

*На правах рукописи*

Албаррам Фатыма

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БУМАГИ  
ИЗ СМЕСИ ПЕРВИЧНОГО И ВТОРИЧНОГО  
ВОЛОКНА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Архангельск 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

**Научный  
руководитель:**

**Казakov Яков Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических  
производств ФГАОУ ВО «Северный (Арктический)  
федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

**Официальные  
оппоненты:**

**Просвирников Дмитрий Богданович,**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры химической кибернетики  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технологический университет»

**Мидукова Мария Александровна**  
кандидат технических наук, старший преподаватель  
кафедры технологии целлюлозы и композиционных  
материалов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет промышленных  
технологий и дизайна»

**Ведущая  
организация:**

**ФГБОУ ВО «Уральский государственный  
лесотехнический университет»**

Защита состоится «21» мая 2026 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.02 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета, А-233.

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

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Махотина Людмила Герцевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Переработка отходов и использование вторичных материалов для создания новых продуктов стали важной частью стратегии устойчивого развития в современном мире. В последние десятилетия вопросы минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду становятся всё более актуальными, особенно в отраслях, связанных с производством бумаги.

Одной из актуальных проблем лесной промышленности является образование и накопление лесосечных отходов. Отходами являются ветви, вершины, которые целесообразно использовать как дополнительное сырьё для целлюлозно-бумажной промышленности.

При реализации программ более эффективного использования ресурсов и сокращения экологического ущерба при производстве бумаги важным является использование вторичного волокна, и в настоящее время в мировом производстве бумаги и картона доля макулатуры в общем балансе волокна превышает 50 %. Бумага и картон из макулатуры в настоящее время являются массовыми продуктами, особенно при производстве тароупаковочных видов бумаги и картона, а макулатурные виды лайнера (тест-лайнера) и флютинга заняли значимое место в производстве гофрированного картона и гофротары. Вместе с тем, по бумагообразующим свойствам, вторичные волокна уступают первичным, и производители макулатурных видов бумаги и картона находятся в постоянном поиске путей решения этой проблемы.

Одним из решений по регулированию уровня бумагообразующих свойств вторичного волокна, увязанного с задачей ресурсосбережения, является использование целлюлозного волокна, полученного из лесосечных отходов в виде ветвей и вершинок, которые составляют около 20...25 % от всей древесины. Это позволяет сократить объём отходов и снизить нагрузку на леса и сократить величину углеродного следа.

Получение количественных закономерностей, связывающих физико-механические свойства бумаги с составом по волокну при использовании новых видов полуфабрикатов, является актуальной задачей, востребованной как исследователями, так и производителями.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованием бумагообразующих свойств волокнистых полуфабрикатов различного происхождения занимались известные российские и иностранные ученые: С.Н. Иванов, Д.М. Фляте, В.И. Комаров, А.С. Смолин, Л.Г. Махотина, Ф.Х. Хакимова, Дж.Кларк, J.P. Casey, D. Page, O. Kallmes, Van der Akker, K. Niskonen, H. Karlsson, и другие. Вопросы восстановления бумагообразующего потенциала волокон из вторичного сырья рассматривали Д.А. Дулькин, В.А. Спиридонов, В.А. Житнюк, I. Ervasti и R. Miranda и другие.

**Цель исследования:** Оценить возможность использования листовых лесосечных отходов, представленных ветвями и вершинками, в качестве альтернативного сырья для получения бумаги с пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью.

### **Задачи исследования:**

1. Оценить возможность получения сульфатным способом полуфабриката из древесины ветвей осины как альтернативы целлюлозы из ствольной части спелой древесины и определить характерный уровень свойств полученных волокнистых полуфабрикатов.

2. Установить закономерности и особенности изменения при размоле свойств сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей и ствола осины;

3 Разработать методику комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна;

4. Оценить результаты введения в композицию упаковочной бумаги из макулатуры сульфатной ЦВВ из ветвей осины при получении бумаги с пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью.

**Объектом исследования** является технология бумаги из нетрадиционных видов древесного сырья и вторичного волокна.

**Предметом исследования** являются структурно-морфологические, прочностные и деформационные свойства сульфатной небеленой целлюлозы высокого выхода из ветвей осины и свойства бумаги из вторичного волокна, включающей волокно из ветвей древесины.

**Научная новизна.** Определены и описаны количественно основные особенности структурно-морфологических, деформационных и прочностных свойств сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей древесины осины.

С применением современных методов инструментального анализа, получены новые данные о характеристиках волокон сульфатной небеленой целлюлозы из ветвей осины, и особенностях их изменения при размоле по сравнению с волокнами целлюлозы из стволовой части древесины.

Установлены количественные закономерности, связывающие композицию бумаги по волокну, включающую целлюлозу высокого выхода из ветвей древесины осины, с характеристиками деформативности и прочности бумаги тароупаковочного назначения из вторичного волокна.

**Теоретическое и прикладное значение.** Получены сравнительные данные о бумагообразующих свойствах небеленой целлюлозы высокого выхода из ветвей осины, позволяющие установить степень различия от целлюлозы из стволовой части древесины и перспективы использования для получения упаковочной бумаги. Установлены особенности изменения структурно-размерных, прочностных и деформационных свойств при размоле небеленой целлюлозы из ветвей и ствола осины. Разработана методика комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна, позволяющая выполнять пост-настройку алгоритмов расчета, получать численные и графические результаты, и экспортировать их для дальнейшего сравнительного анализа. Разработаны рекомендации по введению в композицию бумаги тароупаковочного назначения из вторичного волокна сульфатной ЦВВ из ветвей осины, что позволяет получить материал, обладающий достаточным уровнем деформационных и прочностных свойств, пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью.

**Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности.** Результаты, выносимые на защиту, относятся к пунктам 2 «Химия, физико-химия и биохимия основных компонентов биомассы дерева и иных одревесневших частей растений, композиты, продукты лесохимической переработки» и 4 «Технология и продукция в деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих производствах» паспорта научной специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

**Апробация результатов исследования.** Основные положения работы докладывались и получили положительную оценку на: XX и XXI международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса», Вологда, 2022 и 2023 г., «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревообработки», Казань, 2023 г., VII и VIII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» в г. Архангельск, 2023 и 2025 гг., XIII Международной научной конференции «Химия и технология растительных веществ», Сыктывкар, 2024 г.; X Всероссийской научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование», Санкт-Петербург, 2025 г.; XI Международной конференции «Физикохимия растительных полимеров» в г. Архангельск, 2025 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных трудов, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Структура работы.** Диссертация включает в себя: введение, аналитический обзор литературы, методическую часть, экспериментальную часть, включающую 3 раздела, общие выводы, библиографический список и приложение. Содержание работы изложено на 170 страницах, включая 66 рисунков и 16 таблиц, библиографический список содержит 133 наименования.

**Материал исследования.** Для получения волокнистого полуфабриката использованы ствол и ветви осины (*Populus Tremula*), местом произрастания которых является Приморский район Архангельской области, а также макулатура марки МС-5б.

**Теоретическая база и методология исследования.** Методологической базой исследования являются положения о свойствах исходных веществ и материалов, которые в конечном счете формируют эксплуатационные свойства целлюлозно-бумажных материалов. Использование приборной базы ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» и ЦКП НО «Арктика» позволяют получить новую информацию о строении и свойствах волокнистых полуфабрикатов, использование которых соответствует парадигме устойчивого развития.

**Использование результатов диссертационной работы.** Разработана и принята для практического использования в ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ методика представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна (МВИ 03-2025). Результаты диссертационной работы применяются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Химическая технология».

**Автором выносятся на защиту основные положения диссертационной работы:**

1. Результаты определения свойств и компонентного состава древесины из лесосечных отходов осины (*Populus Tremula*) в сравнении с древесиной из стволовой части.

2. Установленные отличия в свойствах сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей и ствола осины.

3. Установленные закономерности формирования структурно-морфологических, прочностных и деформационных свойств целлюлозы из ветвей осины в процессе размола.

4. Способ обработки и представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на анализаторе волокна Fiber Tester.

5. Результаты введения в композицию упаковочной бумаги из вторичного волокна небеленой целлюлозы из ветвей осины.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Введение.** Обозначена актуальность темы исследования, сформулированы цель работы и задачи, подлежащие исследованию, указаны положения, выносимые на защиту.

**Обзор литературы.** Рассмотрено развитие бумажной промышленности в историческом и региональном контексте, а также освещаются ключевые аспекты технологии производства бумаги. Приведён исторический обзор становления бумажной промышленности, особое внимание уделено развитию отрасли в России и Сирии. Рассмотрены современные технологии получения бумажной массы, включая механические, химические и полухимические методы, а также процедуры первичной обработки древесины.

Проанализированы виды сырья, используемого в производстве бумаги: хвойные, лиственные, а также вторичное сырьё – макулатура. Отдельное внимание уделено физико-химическим свойствам осины (*Populus tremula*) как перспективного сырья, особенно её ветвей.

Отражены современные направления в повышении экологичности и ресурсоэффективности бумажного производства, включая использование отходов лесозаготовок и вторичных волокон. Показано, что добавление новых типов растительных волокон в бумажную композицию позволяет улучшить прочностные и функциональные характеристики продукции на основе макулатуры. Особое внимание уделено технологическим и структурным аспектам волоконных полуфабрикатов, а также методам их анализа.

**Методическая часть.** В качестве объектов исследований были использованы образцы древесины из ствола и ветвей деревьев осины, произрастающей в Приморском районе Архангельской области, и лабораторные образцы бумаги из вторичного волокна с добавками небеленой целлюлозы из ветвей осины.

Для оценки структуры и свойств применяли микроскопические, оптические, ультразвуковые и механические методы анализа. В исследованиях применялись традиционные (определение плотности, массы  $1 \text{ м}^2$ , межволоконных сил связи, испытание на растяжение, сжатие, продавливание, раздирание и др.), и специальные методы. Определение деформационных и прочностных характеристик проводили на лабораторных отливках массой 60 и 75 г/м<sup>2</sup>; определение структурно-морфологических характеристик волокон на анализаторе *L&W Fiber Tester*, определение собственной прочности волокон на установке *Pulmac Zero-Span 1000* в соответствии с *TAPPI T 231 cm-96*. При исследовании волокон целлюлозы был использован оптический микроскоп *Imager M2m Carl Zeiss*. При выполнении работы использовано оборудование ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера», Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова.

