

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Казаков Яков Владимирович

Архангельск 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ-----	5
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ -----	14
1.1 История бумаги -----	14
1.2 Бумажная промышленность в России-----	17
1.3 Бумажная промышленность в Сирии -----	19
1.4 Эволюция технологии производства бумаги -----	21
1.5 Эволюция бумагоделательного оборудования-----	23
1.6 Основные виды сырья для производства бумаги -----	24
1.6.1 Хвойная древесина -----	25
1.6.2 Лиственная древесина-----	26
1.6.3 Тропическая древесина -----	26
1.6.4 Бамбук -----	26
1.7 Основные ресурсы, используемые в производстве бумаги -----	27
1.8 Отходы целлюлозно-бумажного производства-----	28
1.9 Подготовка древесных балансов к производству целлюлозы-----	28
1.10 Методы получения бумажной массы -----	30
1.10.1 Механический способ получения целлюлозных волокон-----	30
1.10.2 Химические методы получения целлюлозных волокон -----	31
1.10.3 Химико-механический способ-----	33
1.11 Подготовка целлюлозы и формование бумажного полотна -----	34
1.12 Использование отходов лесозаготовок в промышленности -----	36
1.13 Переработка макулатуры -----	39
1.14 Макулатура в России -----	41
1.15 Классификация видов макулатуры -----	41
1.16 Макулатура МС-5Б: -----	43
1.17 Осина (<i>Populus tremula</i>) -----	44
1.18 Физико-химические свойства древесины ветвей осины-----	46
2 МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ -----	49
2.1 Подготовка образцов древесины к химическому анализу -----	49
2.2 Микроскопические исследования -----	51
2.3 Определение физических свойств древесины-----	51

2.3.1	Определение содержания влаги в древесине-----	52
2.3.2	Плотность древесины -----	52
2.3.3	Определение зольности древесины -----	53
2.4	Определение компонентного химического состава-----	53
2.4.1	Определение содержания целлюлозы -----	54
2.4.2	Определение содержания веществ, экстрагируемых холодной и горячей водой ---	55
2.4.3	Определение содержания веществ, экстрагируемых органическими растворителями-----	56
2.4.4	Определение содержания лигнина -----	57
2.5	Проведение лабораторных варок целлюлозы -----	58
2.6	Анализ целлюлозы и щелоков -----	60
2.6.1	Определение выхода целлюлозы -----	60
2.6.2	Определение степени делигнификации целлюлозы (число Каппа) -----	60
2.6.3	Анализ отработанного черного щелока -----	61
2.7	Изготовление образцов для испытаний -----	63
2.7.1	Лабораторный размол целлюлозы-----	63
2.7.2	Определение степени помола целлюлозы -----	63
2.7.3	Получение смесей целлюлозы из ветвей осины и макулатуры-----	64
2.7.4	Изготовление лабораторных отливок-----	66
2.8	Определение бумагообразующих свойств целлюлозы -----	67
2.8.1	Микроскопический анализ целлюлозы-----	67
2.8.2	Определение структурно-морфологических характеристик волокна на анализаторе Fiber Tester L&W-----	67
2.9	Определение физико-механических характеристик образцов целлюлозы-----	69
2.9.1	Определение стандартных характеристик лабораторных отливок -----	69
2.9.2	Определение сопротивления раздиранию -----	70
2.9.3	Определение сопротивления продавливанию (ГОСТ 13525.8–86)-----	71
2.9.4	Определение сопротивления сжатию на коротком расстоянии по методу SCT -----	72
2.9.5	Определение сопротивления разрыву (ГОСТ ИСО 1924-3) -----	72
2.9.6	Получение и математическая обработка кривой зависимости «напряжение-деформация» при растяжении-----	73
2.9.7	Поверхностная впитываемость воды при одностороннем смачивании (Кобб ₆₀)-----	76

