22. Rajaonariony, K.R., Comparative comminution efficiencies of rotary, stirred and vibrating ball-mills for the production of ultrafine biomass powders / K.R. Rajaonariony, C. Mayer-Laigle, B. Piriou, X. Rouau // *Energy*. – USA. – 2021. – Vol. 227. – 11 p.

23. Хинт, И.А. Производство силикальцита и его применение в жилищном строительстве/ И.А. Хинт, В.А Кузьминов. –Таллин.–1958. – 216 с.

24. Wang J. Energy consumption of two-stage fine grinding of Douglas-fir wood / J. Wang, J. Gao, K. Brandt, M. Wolcott // *Journal of Wood Science*. – Germany. – 2018. – Vol. 64. – Pp. 338–346.

25. Гаузе, А.А. Основы теории и расчёта оборудования для подготовки бумажной массы. / А.А. Гаузе, В.Н. Гончаров: учебное пособие. — СПб.: СПбГУПТД ВШТЭ. – 2017. - 84 с.

26. Алашкевич, Ю.Д. Влияние ножевого способа размола волокнистой массы на процесс получения порошковой целлюлозы / Ю.Д. Алашкевич, Л. В. Юртаева, Н.С Решетова, Р.А. Марченко // *Химия растительного сырья*. – 2020. – № 4. – С. 493 – 499.

27. Чистова, Н.Г Подготовка древесно-волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах различной модификации / Н.Г Чистова, В.Н. Матыгулина, Ю.Д. Алашкевич// *Химия растительного сырья*. –2020. – № 4. – С. 459–466.

28. Pušnik, Č. Effect of wood fiber loading on the chemical and thermorheological properties of unrecycled and recycled wood-polymer composites / С. Pušnik, Z. Fras, P. Slemenik, M. Bek // *Applied sciences*. – Switzerland. – 2020. – Vol.24. –17 p.

29. Клесов, А.А. Древесно-полимерные композиты / А.А. Клесов. – СПб.: Научные основы и технологии. – 2010. – 736 с.

30. Спиглазов, А.В. Влияние размеров древесных частиц и степени наполнения на текучесть композиций с термопластичными полимерными матрицами / А.В. Спиглазов, В.П. Ставров // *Пластические массы*. – 2004. – №12. – С. 50–52.

31. Aliev, S.S. Analysis of physical-mechanical properties of new type of wood-polymer composite materials / S.S. Aliev, E.A. Egamberdiev, Yu.G. Akmalova, G.U. Ilkhamov // Harvard educational and scientific review. – USA. – 2023. – Vol.3. – P. 48–53.
32. Sturges, H. The choice of a class-interval / H. Sturges // J. Amer. Statist. Assoc. – USA. – 1926. – 21 p.
33. Тагер, А.А. Физико-химия полимеров (4-е изд-е, перераб. и дополненное). – М.: Научный мир. – 2007. – 573 с.
34. Захаров, А. Г. Научные основы химической технологии углеводов. – М.: ЛКИ. – 2008. – 348 с.
35. Akim, E.L. Relaxation state of wood and production of cellulose composites for energy purposes: wood briquettes and pellets / E.L Akim, A.A. Pekarets, S.Z. Rogovina, A.A. Berlin / Polymer Science. Series D. – Germany. – 2021. – № 1. – Vol. 14. – P. 102–105.
36. Пекарец, А.А. Упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов /А.А. Пекарец, О.А. Ерохина, В.В. Новожилов, Ю.Г Мандре, Э.Л. Аким // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – №1 (373). – С. 200–208.
37. Терентьев, О.А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. – М.: Лесн. пром-сть. – 1980. – 248 с.
38. Куров, В.С. Машины для производства бумаги и картона / В.С. Куров, Н.Н. Кокушин. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2017. – 646 с.
39. Тотухов, Ю.А. Гидрогазодинамика / Ю.А. Тотухов, С.В. Антуфьев, Э.И. Смирнова: учебно-практическое пособие. – СПб. – 2019. – 62 с.
40. Мидуков, Н.П. Биорефайнинг древесно-волокнутого сырья в композиции материала для аддитивных технологий / Н.П. Мидуков, В.С. Куров, Н.В. Евдокимов //Химические волокна. – 2023. – № 1. – С. 66–72.

41. Liu, T. Influence of polymer reagents in the drilling fluids on the efficiency of deviated and horizontal wells drilling / T. Liu, E. Leusheva, V. Morenov, L. Li, G. Jiang, C. Fang, L. Zhang, S. Zheng, Y. Yu // *Energies*. – 2020. – Vol.13. – P. 4704–4735.

42. Beloglazov, I. Modeling of heavy-oil flow with regard to their rheological properties / I. Beloglazov, V. Morenov, E. Leusheva, O.T. Gudmestad // *Energies*. – 2021. – 14 p.

43. ГОСТ 1929–87 Метод определения динамической вязкости на ротационном вискозиметре. – М.: Издательство стандартов. – 1988. – 18 с.