**Экспериментальная часть состоит из 3 разделов.**

### **1. Получение сульфатным способом полуфабриката из древесины ветвей осины как альтернативы целлюлозы из стволовой части спелой древесины**

Ветви осины для изучения были взяты от того же дерева, что и ствол, что позволило исключить другие факторы. Образцы из ствола и ветвей, рисунок 1, после ручной окорки были распилены на шайбы высотой 2,5 см, из которых вручную получена щепа размерами  $15\pm 3 \times 25\pm 2 \times 5\pm 1$  мм. Опилки, полученные от поперечной распиловки ветвей и ствола, были просушены и отсортированы на сите с перфорацией 0,25 мм, после чего использованы для изучения химического состава древесины.



Рисунок 1 – Образцы из ствола и ветвей осины, использованные в исследовании

Кроме естественных различий в поперечных размерах, количестве годовых колец на срезе и толщине годовых колец, плотность древесины из ветвей ( $608 \text{ кг/м}^3$ ) оказалась значительно выше, чем у древесины из ствола ( $501 \text{ кг/м}^3$ ), таблица 1. Отмеченные различия в физических свойствах образцов влияют на взаимодействие древесины с влагой, находящейся в воздухе. Щепа из ветвей осины в сравнении со щепой, полученной из ствола имеет меньшую влажность (8,6 против 13,1 %), хотя условия хранения у них были одинаковые.

Таблица 1 – Физические свойства древесины ветвей и ствола осины

Параметр	Вид сырья	
	Ветви	Ствол
Средний диаметр, мм	$20,6 \pm 1$	$166 \pm 2$
Средняя толщина коры, мм	$4 \pm 0,5$	$6 \pm 0,5$
Количество годовых колец на срезе	6-8	22
Среднее число годовых колец на 1 см	4	3
Базисная плотность, $\text{кг/м}^3$	608	501
Относительная влажность после хранения в помещении, %	7,8	13,1

Результаты анализа компонентного состава приведены в таблице 2, и находятся в диапазоне значений, приводимых в литературе.

Таблица 2 – Химический состав древесины ветвей и ствола осины

Компоненты древесины	Ветви осины, % а.с.д.	Ствол осины, % а.с.д.
Целлюлоза	$44,9 \pm 2,0$	$53 \pm 2,0$
Лигнин	$17 \pm 1,5$	$15 \pm 1,5$
Зольность	$0,55 \pm 0,05$	$0,26 \pm 0,05$
Экстрактивные вещества, растворимые		
В хлористом метилене	$1,4 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$
В холодной воде	$1,9 \pm 0,1$	$4,05 \pm 0,1$
В горячей воде	$3,3 \pm 0,1$	$4,43 \pm 0,1$

При общей схожести химического состава древесины ветвей с древесиной ствола осины, имеют место характерные особенности. Древесина ветвей, по сравнению с древесиной ствола, содержит меньше целлюлозы на  $8 \pm 2,0$  %, больше лигнина на  $2 \pm 1,5$  %, на  $0,7 \pm 0,1$  %, меньше экстрактивных веществ, растворимых в хлористом метиле. Зольность образцов различается практически в 2 раза – 0,55 против 0,26 %.

Варка сульфатной целлюлозы проводилась в лабораторной автоклавной системе CAS-420, условия и результаты варки представлены в таблице 3. Одинаковые условия варки сырья с отличающейся морфологией должны показать различия в качестве волокнистого полуфабриката. Получена целлюлоза с общим выходом 60-62 %, что соответствует выходу целлюлозы высокого выхода (ЦВВ) и числом каппа 56-60 единиц, что соответствует содержанию лигнина около 9 %. По выходу и содержанию лигнина эти полуфабрикаты можно отнести к целлюлозе высокого выхода, используемой для производства картона и упаковочной бумаги.

Таблица 3 – Условия и результаты сульфатной варки щепы из ветвей и ствола осины

Параметр	Вид сырья	
	Ветви	Ствол
Условия варки		
Расход активной щелочи на варку, в ед. Na <sub>2</sub> O, к а.с. древесине	14,5	14,5
Гидромодуль	4	4
Общая продолжительность варки, мин	135	135
Результаты варки		
Выход а.с. целлюлозы, %	57	59
Количество непровара, %	3,5	2,5
Число Каппа	52	54
Содержание сухих веществ в черном щелоке, г/л	105	98
Содержание активной щелочи в черном щелоке, г/л Na <sub>2</sub> O	5,0	6,1

Несмотря на различия в плотности и компонентном составе, результаты варок щепы из ветвей и ствола получились близкими. У целлюлозы из ветвей меньше выход сортированной целлюлозы на 2,6 %, непровара больше на 1 %, различия в величине числа каппа не превышают 2 единиц. Для целлюлозы высокого выхода такие различия нельзя считать значимыми.

Образцы целлюлозы (степень помола 14°ШР) были размолоты в мельнице Йокро при концентрации 6 % до 30°ШР. Измерения структурно-морфологических свойств проводили на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester, результаты представлены в таблице 4.

После размола свойства волокон изменяются. По сравнению с целлюлозой из ствола, волокна целлюлозы из ветвей более короткие (0,536 против 0,834 мм), с меньшей шириной, менее изогнутые (фактор формы 91,9 против 89,3) и имеют меньше изломов на 1 мм длины волокна (0,05 против 0,15), обладают меньшей грубостью, а также меньшей средней длиной прямолинейных сегментов (0,49 против 0,63 мм).

В целом, целлюлоза из ветвей обладает короткими, тонкими и прямыми волокнами, которые менее повреждены при варке, что подтверждается меньшим количеством изломов. При меньшей длине волокна обращает внимание малое содержание мелочи (2,6 против 6,0 %).