2.9.8 Определение межволоконных сил связи -----	77
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ -----	78
3.1 Получение сульфатным способом полуфабриката из древесины ветвей осины как альтернативы целлюлозы из стволовой части спелой древесины -----	78
3.1.1 Микроскопический анализ древесины ветвей и ствола осины обыкновенной -----	78
3.1.2 Физические свойства исследованных образцов древесины -----	80
3.1.3 Химические свойства исследованных образцов древесины -----	81
3.1.4 Результаты лабораторных варок целлюлозы из ветвей и ствола осины -----	83
3.1.5 Бумагообразующие свойства целлюлозы из древесины ветвей осины -----	85
3.1.6 Физико-механические характеристики целлюлозы -----	94
3.2 Разработка методики комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна Fiber Tester -----	97
3.3 Исследование влияния введения в композицию макулатурной упаковочной бумаги сульфатной ЦВВ из ветвей осины при получении бумаги с пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью -----	102
3.3.1 Микроскопический анализ волокон макулатуры МС-5Б -----	103
3.3.2 Бумагообразующие свойства целлюлозы из смеси осиновой целлюлозы и макулатуры МС-5Б -----	104
3.3.3 Применение теории смесей к волокнистым композициям из первичных и вторичных волокон -----	117
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ -----	124
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ -----	126
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ -----	128
ПРИЛОЖЕНИЯ -----	139

ВВЕДЕНИЕ

Бумага издавна использовалась в качестве основного материала для письма и обеспечивала сохранение и передачу интеллектуального творчества из поколения в поколение на протяжении веков человеческой истории. Нет сомнений в том, что развитие бумажной промышленности стало крупной трансформацией в истории человечества, поскольку оно сделало написание, копирование, сохранение и распространение интеллектуальных продуктов значительно проще по сравнению с использованием более ранних письменных носителей [4]. Помимо важной роли бумаги в письме и публикации, она также сыграла решающую роль в распространении образования, так как внесла большой вклад в удешевление и массовое расширение образовательного процесса, обеспечивая дешёвый материал, который легко производить и распространять. Это особенно способствовало обучению с изобретением печати и постепенным распространением машин для изготовления бумаги.

Роль бумаги не ограничивалась только письмом, печатью и образованием, но распространялась и на многие другие области, такие как упаковка и реклама, а также проникала в ряд других отраслей, что укрепило позиции бумаги и сделало её «королём» среди письменных материалов [97]. Целлюлозно-бумажная промышленность считается одной из старейших отраслей промышленности в мире, а её масштабы не сопоставимы с другими деревообрабатывающими отраслями из-за широкого использования целлюлозы и бумаги и высокой стоимости производимых из них материалов. К продукции отрасли относятся, например, книги, журналы, коробки, бумага для компьютеров и т.д. [82]. Значение бумажной промышленности возрастает по мере увеличения темпов потребления бумаги в результате научно-технического прогресса и роста спроса на неё [80].

Эта отрасль представляет собой сложный процесс производства бумаги из волокон различного происхождения, включающий удаление воды из водной смеси волокон, наполнителей и других химикатов, подаваемой на формующую сетку с образованием влажного полотна. Затем это полотно прессуют и сушат для получения бумаги, которая, как правило, обладает требуемыми физико-механическими характеристиками [125].

Бумага – это материал, представляющий собой тонкие листы из целлюлозных волокон растительного происхождения, который используется главным образом для письма, художественных работ и упаковки. Цвет свежепроизведённой бумаги, как правило, белый. Древесина является основным источником сырья для целлюлозно-

бумажной промышленности, обеспечивая её главным материалом – целлюлозой. Однако бумажную массу можно получать и из различных других источников растительных волокон, которые отличаются хорошей способностью к получению бумажной массы и широким распространением. Такие материалы характеризуются высоким содержанием целлюлозы, хорошим качеством получаемой из них целлюлозы, низкими затратами на заготовку, минимальными расходами на транспортировку и переработку, а также возможностью дешёвого и простого производства [128].