44. Barnes, H.A. A Handbook of elementary rheology / H.A. Barnes // Institute of non-newtonian fluid mechanics university of Wales. – Aberystwyth. – 2000. – 568 p.

45. Ellwood, K.R. Laminar jets of Bingham-plastic liquids / K.R. Ellwood, G.C. Georgiou, T.C. Papanastasiou, J.O. Wilkes // *J. Rheol.* – 1990. – № 34. – P.787–812.

46. Мошев, В.В. Реологическое поведение концентрированных неньютоновских суспензий // В.В. Мошев, В.А. Иванов. – М. – 1990. – 87 с.

47. Volfson, S.I. The physicommechanical and rheological characteristics of wood–polymer composites based on thermally and mechanically modified filler / S.I. Volfson, I.Z. Fayzullin, I.N. Musin, A.Z. Fayzullin, A.N. Grachev, S.A. Pushkin // *Plasticheskie Massy*. – Austria. – 2015. – № 6. – P. 39–43.

48. Lv, X. Rheological properties of wood–plastic composites by 3D numerical simulations: different components / X. Lv, X. Hao, R. Ou, T. Liu, G. Guo, Q. Wang, X. Yi, L. Sun // *Forests*. – 2021. – № 12. – P. 417–429.

49. Kirchhoff, N. Wood-plastic-composites: Rheologische Charakterisierung und Füllverhalten im Spritzgießprozess / N. Kirchhoff, C. Schröder, D. Stute, E. Moritzer, H. Schmid // *Chem. Ing. Tech.* – Germany. – 2012. – № 84. – P. 1584–1589.

50. Sarabi, M.T. Effect of polymeric matrix melt flow index in reprocessing extruded wood-plastic composites / M.T. Sarabi, A.H. Behraves, P. Shahi, Y. Daryabari // *Thermoplast. Compos.* – Saudi Arabia. – 2014. – № 27. – P. 881–894.

51. Окишева, М.К. Исследование реологических свойств частично сшитого альгината натрия для реализации процесса экструзионной 3D-печати / М.К. Окишева, А.А. Абрамов, П.Ю. Цыганко // *Успехи в химии и химической технологии.* – 2021. – Т. 35. – № 10 (245). – С. 98 – 100.

52. Ruban, R., H Wood polymer composites. Resent advancement and applications / R. Ruban, H. Mohit, P. Ramesh, V. Arul Mozhi Selvan, G. H. Kumar. – Springer. – 2021. – 268 p.

53. Евдокимов, Н.В. Исследование микроструктуры волокон в композиции сырья для применения в аддитивных технологиях / Н.В. Евдокимов, Н.П. Мидуков, В.С. Куров, М.В. Старицын, С.Н. Петров // *Химические волокна.* – 2022. – № 3. – С. 38 – 43.

54. 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.

55. 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. №3.

56. Аким, Э.Л. Синтетические полимеры в бумажной промышленности / Э.Л. Аким. – М.: Лесн. пром-сть. – 1986. – 248 с.

57. Аким, Э. Л. Взаимодействие целлюлозы и других полисахаридов с водными системами / Э.Л. Аким // *Научные основы химической технологии углеводов.* – М.: Изд-во ЛКИ. – 2008. – С. 265–348.

58. Akim, E.L. Interaction of Cellulose and other polysaccharides with water systems / E.L. Akim, edited by G.E. Zaikov // *Chemistry of polysaccharides.* - Leiden: VSP – Brill. – 2005. - P. 221–293.

59. Берлин, А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. – 4-е испр. и доп. изд. – СПб.: ЦОП «Профессия». – 2014. – 592 с.
60. Баженов, Л. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология / Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – М.: Интеллект. – 2010. – 347 с.
61. Ерыхов, Б.П. Неразрушающие методы исследования целлюлозно-бумажных и древесных материалов. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть. – 1987. – 225 с.
62. Mettler Toledo. Термический анализ на практике. Советы и рекомендации. [Электронный ресурс] URL: [www.eltemiks-lab.ru Termichesky-analiz.pdf](http://www.eltemiks-lab.ru/Termichesky-analiz.pdf). (дата обращения: 27.05.2023).
63. Mettler Toledo. Dynamic Mechanical Analysis. Sets new standarts. [Электронный ресурс] URL: <https://cdn.labwrench.com/eMan/manualNo>. (дата обращения: 27.05.2023).
64. Динамический механический анализ (ДМА). DMA 8000. Руководство для начинающих. Динамический термомеханический анализатор PerkinElmer DMA 8000. – SchelTech AG. – 2020. – 26 с.
65. ГОСТ Р 57739-2017 Композиты полимерные. Определение температуры стеклования методом динамического механического анализа. – М.: Стандартформ. – 2017. – 19 с.
66. ASTM E1640-18 Стандартный метод испытаний для определения температуры стеклования методом динамического механического анализа. – США. – 2018. – 6 с.
67. Zhang, S. Wood-reinforced composites by stereolithography with the stress whitening behavior / S. Zhang, S. Bhagia, M. Li, X. Meng, A.J. Ragauskas // Materials and Design. – 2021. – Vol. 206. – 8 p.
68. Xu, H. Mechanical Properties Variation in Wood-Plastic Composites with a Mixed Wood Fiber Size / H. Xu, Y. Yang, L. Li, B. Liu, X. Fu, X. Yang, Y. Cao // Materials. – 2023. – Vol. 16. – № 5801. – 14 p.