Таблица 4 – Структурно-морфологические свойства волокон сульфатной целлюлозы ветвей и ствола осины

Параметр	Целлюлоза из ветвей				Целлюлоза из ствола			
	14 °ШР	30 °ШР	Изменение		14 °ШР	30 °ШР	Изменение	
			абс.	отн., %			абс.	отн., %
Средняя длина волокна, мм	0,586	0,536	-0,050	-8,5	0,862	0,834	-0,028	-3,3
Средняя ширина волокна, мкм	24,7	20,6	-4,1	-16,6	26,8	24,0	-2,8	-10,5
Средний фактор формы, %	91,9	89,9	-2,0	-2,2	89,3	88,7	-0,6	-0,7
Содержание мелочи (<0,2 мм), %	2,6	3,2	+0,6	+23,1	6,0	6,6	+0,6	+10,0
Число изломов на 1 мм	0,454	0,352	-0,102	-22,5	0,646	0,460	-0,186	-28,8
Число больших изломов на 1 мм	0,049	0,099	+0,050	+102,0	0,15	0,124	-0,026	-17,3
Число изломов на волокно	0,241	0,194	-0,047	-19,5	0,485	0,346	-0,139	-28,7
Число больших изломов на волокно	0,026	0,055	+0,029	+111,5	0,112	0,093	-0,019	-16,0
Средняя длина сегмента, мм	0,486	0,508	+0,022	+4,5	0,629	0,674	+0,045	+7,2

При размоле наблюдается закономерное и типичное для волокнистых полуфабрикатов изменение свойств, связанное с механическим воздействием размалывающей гарнитуры на волокно. Уменьшается длина, ширина и фактор формы, увеличивается содержание мелочи, перераспределяется степень поврежденности волокон, оцениваемая числом изломов. Однако, для целлюлозы из ветвей, изменение величин произошло в более сильной степени, что связано с меньшей прочностью и меньшим диаметром и жесткостью волокон.

Для фундаментальных (по Кларку) свойств образцов, наблюдаются следующие отличия: у волокон целлюлозы, полученной из ветвей по сравнению с целлюлозой из ствола, несколько выше значение сил связи на 2,3 %, которые, в свою очередь, отвечают за упругие свойства бумаги. Но у целлюлозы из ветвей ниже на 32 % средняя длина волокна, на 6,9 % плотность, на 24,3 % грубость и 22,3 % собственная прочность волокна.

Основные физико-механические свойства лабораторных образцов представлены в таблице 5. Целлюлоза из ветвей осины, по сравнению с образцом целлюлозы из ствола, имеет более низкие значения по большинству исследованных свойств. Целлюлоза из ветвей осины имеет на 7 % меньшую плотность, на 24 % меньшее сопротивление раздиранию, на 15 % меньшую разрывную длину и на 14 % меньшую работу разрушения, разрушающее напряжение на 4,7 %. Но при этом имеет сопоставимый уровень сопротивления продавливанию и сжатию (98 %), и повышенный предел упругой деформации (0,42 против 0,37 %), что объясняется повышенными межволоконными связями. Это свидетельствует о том, что целлюлоза из ветвей имеет перспективу для использования в композиции упаковочных видов бумаги.

Таблица 5 – Физико-механические свойства целлюлозы из ветвей и ствола осины

Характеристика	Образец из ветвей	Образец из ствола	Ветви, % от ствола
Плотность отливок, г/см <sup>3</sup>	0,805	0,865	93
Межволоконные силы связи, МПа	2,43	2,37	102,3
Грубость волокон, мг/м	14,3	18,9	75,7
Нулевая разрывная длина, км	11,3	14,5	77,7
Сопротивление продавливанию, кПа	357	364	98
Разрывная длина, м	8300	9800	85
Сопротивление раздиранию, мН	299	394	76
Сопротивление сжатию, кН/м	2,57	2,62	98
Жесткость при растяжении, кН/м	410	460	89
Предел упругости, $\sigma_1$ , МПа	18,6	20,3	91,7
Разрушающее усилие, $F_p$ , Н	95,1	104,5	91
Предел упругой деформации, $\epsilon_1$ , %	0,42	0,37	113,5
Деформация разрушения, $\epsilon_p$ , %	3,48	3,65	95,3
Работа разрушения, $A_p$ , мДж	220	256	86
Мгновенный модуль упругости, $E_1$ , МПа	4530	5660	80
Модуль упругости в области предразрушения, $E_2$ , МПа	830	960	86,5

## 2. Разработка методики комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна Fiber Tester

При обработке данных, полученных на анализаторе волокна L&W FiberTester, используются дополнительные возможности его программного обеспечения, которого позволяет экспортировать данные по длине  $l$ , мкм, ширине,  $w$ , мкм, и фактору формы  $f$ , % каждого измеренного волокна. Полученная выборка из характеристик объемом около 20 тысяч волокон обрабатывается нами с использованием разработанной Методики МВИ 03-2025, расчеты выполняются в электронной таблице Excel, Методика включает в себя:

- импорт массивов с результатами измерений;
- определение граничные значения для параметров, классифицирующих фракцию как мелочь;
- устанавливаются размерные интервалы (классы) для последующего построения гистограмм фракционного состава;
- при вычислении средних характеристик массивов полидисперсных массивов параметров волокон применяется технология расчета взвешенных значений;
- формирование диаграмм зависимостей между длиной, шириной, фактором формы волокон и отношением  $l/w$ ;
- формирование графиков фракционного состава: по длине, ширине и фактору формы; как с учетом мелочи, так и без неё – для оценки структуры и однородности волокнам;
- формирование двумерных диаграмм распределения длина-ширина для визуального анализа распределения параметров волокна;
- формирование массива данных для экспорта в систему сравнительного анализа.