Целлюлоза относится к числу важнейших видов сырья, используемых в бумажной промышленности. Растения являются единственным источником клетчатки, поскольку она входит в число основных структурных компонентов большинства растительных организмов. Клеточные стенки растений играют при этом опорную и защитную роль. Целлюлоза состоит из макромолекул полимера, образующих линейную цепь, которая формируется в результате конденсации молекул глюкозы, соединённых между собой гликозидными связями. Молекулы целлюлозы организованы в стенке растительной клетки в виде волокон, иногда ориентированных параллельно, иногда под разными углами, образуя пространственно сшитую структуру, создающую чрезвычайно прочный каркас, защищающий растительную клетку.

Свойства целлюлозы зависят от вида растительного сырья, из которого она извлекается, и применяемого метода получения. Хотя не все растения, содержащие целлюлозу, могут считаться пригодными для промышленного получения бумажной массы, к важнейшим древесным источникам относятся эвкалипт и тутовое дерево, а к сельскохозяйственным культурам – хлопок, кукуруза, пшеница и ячмень [103].

Древесина считается одним из важнейших источников для производства бумажной массы – как хвойной (softwood), так и лиственной (hardwood). Использование того или иного вида древесины определяется средней длиной волокон, а также количеством волокон в единице объёма и их размером для данного типа древесины [81]. Древесина – единственное в мире возобновляемое природное сырьё, поэтому она способна устойчиво удовлетворять потребности промышленности и обеспечивать долговременное производство. В этом отношении древесина уникальна среди природных видов сырья и не похожа на такие ресурсы, как железо и нефть, которые при постоянном росте численности населения и неизменном спросе подвержены истощению и исчезновению из природной среды [107].

С технологической точки зрения древесина рассматривается как сырьё, которое можно рационально и без серьёзной конкуренции перерабатывать для удовлетворения потребностей производства и конечного потребления [81]. Нет сомнений в том, что древесина остаётся важнейшим источником сырья для промышленности, значение которого трудно уменьшить, несмотря на развитие и распространение многих конкурирующих искусственных и промышленных материалов. Древесина, как природный материал, сохранила свою ценность и расширились сферы ее применения благодаря внедрению современных методов исследований, связанных с изучением роста, анатомического строения, химического состава и направлений эффективного использования древесных ресурсов [126].

С древних времён и по настоящее время древесина приносит человечеству очевидную пользу. Ранее люди использовали древесину для строительства домов, а со временем стали применять её и как топливо для получения тепловой энергии. Осознав необходимость передвижения по воде и на суше, человек начал изготавливать из дерева лодки и небольшие корабли, а также колёса для древних средств транспорта. Это помогло людям открывать новые места обитания и узнавать, что скрывают ещё не освоенные части Земли [103].

Традиционно лесные деревья, особенно хвойные породы, были основным источником волокна, используемого в производстве бумаги. Однако недавние тенденции, связанные с устойчивым развитием и охраной окружающей среды, стимулировали исследователей к изучению альтернативных источников волокна [61].

Восстановление лесов путём лесовосстановительных мероприятий и интенсивного лесовыращивания повышает темпы роста, размеры и конечную стоимость древесины, а также способствует уменьшению количества легко воспламеняющейся и опасной биомассы в лесу. Лесовосстановление было бы ещё более экономически выгодным, если бы существовали жизнеспособные рынки для изымаемых материалов. Эти отходы или накопленная в результате роста и ухода биомасса подвержены поражению насекомыми и болезнями, а также риску уничтожения лесными пожарами. Поэтому существует острая необходимость удаления из леса и рационального использования этих материалов, чтобы получить большую пользу от леса и одновременно снизить риск возникновения пожаров [79].