69. Song, Y. Effects of two modification methods on the mechanical properties of wood flour / Y. Song, Q. Wang, G. Han, H. Wang, H. Gao // Recycled plastic blends composites: addition of thermoplastic elastomer SEBS-g-MAH and in-situ grafting MAH. – 2010. – Vol. 21. – № 3. – P. 373–378.

70. Rosenthal, M. Liquid Deposition Modeling: a promising approach for 3D printing of wood / M. Rosenthal, C. Henneberger, A. Gutkes // European Journal of Wood and Wood Products. – Germany. – 2018. – № 1. – Vol. 76. – Pp. 797–799.

71. Rosenthal, M. Physical properties of wood-based materials for liquid deposition modeling / M. Rosenthal, M. Rüggeberg, C. Gerber, L. Beyrich, J. Faludi // Rapid Prototyping Journal. – UK. – №. 3. – Vol. 5. – 27 p.

72. Gardner, D.J. Additive manufacturing of wood-based materials for Composite applications. / D.J. Gardner, Lu Wang, J. Wang // Materials for Composite Applications Conference. – Spain. –2019. – 16 p.

73. Rosenthal, M. Liquid Deposition Modeling: a promising approach for 3D printing of wood / M. Rosenthal , C. Hennenberger, A. Gutkes, C. Bues // European Journal of Wood and Wood Products. – UK. – 2018. – №. 1. – Vol. 76. – P. 797 – 799.

74. Ponnusamy, P. Mechanical Properties of SLM-Printed Aluminium Alloys: A Review. Swinburne University of Technology, Faculty of Science, Engineering and Technology / P. A. Ponnusamy, R.R. Rizwan, H.M. Syed, R. Dong, S. Palanisamy // Defence Materials Technology Centre (DMTC) Limited. – Australia. – 2020. – P. 79 – 89.

75. Gardner, L. Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge / L. Gardner, P. Kyvelou, G. Herbert, C. Buchanan // Imperial College London, Department of Civil and Environmental Engineering – UK. – 2020. – P. 29 – 39.

76. Zhang, R. Mechanical properties and microstructure of additively manufactured stainless steel with laser welded joints / R. Zhang, C. Buchanan, V. Matilainen, D. Daskalaki-Mountanou , T.B. Britton, H. Piili, A. Salminen, L.

Gardner // University of Turku, Department of Mechanical and Materials Engineering. – Finland. – 2021. – 15 p.

77. Skylar-Scott, M.A. Biomanufacturing of organ-specific tissues with high cellular density and embedded vascular channels / M.A. Skylar-Scott, S. Uzel, L. Nam, J. H. Ahrens, R.L. Truby, S. Damaraju, G.L. Lewis // Science Advances. – USA. – 2019. – 13 p.

78. Murphy, S.V. Opportunities and challenges of translational 3D bioprinting / S.V. Murphy, P. De Coppi, A. Atala // Nature Biomedical Engineering. – USA. – 2020. – Vol. 4. – P. 370–380.

79. Shapira, A. 3D Tissue and Organ Printing – Hope and Reality / A. Shapira, T. Dvir // Advanced Science. – USA. – 2021. – 18 p.

80. Paranthaman, M.P. Binder Jetting: A Novel NdFeB Bonded Magnet Fabrication Process. / M.P. Paranthaman, C.S. Shafer, A.M Elliott // JOM. – Denmark. – 2016. – No. 68. – P. 1978 – 1982.

81. Meenashisundaram, G.K. Binder Jetting Additive Manufacturing of High Porosity 316L Stainless Steel Metal Foams / G.K. Meenashisundaram, Z. Xu, M.L.S. Nai, S. Lu, J. Wei, J.S. Ten // Singapore institute of Manufacturing Technology. – Singapore. – 2020. – 12 p.

82. Tee, Y.L. PolyJet 3D printing of composite materials: experimental and modeling approach. The 2<sup>nd</sup> Asia-pacific international conference on additive manufacturing / Y.L. Tee // The mineral, metals and Materials society. – South Korea. – 2020. – №1. – Vol. 72. – Pp. 1105–1117.