Разработанная Методика МВИ 03-2025 принята для использования в ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ.

### 3. Исследование влияния введения в композицию макулатурной упаковочной бумаги сульфатной ЦВВ из ветвей осины при получении бумаги с пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью

В данном разделе выполнена оценка возможности использования сульфатной небеленой ЦВВ из ветвей осины в качестве альтернативного сырья для получения бумаги из макулатуры с пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью.

Композицию бумаги составляли из макулатуры МС-5б, отобранной в виде макулатурного флютинга на ООО «Сухонский КБК» и небеленой сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины (общий выход целлюлозы 60,2 %, число каппа 52 ед.), полученной лабораторией САФУ.

Размол полуфабрикатов проводили раздельно до степени помола 30 °ШР на мельнице Йокро. Исследованы свойства смеси ЦВВ из ветвей осины и макулатуры следующего состава: 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 100:0 %.

Структурно-морфологические свойства волокон представлены в таблице 6. Волокна целлюлозы из ветвей, по сравнению с волокнами макулатуры МС-5Б, при степени помола 30 °ШР, более короткие (0,54 против 1,19 мм), с меньшей шириной (24,6 против 27,1 мкм), менее изогнутые (фактор формы 91,7 против 89,4) и содержат чуть больше мелочи – волокон с длиной менее 0,2 мм (0,84 против 0,70 %).

Таблица 6 – Структурно-морфологические свойства волокон из смеси целлюлозы ветвей и макулатуры МС-5Б

Композиция по волокну, ветви: макулатура, %	Средняя длина волокна, мм	Средняя ширина волокна, мкм	Средний фактор формы, %	Содержание мелочи, %
0:100	1,192	27,1	89,4	0,70
10:90	0,964	25,7	90,8	0,78
20:80	0,879	24,6	91,0	0,86
30:70	0,808	24,0	91,6	0,87
40:60	0,676	22,4	91,5	0,91
50:50	0,697	23,3	91,5	0,95
100:0	0,540	24,6	91,7	0,84

В смесях параметры волокон приобретают промежуточные значения, при этом правило аддитивности соблюдается не всегда. В данном случае в композиции бумажной массы смешиваются принципиально разные полуфабрикаты, при этом их общей особенностью является большое количество мелких волокон. Мелкие волокна, как правило, имеют меньшую ширину и имеют более прямолинейную форму. Таким образом, взаимное смешивание мелочи в смеси вносит кумулятивный эффект в результаты измерений.

На рис.2 представлены зависимости между геометрическими параметрами волокон для волокон целлюлозы из ветвей и из ствола, построенные по массиву данных, импортированных в электронную таблицу *Excel* из ПО *FiberTester* согласно разработанной методике МВИ 03-2025.

Разница в величинах размеров волокон подтверждена на графиках. Увеличение доли мелких волокон в композиции приводит к уплотнению графиков в области малых длин, и уменьшению ширины облака точек на зависимостях  $l/w = f(l)$ .