Переработка отходов и использование вторичных материалов для создания новых продуктов стали важной частью стратегии устойчивого развития в современном мире [92]. В последние десятилетия тема устойчивого потребления и минимизации негативного воздействия на окружающую среду приобретает всё большую актуальность [99], особенно в таких отраслях, как производство бумаги. Традиционные методы получения бумаги, основанные на вырубке деревьев и интенсивном использовании химических веществ, оказывают существенное воздействие на экосистемы и климат. В этой связи возникает необходимость поиска альтернативных решений, нацеленных на снижение экологического ущерба и более эффективное использование имеющихся ресурсов [62].

Одним из таких решений является использование обрезанных ветвей деревьев и бумажных отходов для производства новой бумаги. Это позволяет не только сократить объём отходов, но и уменьшить нагрузку на леса, которые являются важнейшими элементами экосистемы и источниками кислорода [13, 52]. Обрезанные ветви, часто образующиеся после лесохозяйственных мероприятий или садовых работ, нередко остаются невостребованными и рассматриваются как отходы. Однако при грамотной переработке эти ветви превращаются в ценное сырьё для производства бумаги, способствуя снижению нагрузки на леса, поскольку использование ветвей уменьшает необходимость вырубки целых деревьев и тем самым способствует сохранению лесных экосистем и биоразнообразия [63]. Вместо утилизации ветвей как отходов их можно эффективно повторно использовать в качестве ценного материала [100], сокращая объёмы захоронения или сжигания. Кроме того, переработка ветвей может требовать меньше энергии по сравнению с использованием цельной древесины, что ведёт к сокращению выбросов углерода, связанных с традиционными промышленными технологиями [72].

Также важным элементом системы вторичной переработки является использование отходов бумаги, таких как старые газеты, картон или упаковочные материалы [68]. Совместное использование обрезанных ветвей и бумажных отходов открывает новые возможности для производства бумаги с меньшими затратами на сырьё и с более низким экологическим следом. Это способствует повышению экономической эффективности бумажного производства за счёт снижения потребности в первичных материалах и энергии [36, 98].

В последние годы экологические проблемы приобретают всё большее значение, побуждая компании внедрять экологически ориентированные подходы, в том числе

использовать экологически чистые упаковочные материалы. Такие материалы не только способствуют защите окружающей среды, но и соответствуют современным тенденциям корпоративной социальной ответственности. Экологичная упаковка изготавливается из переработанных или биоразлагаемых материалов, что облегчает её утилизацию и снижает уровень загрязнения окружающей среды. К таким материалам относятся бумага, картон, растительные волокна и биоразлагаемые пластики, такие как полилактиды (PLA) [7].

Существует несколько типов упаковки, в том числе биоразлагаемая упаковка, которая разлагается естественным образом под действием микроорганизмов. Примерами являются материалы из картофельного или кукурузного крахмала, подходящие, в частности, для органического земледелия. Переработанные материалы, такие как пластик, стекло и металлы, позволяют сократить потребление природных ресурсов и уменьшить углеродный след [59].

Гофрированный картон – один из наиболее устойчивых упаковочных материалов. Он легко перерабатывается и является биоразлагаемым, что делает его ответственной альтернативой пластику. Гофрированная упаковка представляет собой многослойную бумажную структуру и считается одним из наиболее экологичных видов упаковочных материалов, набирающим популярность благодаря минимальному воздействию на окружающую среду. Гофрированный картон также легко перерабатывается, что способствует значительному сокращению отходов: около 80 % гофрированной упаковки может быть повторно переработано и использовано для получения новых продуктов. В отличие от пластиковой упаковки, гофрированный картон полностью биоразлагаем и не наносит долгосрочного вреда окружающей среде, не загрязняет почву и водоёмы [7]. Наиболее эффективным способом утилизации использованных упаковочных материалов является их переработка, что оправдано как с экономической, так и с экологической точки зрения [133].