83. GL GORKY LIQUID, URL: <https://companies.rbc.ru/trademark/811880/gl-gorky-liquid/>. (дата обращения: 06.11.2023).

84. Cosmi, F., Mechanical characterization of SLA 3D-printed specimens for lowbudget applications / F. Cosmi, A. Dal Maso // Materials Today: Proceedings. – Netherlands. – 2020. – Vol. 32. – P. 194–201.

85. Taneva, I. Influence of post-polymerization processing on the mechanical characteristics of 3D-printed occlusal splints / I. Taneva, T. Uzunov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – P. 1492–1499.

86. Uzcategui, A. Understanding and Improving Mechanical Properties in 3D printed Parts Using a Dual-Cure Acrylate-Based Resin for Stereolithography / A. Uzcategui, M. Archish, L. Virginia, J.B. Ferguson // *Advanced Engineering Materials*. — Germany. — 2018. — 12 p.

87. Dall'Argine, C. Hot-Lithography SLA-3D Printing of Epoxy Resin / C. Dall'Argine, A. Hochwallner, N. Klikovits, R. Liska, J. Stampf, M. Sangermano // *Makromolecular materials and Engineering*. — UK. — 2020.

88. Мидуков, Н. П. Инженерная и компьютерная графика. Технологии 3D-печати, сканирования и моделирования деталей сложной формы: учебное пособие / Н. П. Мидуков, М. А. Литвинов // *М-во науки и высшего образования РФ, СПбГУПТД*. — СПб. — 2022. — 80 с.

89. Harris, M. Effect of Material and Process Specific Factors on the Strength of Printed Parts in Fused Filament Fabrication: A Review of Recent Developments / M. Harris, J. Potgieter, R. Archer, K.M. Arif // *Materials*. — Switzerland — 2019. — № 12. — 1664 p.

90. Oztan, C. Microstructure and mechanical properties of three dimensional-printed continuous fiber composites / C. Oztan, R. Karkkainen, M. Fittipaldi, G. Nygren, L. Roberson, M. Lane, E.Celik // *Journal of Composite Materials*. — USA. — 2018. — P.10.

91. Wickramasinghe, S. FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties / S.Wickramasinghe, T.Do P.Tran // *Defects and Treatments. Polymers*. — Australia — 2020. — No. 7. — Vol. 12. — P.1529 – 1538.

92. Кондрашов, С.В. Влияние технологических режимов fdm-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики fdm-моделей (обзор) / С.В. Кондрашов, А.А. Пыхтин, С.А. Ларионов, А.Е. Сорокин // *Труды ВИАМ*. — 2019. — №10 (82). — С. 34–49.

93. Rosenthal, M. Liquid Deposition Modeling: a promising approach for 3D printing of wood. / M. Rosenthal, C. Henneberger, A. Gutkes, C.T. Bues, //



European Journal of Wood and Wood Products. – Germany. – 2017. – No. 2. – Vol. 76. – P. 797–799.

94. Rosenthal, M. Physical properties of wood-based materials for liquid deposition modeling / M. Rosenthal, M. Rüggeberg, C. Gerber, L. Beyrich, J. Faludi // Rapid Prototyping Journal. – Britain. – 2020. – No.7. – Vol. 5. P. 3 – 22.

95. Douglas, J. Additive Manufacturing of Wood-based Materials for Composite Applications / J. Douglas, G. Erle, W. Lu // SPE Automotive Composites Conference & Exhibition At. – Britain. – 2019. – P. 172–187.

96. Pat. № 9283714 USA Multicolored fused deposition modelling print / Pridoehl M., Shmitt G., Poppe D., Kohlstruk S., Hammann B., Cremer S., Beks K., Dewaelheyns L.; publ. 2012. No. 14/116,244. 7 p.

97. Pat. № 2022/0009169 USA Three-dimensional imaging apparatus having multiple passive nozzles for modeling a multi material three - dimensional object / Moosberg M.; publ. 2021. No. 17/370,113. 17 p.

98. Пат. №996601 РФ Экструдер для 3D-принтера для многосопельной печати / Ваганов А.В., Макаров А.М., Шемелюнас С.С., Шведуненко А.А.; опубл. 2022, Бюл. № 23. 6 с.

99. Пат. №2724163 РФ Экструдер строительных смесей для 3D принтера / Маслов А.В.; опубл. 2019, Бюл. № 18. 16 с.

100. Евдокимов, Н.В. Характеристика древесных отходов при производстве технологической щепы с оценкой возможности их использования в аддитивных технологиях / Н.В. Евдокимов, А. Н. Кеутаева // Вестник СПбГУПТД. Промышленные технологии. – 2022. – №2. – С.119–123.

101. Богданова, А.Н. Разработка режимов измельчения березовой коры в мельнице / А.Н. Богданова, Д.А. Мелькова, А.А. Пиндюрина, И.Р. Смирнов // Вестник СПбГУПТД. Промышленные технологии. – 2020. – №4. – С. 74–78.

102. Пат. №111663U1 РФ Пикнометр / Сафонов Ю.К., Евдокимов Н.В.; опубл. 2011. Бюл. № 35. 2 с.