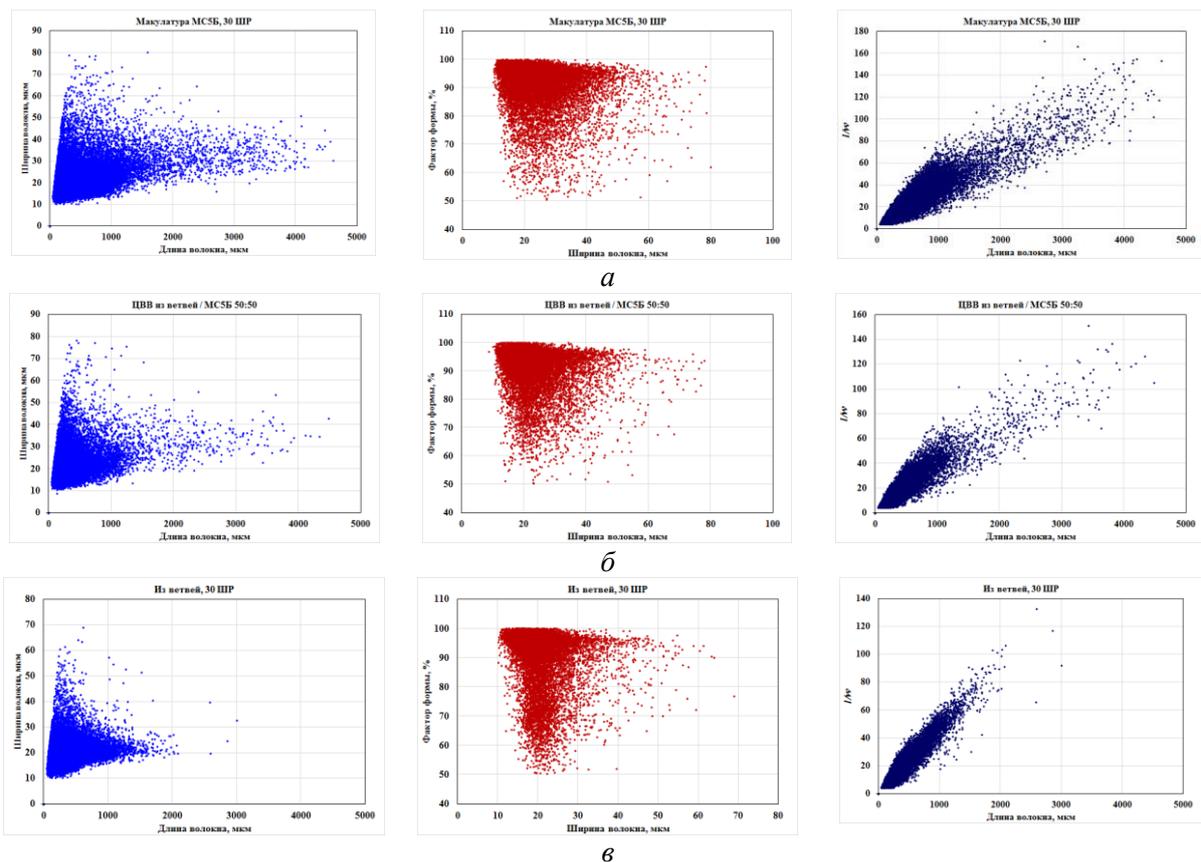


Рисунок 2 – Зависимости между длиной  $l$ , шириной  $w$ ; фактором формы  $f$ , и отношением  $l/w$  для смесей волокон ЦВВ из ветвей и макулатуры МС-5Б: *а* – 100 % МС-5Б; *б* – ЦВВ:МС-5Б 50:50 %; *в* – ЦВВ 100 %

Отливки из 100 % целлюлозы из ветвей, по сравнению с отливками из 100 % макулатуры МС-5Б, имеют более высокую плотность (0,83 против 0,59 г/см<sup>3</sup>), большее сопротивление продавливанию (3,06 против 1,69 кПа·м<sup>2</sup>/кг), сопротивление сжатию (2,89 против 1,78 кН·м/кг), прочность при растяжении (54,0 против 47,0 Н·м/кг) и жесткость при растяжении (370 против 330 кН/м). Сопротивление раздиранию целлюлозы из 100 % из ветвей меньше (2,53 против 4,96 мН·м<sup>2</sup>/кг), что связано с пониженной длиной волокна.

Механические свойства отливок из смеси осинової целлюлозы и макулатуры МС-5Б были исследованы для лабораторных отливок, массой 75 г/м<sup>2</sup>, Таблица 7.

Введение в композицию упаковочной бумаги из макулатуры мелких и тонких волокон из ветвей осины при условии раздельного размола полуфабрикатов, приводит к формированию более плотной структуры и повышенной величиной межволоконных сил связи. Физико-механические свойства такой бумаги улучшаются на 20...35 %, поскольку мелкие волокна ЦВВ из ветвей заполняют пространство в сетке жестких и более длинных волокон из макулатуры и обеспечивают более интенсивное связеобразование.

Упаковочная бумаги из смеси макулатуры и ЦВВ из ветвей, обладает повышенной прочностью и растяжимостью, при пониженном сопротивлении раздиранию. Оптимальная дозировка ЦВВ из ветвей составляет 30 %, что позволяет повысить уровень потребительских свойств бумаги.

Таблица 7 – Физико-механические характеристики отливок из смеси осиновой целлюлозы и макулатуры МС-5Б (30 °ШР)

Характеристика	Композиции из макулатуры МС-5Б с долей осиновой ЦВВ из ветвей, %						
	0	10	20	30	40	50	100
<b>Фундаментальные свойства</b>							
Средняя длина волокна, $l_{срв.}$ , мм	1,192	0,964	0,879	0,808	0,676	0,697	0,540
Средняя ширина волокна, мкм	27,1	25,7	24,6	24,0	22,4	23,3	24,6
Содержание мелочи (<0,2 мм), %	7,0	7,8	8,6	8,7	9,1	9,5	8,4
Плотность отливок $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,588	0,643	0,683	0,642	0,736	0,720	0,833
Межволоконные силы связи, $F_{св}$ , МПа	0,86	1,03	1,16	1,32	1,43	1,26	1,08
<b>Стандартные физико-механические свойства</b>							
Средняя толщина образца, мкм	116,5	107,9	100,3	103,3	91,5	94,4	76,7
Разрывная длина, $L$ , м	4600	6300	6000	6300	5200	5500	5200
Индекс прочности при растяжении, $J_R$ , Н·м/кг	47,0	65,0	60,2	68,4	46,4	57,5	54,0
Индекс продавливания, $J_{П}$ , кПа·м <sup>2</sup> /кг	1,96	2,34	2,59	3,55	3,95	3,68	3,06
Индекс раздирания, $J_R$ , мН·м <sup>2</sup> /кг	4,96	4,36	3,76	3,76	4,98	3,79	2,53
Индекс сопротивления сжатию, $J_C$ , кН·м/кг	1,78	2,09	1,90	2,21	2,10	2,44	2,89
<b>Деформационные и прочностные свойства при испытании на растяжение</b>							
Жесткость при растяжении, кН/м	330	400	390	400	310	380	370
Предел упругости, $\sigma_1$ , МПа	6,87	10,5	10,8	12,9	13,28	13,7	21,6
Разрушающее напряжение, $\sigma_p$ , МПа	28,45	41,67	37,43	43,65	36,69	40,59	46,13
Предел упругой деформации, $\varepsilon_1$ , %	0,24	0,29	0,31	0,34	0,38	0,36	0,45
Деформация разрушения, $\varepsilon_p$ , %	1,90	2,30	2,09	2,31	1,86	2,02	1,46
Работа разрушения, $A_p$ , мДж	58,7	101,8	83,9	103,1	56,8	78,7	47,5
Модуль упругости, $E_1$ , МПа	2930	3720	3510	3860	3600	3900	4900
Модуль упругости в области предразрушения, $E_2$ , МПа	570	660	640	620	560	500	1020

Такие материалы, соответствуют целям ресурсосбережения и экологии, состоящие из смеси макулатуры и волокон из ветвей осины, могут быть использованы в различных отраслях, таких как упаковка, производство бумаги.