Использование экологичной упаковки является важным шагом на пути к сокращению объёмов отходов и укреплению экологической устойчивости. Она способствует сохранению природных ресурсов и представляет собой ответственный выбор для предприятий и потребителей, направленный на защиту планеты для будущих поколений [59].

Актуальность исследования. 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 сырье 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 флутинга 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 лесосечных отходов в виде ветвей и вершинок, которые составляют около 20...25 % от всей древесины. Это позволяет сократить объем 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.

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

В работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Оценить возможность получения сульфатным способом полуфабриката из древесины ветвей осины как альтернативы целлюлозы из стволовой 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 сульфатной ЦВВ из ветвей осины на бумагообразующие свойства 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.

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, посвященной памяти 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», 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 7 разделов, общие выводы, библиографический список и приложение. Содержание работы изложено на 170 страницах, включая 66 рисунка и 16 таблиц, библиографический список содержит 133 наименований.

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 Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» и Центра коллективного пользования научным оборудованием «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 Инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ методика представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна (МВИ 03-2025).

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

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 История бумаги

Историю производства необходимо изучать внимательно, поскольку она даёт исследователю целостное представление о продукте в целом и его динамике на протяжении всей истории отрасли – её прошлого и путей развития. Исторические сведения об отрасли имеют большое практическое значение: знание предыдущих изобретений предотвращает повторение уже проведённых экспериментов и попыток «переоткрыть» изобретение, а также позволяет изменять виды сырья на разных стадиях производства. Ранее нереализованные идеи могут быть воплощены с использованием современных технологий [12].

Изучение развития промышленности помогает исследователю развить устойчивый интерес к своей специальности, а знание истории бумажного производства, его технических и научных достижений способствует формированию исследователя как высококультурной личности [118]. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что появление бумаги произошло относительно поздно и было связано с использованием сцепления волокон. Самый древний фрагмент войлока был обнаружен в 1929 году н.э. Даже сегодня производство войлока можно наблюдать в Центральной Азии, например, в Синьцзян-Уйгурском районе Китая, где войлок изготавливают из овечьей шерсти во дворах: овечью шерсть перерабатывают в волокнистую массу, пропускают через сито, затем увлажняют тёплой водой и сушат до получения твёрдого, но гибкого материала.

Ещё одной выдающейся древней техникой было изготовление материала под названием «тапа» из растительных волокон, о чём свидетельствуют этнографические данные по Океании. Впоследствии эта техника широко распространилась в тропических регионах. Тапа, изготавливаемая из коры тутового дерева, широко использовалась для письма у народов майя, а вершиной развития подобных технологий считается древнеегипетский папирус, производившийся из стеблей одноимённого растения. Техника изготовления папируса заключалась в снятии коры со стеблей, последующем разрезании её на тонкие полоски, которые сжимали для извлечения липкого сока. Первый слой полосок укладывали в одном направлении, второй – перпендикулярно первому. Полученную влажную массу прессовали для склеивания слоёв, а затем сушили [8].

Необходимость получения очень тонкого войлока (растительного или животного происхождения) привела к объединению двух древних техник – тапы и войлока, и на этой

основе родилась бумага. Именно здесь возникла идея вторичной переработки сырья для изготовления бумаги. Китайский чиновник Цай Лунь в начале II века н. э. описал происхождение и форму современного способа изготовления бумаги как материала для письма, используя, в частности, старые рыболовные сети. Проведя многочисленные эксперименты, Цай Лунь впервые сформулировал основной принцип производства бумаги: формирование бумажного листа путём размещения на сетке тонких волокон, заранее измельчённых и разбавленных водой. Он также усовершенствовал технику приготовления волокнистой массы, применяя плоские камни, ступку и пестик как инструменты для измельчения и приготовления сырья. Бумага представляет собой материал, главным образом, из волокон, и эти изобретения заложили фундамент бумажной промышленности. Позднее процесс изготовления бумаги был усовершенствован путём добавления клея и крахмала для повышения её прочности и долговечности [54].