103. ГОСТ 11262–2017 Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М.: Изд-во Стандартиформ. – 2018.– 20 с.

104. Федоскин, И.А. Технология и дизайн при изготовлении рабочего колеса центробежного насоса с помощью 3D-технологий/ Н.П. Мидуков, Е.А. Петрова, Д.А. Мельникова, Г.К. Чудаков, В.С. Куров // Известия высших учебных заведений. Промышленные технологии. – 2020. – №3. – С. 85–89.

105. Евдокимов, Н.В. Исследование микроструктуры волокон в композиции сырья для применения в аддитивных технологиях / Н.В. Евдокимов, Н.П. Мидуков, В.С. Куров, М.В. Старицын, С.Н. Петров // Химические волокна. – 2022. – № 3. – С. 38 – 43.

106. Евдокимов, Н.В. Технология «FDM» печати в научно-педагогической деятельности вуза / Н.В. Евдокимов, М.А. Мартынов, Д.Д. Темирбулатов // Вестник СПбГУПТД. Промышленные технологии. – 2021. – №4. - С. 75–82.

107. Лазерный дифракционный анализатор размера частиц Mastersizer 2000. Технические характеристики. [Электронный ресурс] URL: <https://malvern.nt-rt.ru/images/manuals/1-3.pdf> (дата обращения: 24.04.2022).

108. 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.

109. TESCAN MIRA3 microscope. – URL: [www.tescan.com/en-us/technology/sem/mira3](http://www.tescan.com/en-us/technology/sem/mira3). (дата обращения: 24.04.2022).

110. TESCAN MIRA3 microscope. – URL: [www.tescan-uk.com/tecnology/sem/mira3](http://www.tescan-uk.com/tecnology/sem/mira3) (дата обращения: 24.04.2022).

111. Мидуков, Н.П. Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки / Н.П. Мидуков, В.С. Куров, К.Х. Эрматова, А.С. Смолин, П.А. Сомов // Химия растительного сырья. – 2019. – №4. – С. 387–397.

112. Пат. № 2795190 РФ Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала / Куров В.С., Литвинов М.А., Зильберглейт М.А.; опубл. 26.06.2022, Бюл. № 13.

113. 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.

114. Midukov, N.P. 3D technology in production of sealed containers for chemical industry devices. / N.P. Midukov, M.A.Fadeeva, P.V.Kaurov, V.S. Kurov, P.A.Gashin // Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM) – Serbia – 2016. – Vol.7. – №3. – P. 87–92.

115. Мидуков, Н.П. Использование 3D печати для создания элементов оборудования химической технологии / Н.П. Мидуков, В.С. Куров // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2021. – № 3. – С. 132–137.

116. 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; опубл. 28.09.2023. Бюл. №28.

117. ГОСТ 1929–87 Метод определения динамической вязкости на ротационном вискозиметре. – М: Изд-во стандартов. – 1988. – 18 с.

118. Barnes, H.A. A Handbook of elementary rheology / H.A. Barnes // Institute of non-newtonian fluid mechanics university of Wales – Aberystwyth – 2000. – 568 p.

119. Мартыненко, М.Г Соппротивление материалов. Механические испытания при статических нагрузках на КСИМ-40 / М.Г Мартыненко, М.И. Антипин // Методические указания по выполнению лабораторных работ / Изд-во ИрГТУ. – Иркутск, – 2008. – 32 с.

120. ГОСТ 24622 – 91 Пластмассы. Определение твердости. Твердость по Роквеллу. – М.: Изд-во стандартов. – 1993. – 19 с.

121. Руководство по ImageJ. [Электронный ресурс] URL: [imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf](http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf) (дата обращения 24.04.2023).

122. Мидуков, Н.П. Сравнительная оценка микроструктуры бумаги с помощью программ ImageJ и AutoCAD / Н.П. Мидуков, В.С. Куров, М.А. Литвинов, М.А. Зильберглейт // Вестник СПбГУПТД. – 2022. – №1. – С.110–113.

123. Midukov, N.P. Comparative Evaluation of the Fibrous Composite. Material Microstructure Using Digital Technologies / N.P. Midukov, V.S. Kurov, M.A. Litvinov, M.A. Zil'bergleit // Fibre Chemistry. – 2022. – № 2. – Vol. 54. – P. 88–92.

124. Мидуков, Н.П. Оценка пористости двухслойного волокнистого композиционного материала различными методами цифровой обработки микроструктуры / Н.П. Мидуков, М.А. Зильберглейт, В.С. Куров, М.А. Литвинов // Химическая технология. – 2022. – № 3 (23). – С. 109–116.

125. Мидуков, Н. П. Оценка распределения размолотых частиц древесины лиственницы по размерам с помощью оптической микроскопии и программы ImageJ / Н. П. Мидуков, Т. И. Ефремов, Н. В. Евдокимов // Вестник СПбГУПТД. Серия 4. Промышленные технологии. – 2023. – №3. – С.119–123.