### **Применение теории смесей к волокнистым композициям из первичных и вторичных волокон**

Для анализа механического поведения образцов бумаги, полученных путём смешивания небелёных волокнистых полуфабрикатов различных типов, была использована линейная модель смешения, широко применяемая при исследовании композиционных и полимерных материалов. Для целлюлозных материалов данная модель была апробирована профессором В.И. Комаровым. Модель предполагает, что совокупные механические свойства композита могут быть представлены как взвешенное среднее значений компонентов с учётом их объёмного содержания ( $V$ ) и характера распределения. Для модуля упругости материала  $E_m$  из смеси компонентов армирующей (А) и матричной (М) фаз теоретически должно выполняться условие:

$$\frac{1}{(V_A/E_A) + (V_M/E_M)} < E_m < (V_A E_A + V_M E_M)$$

где  $E_A$  – модуль упругости волокна армирующей фазы;  $E_M$  – модуль упругости матрицы;  $V_A$ ,  $V_M$  – объёмное содержание волокон и матрицы соответственно.

В нашей системе в качестве армирующей фазы приняты это волокна ЦВВ из ветвей осины, а в качестве матрицы макулатура МС-5Б, поскольку она обладает большей полидисперсностью по размерам волокон. Проверка проведена на трех показателях: начальный модуль упругости  $E_1$ , как характеристика упругих свойств; разрушающее напряжение  $\sigma_p$ , как характеристика прочности, и деформация разрушения  $\varepsilon_p$ , как характеристика растяжимости материала.

Установлено, что удовлетворительное соответствие имеет место только для модуля упругости  $E_1$ , а для разрушающих характеристик  $\sigma_p$  и  $\varepsilon_p$ , наблюдаются существенные отклонения, при этом фактические значения всегда выше теоретических. Использование смешанных составов из волокон осины и макулатурных волокон приводит к улучшению механических свойств образцов по сравнению с теоретическими моделями, особенно при содержании волокон в пределах от 30 % до 40 %. То есть можно говорить о дополнительных взаимодействиях смешиваемых компонентов, приводящие к возникновению синергетических эффектов.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ:

1. Установлены особенности структурно-морфологических и прочностных свойств волокнистых полуфабрикатов высокого выхода из древесины ветвей осины (*Populus Tremula*) и установлены основные их отличия от целлюлозы из ствола, которые показали, что при наличии разницы в содержании основных компонентов, и в величинах структурно-размерных свойств волокон, данное сырье имеет хороший потенциал для получения из нее технической целлюлозы без внесения существенных изменений в технологию.

2. Полученный сульфатным способом по разработанному режиму волокнистый полуфабрикат из ветвей осины (*Populus Tremula*), при раздельной варке, имеет схожие характеристики по выходу (60,2 и 61,8 %) и числу каппа (52 и 54 ед.). В отличие от сучков в структуре древесины, древесина из ветвей не дает затруднений при сульфатной варке, а полученный волокнистый полуфабрикат из ветвей, по химическому составу, подходит для использования в качестве сырья для производства картона.

Волокнистый полуфабрикат, полученный из ветвей, по сравнению с целлюлозой из ствола, имеет ниже на 32 % среднюю длину волокна (0,59 против 0,86 мм), на 24,3 % ниже грубость (14,3 против 18,9 мг/м), и 22,3 % ниже собственную прочность волокна (11,3 против 14,5 км). При этом целлюлоза из ветвей обладает несколько большей (на 2,3 %), величиной сил связи, при сопоставимой плотности, которые, в свою очередь, отвечают за упругие свойства бумаги и картона.

Основные прочностные свойства целлюлозы из ветвей осины, по сравнению с образцом из целлюлозы ствола имеет более низкие значения в большинстве случаев. Однако различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не превышают 3 %, что свидетельствует о перспективе использования целлюлозы из ветвей в композиции картона.

3. Установлено, что при размоле целлюлозы из ветвей осины наблюдается закономерное и типичное для волокнистых полуфабрикатов изменение структурно-морфологических свойств, связанное с механическим воздействием размалывающей гарнитуры на волокно. Уменьшается длина, ширина и фактор формы волокна, увеличивается содержание мелочи, перераспределяется степень поврежденности

волокон, оцениваемая числом изломов. Однако, степень изменения для целлюлозы из ствола и из веток оказалась различной. Для целлюлозы из ветвей изменение величин произошло в более сильной степени, что связано с меньшей прочностью и меньшим диаметром, а, следовательно, и жесткостью волокон.

4. Разработана методика комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна FiberTester. В электронной таблице Excel выполняется обработка массивов данных по длине, ширине и фактора формы примерно из 20 тысяч волокон. Перед проведением расчетов выполняется настройка фильтров отбора неволоконистых включений, определения размеров мелочи, размеров класса для фракционного состава.