126. Касаткин, А.Г Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г Касаткин. – М.: Альянс. – 2006. – 753 с.

127. Зудилова, Т.В. Работа пользователя в Microsoft Excel 2010: учебное пособие / Т.В. Зудилова, С.В. Одиноккина, И.С. Осетрова, Н.А. Осипов. – СПб.: НИУ ИТМО. – 2012. – 87 с.

128. Евдокимов, Н.В. Определение параметров получения древесных брикетов с допустимой влагопрочностью / Н.В. Евдокимов, Н.П. Мидуков // Вестник СПбГУПТД. Серия 4. Промышленные технологии. – 2021 – №3. – С. 56–59.

129. Евдокимов, Н.В. Определение параметров получения формованных изделий из древесных отходов // Международная научн.-практ. конф. «Pар-For» / Н.В. Евдокимов. – СПб.: СПбГУПТД ВШТЭ. – 2021. – 12 с.

130. 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 научных исследований XXI века: сб. докл. и сообщений. – Воронеж. – 2014. – С. 65–67.

131. Евдокимов, Н.В. Повышение характеристик топливных брикетов с

использованием физико-механических воздействий на технический гидролизный лигнин / Н.В. Евдокимов, А.В. Александров // Научный форум с международным участием: материалы науч.-техн. конф. – 2014. – Воронеж. – С. 22–29.

132. Кишко, А.В. Компьютерное твердотельное моделирование: учеб. пособие / А.В. Кишко, Н.В. Евдокимов, И.В. Поротикова. – СПб.: СПбГУПТД. – 2019. – 50 с.

133. Жарков, Н.В. AutoCAD 2016: полное руководство / Н.В. Жарков, М.В. Финков, Р.Г. Прокди. – М.: Наука и техника. – 2016. – 600 с.

134. ГОСТ 11262–80 Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М.: Изд-во стандартов. – 1980. – 19 с.

135. ГОСТ 4651–2014 Пластмассы. Метод испытания на сжатие. – М.: Изд-во стандартов. – 2015. – 19 с.

136. Мидуков, Н.П. Процессы и аппараты: учебно-практическое пособие для выполнения лабораторных работ/ Н.П. Мидуков, В.С. Куров, А.О. Никифоров. – СПб.: СПбГУПТД. – 2016. – 108 с.

137. ISO\_5725–2 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. – Geneva. – 1994. – 12 p.

138. Harker, J.H, Chemical Engineering (Fifth Edition) / J.H. Harker, J.R. Backhurst, J.F. Richardson. – 2002 – Vol. 2. – 1229 p.

139. Sturges, H. The choice of a class-interval / H. Sturges // J. Amer. Statist. Assoc. – 1926. – 21 p.

140. Азаров, В.И. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник для вузов / В.И. Азаров, А.В. Буров, А.В. Оболенская. – СПб.: СПбЛТА. – 1999. – 628 с.

141. Берлин, А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: уч. пособие. – 4-е испр. и доп. изд. / А.А. Берлин: – СПб.: ЦОП «Профессия». – 2014. – 592 с.

142. Niska, K.O. Detail about wood polymer composites / K.O. Niska. –

Elsevier. – 2021. – 384 p.

143. Лунин, В.В. Физическая химия лигнина / В.В. Лунин, К.Г. Богалицын и др. – М.: Академкнига. – 2010. – 484 с.

144. Wertz, J.L. Hemicelluloses and Lignin in Biorefineries / J.L.Wertz, M. Deleu, S. Coppée, A. Richel // CRC Press. Taylor & Francis Group. – 2018.– 308 p.

145. Чупка, Э.И. Окислительно-восстановительные превращения лигнина и углеводов при щелочных обработках древесины / Э.И. Чупка. — СПб.: Медиапаяир. – 2023. — 498 с.

146. Полимерные свойства лигнина и его производных / под ред. К.В. Сарканена, К.Х. Людвига – М.: Лесн. пром-сть. – 1975. – 632 с.

147. Аким, Э.Л. Биорефайнинг древесины / Э.Л. Аким // Химические волокна // Химические волокна. – №3. – 2016. – С. 14-18.

148. Smolin, A.S., Akim E.L. Role of the relaxation state of polymer components in wood when making composite packaging materials (corrugated cardboard) / A.S. Smolin, E.L. Akim // Fiber Chemistry. – 2018. – Vol. 50. – № 4. – 2018.

149. Akim, E.L. Change in Relaxation State of Polymer Components of Wood During its High-Temperature Biorefining / E.L. Akim, Y.G. Mandre, A.A. Pekaretz // Fibre Chemistry. – 2019. – Vol. 51. – №3. – P. 164-169.

150. Аким, Э.Л. Релаксационное состояние древесины и получение целлюлозных композитов энергетического назначения — древесных брикетов и пеллет / Э.Л.Аким, А.А. Пекарец, С.З. Роговина, А.А. Берлин. Аким Э.Л. Энциклопедический справочник. – 2020. – №3. – С. 2-8.

151. Аким, Э.Л. Усталостная прочность древесины и релаксационное состояние её полимерных компонентов / Э.Л. Аким, С.З. Роговина, А.А. Берлин // Химия, науки о материалах. Доклады Российской Академии Наук. – 2020. Т. 491. – С. 73–76.

152. Akim, E.L. Influence of Relaxation State of Polymeric Components of Wood on Its Fatigue Strength / E.L. Akim, S.Z. Rogovina, A.A. Berlin. – 2023. – Vol. 8. – P. 87-94.

153. 3D Assembly instruction. Mbot 3D-desktop. – China. – 2012. – 14 p.
154. ISO 2039–2\_Plastics—Determination of Hardness—Part 2: Rockwell Hardness. – Geneva, Switzerland. – 1987. – 8 p.
155. Ngo, T.D. Additive manufacturing (3D-printing): A review of materials, methods, applicants and challenges / T.D. Ngo // Composites Part B. – 2018. – No. 143. – P. 172–196.
156. Welcome to Cura. – URL: <https://docs.rs-online.com/a10b/0900766b81376d80.pdf> (дата обращения: 21.04.2023).
157. Witbox Repetier-Host Manual. – URL: [https://www.3d-printerstore.ch/images/witbox/EN/Manual\\_Repetier\\_EN.pdf](https://www.3d-printerstore.ch/images/witbox/EN/Manual_Repetier_EN.pdf) (дата обращения: 21.04.2023).
158. MakerBot Replicator 2 / Руководство пользователя. – URL: <https://images.makerbot.com/support/production/mt105.pdf> (дата обращения: 21.04.2023).
159. EasyWare / Easyware series Slicer User’s Manual. – URL: <http://163.171.142.75/7583133.s21d-7.faiusrd.com/61> (дата обращения: 21.04.2023).
160. How to Use ReplicatorG. – URL: <https://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/spring15/group11/doc/AppNote/Application%20Note.pdf> (дата обращения: 21.04.2023).
161. MBot Cube Duo 3D Printer / User Manual. – URL: <https://www.pellissier.co.za/hermien/wpcontent/uploads/sites/2/2017/05/MBot-Cube-Duo-3D-Printer-User-Manual.pdf> (дата обращения: 21.04.2023).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Результаты стат. обработки данных распределения частиц по размерам

Древесина	Циклы	Количество данных	Ширина интервала, мкм	Средняя взвешенная, мкм	Мода, мкм	Медиана, мкм	Характер распределения
Бук	0	106	100	851	780	800	нормальное
Бук	1	48	100	505	506	493	нормальное
Бук	3	404	100	233	134	198	отлично от нормального
Бук	5	410	100	228	184	209	умеренно асимметричный
Бук	10	661	100	188	126	161	умеренно асимметричный
Дуб	0	207	100	555	—	505	нормальное
Дуб	1	135	100	346	445	349	нормальное
Дуб	3	275	100	308	255	289	нормальное
Дуб	5	290	100	216	140	194	умеренно асимметричный
Дуб	10	808	100	159	107	127	нормальное
Лиственница	0	68	100	858	742	781	умеренно асимметричный
Лиственница	1	86	100	348	127	258	умеренно асимметричный
Лиственница	3	226	100	208	102	135	умеренно асимметричный
Лиственница	5	338	100	171	97	135	умеренно асимметричный
Лиственница	10	438	100	141	84	106	умеренно асимметричный
Ольха	0	155	100	663	106	547	отлично от нормального
Ольха	1	144	100	418	137	382	нормальное
Ольха	3	219	100	253	106	198	умеренно асимметричный
Ольха	5	150	100	273	111	230	отлично от нормального
Ольха	10	464	100	237	113	199	отлично от нормального
Сосна	0	78	100	810	115	640	отличного от нормального
Сосна	1	488	100	176	112	146	умеренно асимметричный
Сосна	3	352	100	177	104	131	умеренно асимметричный
Сосна	5	349	100	161	109	133	умеренно асимметричный
Сосна	10	259	100	165	96	123	умеренно асимметричный



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

СОГЛАСОВАНО  
Директор ВШТЭ СПбГУПТД

проф. Лужини Н.В.



УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор

Марченко Е.М.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт удостоверяет успешное выполнение научно-технической работы в рамках темы «Технология подготовки композита на основе древесины для послойного формования изделий», целью которой является, получение древесной муки, с дальнейшим её использованием в аддитивных технологиях.

Работа включала в себя следующие задачи:

1. Проведение лабораторных исследований с использованием дисковой мельницы.
2. Разработка и внедрение метода оценки размера частиц древесины до и после измельчения с использованием оптической микроскопии и бесплатной программы.
3. Анализ удельных энергозатрат на измельчение древесины разных пород в Северо-Западном регионе.