Рассчитываются среднеарифметические, средневзвешенные по длине, средневзвешенные по массе величины длины, ширины и фактора формы. Выполняется построение диаграмм длина-ширина, длина-форма, ширина-форма, фракционный состав по длине, ширине и фактору формы с учетом мелочи и без неё, двумерные диаграммы длина-ширина волокна. Выполняется подготовка массива из 600 данных для их экспорта и проведения дальнейшего сравнительного анализа. Разработанная методика используется в ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ.

5. Установлены закономерности формирования физико-механических свойств бумаги из макулатуры при введении в композицию ЦВВ из ветвей осины. Введение в композицию мелких и прямых волокон с повышенными межволоконными связями из ветвей осины приводит к формированию более плотной структуры, свойства которой улучшаются, поскольку мелкие волокна ЦВВ из ветвей заполняют пространство в сетке жестких и более длинных волокон из макулатуры, и повышают прочность межволоконных связей. Соответственно, улучшаются прочность и жесткость материала, за исключением сопротивления раздиранию. Оптимальная дозировка ЦВВ из ветвей составляет 30 %, что позволяет получить более прочный и жесткий материал.

Такие материалы, состоящие из смеси макулатуры и волокон из ветвей осины, соответствуют целям ресурсосбережения и экологии, и могут быть использованы в качестве упаковочных видов бумаги.

### **Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:**

#### **Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК**

1. **Албаррам Ф.**, Казаков Я.В. Свойства сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины как волокнистого полуфабриката для производства компонентов гофрокартона // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С.443–457. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.443-457

2. **Албаррам Ф.**, Казаков Я.В., Синчук А.В. Изучение свойств упаковочной бумаги из смеси сульфатной целлюлозы из отходов лесозаготовок и вторичного волокна // Деревообрабатывающая промышленность. 2025. №4. С.76–83.

#### **Публикации, индексируемые в РИНЦ**

3. **Албаррам Ф.**, Казаков Я.В. Использование древесины, полученной от обрезки лесных деревьев, в целлюлозно-бумажной промышленности / В сб. «Актуальные проблемы развития лесного комплекса»: матер. XX междуна. научно-технич. конфер. (Вологда 6 декабря 2022 года) Вологодский государственный университет // Вологда: ВоГУ, 2022. С.226–228.

4. **Албаррам Ф.**, Казаков Я.В. Использование древесины ветвей сосны и эвкалипта для получения бумаги / В сб. «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки»: матер. Всеросс. научно-практич. конфер. (24-28 апреля 2023 г.) / Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань: Изд-во КНИТУ. 2023. С.31–33.

5. **Албаррам Ф.**, Казаков Я.В. Механические свойства целлюлозы, полученной из веток деревьев Сирии // В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. имени профессора В.И. Комарова (Архангельск, 14–16 сентября 2023 г.). Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2023. С.352–356.

6. Балыбердин К.И., **Албаррам Ф.**, Казаков Я.В. Оценка качества древесины из ветвей осины как сырья для предприятий целлюлозно-бумажной отрасли / В сб. «Актуальные проблемы развития лесного комплекса»: матер. XXI междунар. научно-технич. конфер. (Вологда 5 декабря 2023 года) Вологодский государственный университет // Вологда: ВоГУ, 2023. С.153–157.

7. Албаррам Ф., Казаков Я.В. Оценка качества древесины ветвей эвкалипта как сырья для целлюлозно-бумажной промышленности / В сб. «Химия и технология растительных веществ»: тезисы докладов XIII Междунар. научной конфер. со школой молодых ученых. Сыктывкар, Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2024. С.8.

8. Балыбердин К.И., **Албаррам Ф.**, Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства волокон сульфатной целлюлозы из ствола и ветвей осины / В сб. «Химия и технология растительных веществ»: тезисы докл. XIII Междунар. науч. конфер. со школой молодых ученых. Сыктывкар, Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2024. С.22.

9. Балыбердин К.И., Казаков Я.В., **Албаррам Ф.** Получение и свойства сульфатной целлюлозы из лесосечных отходов осины // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном деревообрабатывающем производствах. 2024 №5 (17). С. 30–38. DOI: 10.33920/pro-05-2405-04

10. **Албаррам Ф.**, Балыбердин К.И., Казаков Я.В., Особенности размерных параметров волокон осинового сульфатной целлюлозы из лесосечных отходов // В сб. «Леса России: политика, промышленность, наука, образование»: матер. X Всерос. научн.-технич. конфер. (Санкт-Петербург, 21-23 мая 2025 г.) // СПб.: СПбГЛТУ, 2025. С.474–476.

11. **Албаррам Ф.**, Казаков Я.В. Регулирование бумагообразующих свойств макулатурной массы за счет сульфатной целлюлозы из лиственных лесосечных отходов // Матер. XI междунар. конфер. «Физикохимия растительных полимеров» (Архангельск, 30 июня – 03 июля 2025 года). Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2025. С. 20–23.

12. Балыбердин К.И., Казаков Я.В., **Албаррам Ф.** Особенности изменения при размоле свойств волокон сульфатной целлюлозы из ветвей и ствола осины // Матер. XI междунар. конфер. «Физикохимия растительных полимеров» (Архангельск, 30 июня – 03 июля 2025 г.). Архангельск: САФУ, 2025. С. 27–31.

13. Казаков Я.В., **Албаррам Ф.** Расширенный анализ размеров волокон в смесях волокнистых полуфабрикатов / В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. имени профессора В.И. Комарова (Архангельск, 11–13 сентября 2025 г.). Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2025. С.32–38.