Работа реализована в виде подготовки древесной муки для композиционного материала, предназначенного для 3D-печати, сравнения удельных энергозатрат на измельчение пород древесины, предоставления практических рекомендаций производителям размольного оборудования. Использование экономически эффективной оптической микроскопии и бесплатного программного обеспечения для оценки размера частиц древесной муки при размоле имеет значительную практическую ценность для малых отечественных предприятий в России, позволяя быстро и удобно оценить качество древесной муки и удельные энергозатраты на размол.

Экономический эффект производства древесной муки и оценка ее качества различны для каждого предприятия, занимающегося производством дробильно-измельчительного оборудования.

Малые и средние предприятия не могут инвестировать в дорогостоящее оборудование для оценки распределения частиц по размерам, для чего обычно требуется специализированное и дорогостоящее импортное оборудование, такое как анализатор частиц Mastersizer3000. Альтернативный подход включает экономичную оптическую микроскопию и бесплатную программу ImageJ. Экономический эффект определяется путем сравнения стоимости импортного оборудования для гранулометрического анализа с ценой оптического микроскопа, оснащенного цифровой камерой.

Импортное оборудование: Mastersizer3000, (Великобритания)	Предлагаемый способ: Мик-мед, Био-мед или др., (Научн. приборы,... Россия)
18 000 \$ ≈ 1 650 000 руб.	80 000 руб
Экономический эффект:	1 570 000 руб.

Заказ гранулометрических исследований в ведущих научных центрах со счетчиком частиц Mastersizer3000 может обойтись небольшому заводу примерно в 100 000 рублей за одну серию экспериментов. Однако альтернативный метод с использованием оптического микроскопа и компьютера можно выполнить самостоятельно в заводской лаборатории без дополнительных финансовых затрат.

Исполнители ВШТЭ СПбГУПТД

«Зав. каф. ИГАП, д.т.н. Мидуков Н.П.

Ст. преподаватель каф. ИГАП, Евдокимов Н.В

Директор по производству  
ООО ДробТехМаш»

Коршунов В.В.

СОГЛАСОВАНО  
 Директор ВШТЭ СПбГУПТД  
 проф. Луканин П.В.



УТВЕРЖДАЮ  
 Исполнительный директор ООО «Эко Пэкоджинг Интернейшнл Компани»  
 Трушников М.А.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

Настоящим актом удостоверяется, выполнение научно-технической работы в рамках темы «Технология подготовки композита на основе древесины для послойного формования изделий», целью которой является, изготовление деталей линии по производству литой тары.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработана техническая документация на лопатки (толкатели) конвейера для перемещения литой бумажной тары (бугорчатых прокладок для упаковки яиц).
2. Использованы различные виды полимеров для изготовления лопаток.
3. Проведены промышленные испытания деталей, полученных из древесно-полимерного композита по технологии жидкого нанесения композита и экструзии полимерного прутка (LDM/FDM).

Форма внедрения: комбинированная технология (LDM/FDM) 3D-печати для изготовления деталей оборудования линии по производству литой тары на примере толкателей конвейера.

На сегодняшний день в России отсутствует производство оборудования для изготовления литой тары, что приводит к необходимости закупок зарубежных комплектующих.

3D-принтеры позволяют производить модифицированные детали внутри страны, что дает экономические преимущества. Экономическая оценка проводится в каждом конкретном случае с учетом разницы в затратах на 3D-моделирование, 3D-печать и закупку иностранных комплектующих, а также подчеркивает экономическую эффективность использования древесно-полимерных композитов при производстве толкателей с использованием 3D-принтеров.

Стоимость 50 лопаток при заказе из страны производителя (при расчёте 90 руб./\$),	$25 \cdot 90 \cdot 50 = 112\ 500$ руб.
Доставка	$50 \cdot 90 = 4500$ руб.
3D-моделирование	500 руб.
Стоимость древесно-полимерного композита при стоимости 0,93 руб./см <sup>3</sup>	$10 \cdot 50 \cdot 0,93 = 465$ руб.
Контур из водорастворимого полимера 5 руб./г	$5 \cdot 30 \cdot 50 = 7500$ руб.
Расчёт удельных энергозатрат при цене на электроэнергию 5 руб./кВтч	$50 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot 4 = 500$ руб.
Экономический эффект от импортозамещения 50 лопаток линии по производству литой тары	108 535 руб.

Экономический эффект от импортозамещения 50 лопаток линии по производству литой тары:

$117\ 000 - (500 + 7500 + 465) = 108\ 535$  руб. от импортозамещения 50 лопаток конвейера.

Исполнители:

ВШТЭ СПбГУПТД  
 Д.т.н., заведующий кафедрой ИГАП  
 Мидуков Н.П.

Ассистент кафедры ИГАП  
 Евдокимов Н.В.

Директор по производству  
 ООО «Эко Пэкоджинг Интернейшнл Компани»

Ильин А.В.