Цай Лунь представил императору Юаньсиню в 105 году н. э. результаты своих опытов и своё искусство изготовления бумаги. Император высоко оценил его работу и утвердил новый материал, после чего бумага постепенно вошла в широкое употребление как основной письменный носитель. Затем Цай Лунь приступил к оптимизации состава волокнистой основы, изменил состав клеящих добавок и сформировал блок из растительных волокон, что придало материалу новые физико-механические свойства и сделало его более пригодным для письма. В бумажную массу начали добавлять побеги тростника, и уже в IV веке было известно множество разновидностей бумаги.

Технология изготовления бумаги включала длительное вымачивание растительного сырья, его проваривание с добавлением золы, последующее растирание до пастообразного состояния с помощью деревянных пестиков и лопаток, разбавление полученной пасты водой и выливание её на формирующую сетку из проволоки или бамбуковых волокон. Для получения тонкой бумаги волокнистую суспензию (бумажную массу) равномерно распределяли по поверхности сетки, а сформированные листы перед сушкой прессовали между слоями ткани [82].

На протяжении многих поколений китайцы ревниво хранили секреты изготовления бумаги и не раскрывали технологию, продавая бумагу по чрезвычайно высоким ценам и превращая её в своего рода эквивалент драгоценных металлов. Уже в IX веке в Китае появились первые бумажные деньги, известные как «летающие деньги». Китайцам также

приписывают изобретение гигиенической бумаги. В конце X – начале XI веков они начали изготавливать игральные карты из спрессованной бумаги [54].

В 610 году буддийский монах Дан Хо прибыл в Японию и передал секреты изготовления бумаги и чернил. Японские мастера сумели довести производство бумаги до очень высокого уровня. Традиционная японская бумага называлась васи, тогда как китайская бумага в Японии была известна под названием кара-ками. В отличие от китайцев, японцы не процеживали волокнистую массу через неподвижное сито, а постоянно встряхивали форму, добиваясь более равномерного распределения волокон и однородной толщины листа. Вторым важным нововведением стало использование слизи растения *toro-aoi* как высокоэффективного загустителя и регулятора реологических свойств волокнистой суспензии, что способствовало формированию более прочных и ровных листов.

Уже в VIII веке растущие потребности императорского двора привели к бурному развитию бумажной отрасли и появлению множества крупных и мелких мастерских, производивших до 180 типов бумаги. В Японии возникло искусство оригами – складывание бумаги для создания декоративных фигур. В VII веке секрет изготовления бумаги стал известен в Корее. После распространения писчей бумаги бумажная промышленность по всему Китаю значительно совершенствовалась: повышалось качество бумаги, создавались новые её виды для различных целей, и бумага приобрела в этих странах почти сакральный статус.

Китай распространял бумагу на Запад, в том числе по Шёлковому пути. В Корее бумага была известна уже в V веке, в Японии – с VII века, а в других регионах Восточной Азии – также примерно с V века [8].

В 751 году арабы одержали победу над китайцами в битве при Таласе, захватили в плен многих китайских мастеров-бумагоделов и переняли у них технологию производства бумаги. Самарканд стал крупным центром бумажного дела. В 800 году н. э. аббасидский халиф Харун ар-Рашид основал бумажное производство в Багдаде. Благодаря деятельности самаркандских и багдадских мастеров бумажное производство распространилось в Дамаск и Каир. Уже в начале XI века арабский мир и Индия активно использовали бумагу в различных сферах, постепенно вытесняя папирус. Из-за ограниченного доступа к традиционному сырью арабы стали использовать хлопок как основное целлюлозосодержащее сырьё для изготовления бумаги [82].

В IX–XI веках бумага начала поступать в Европу через Испанию и Италию, где её первоначально закупают у арабов. В X веке в Испании были построены первые бумажные мануфактуры, быстро освоившие производство бумаги высокого качества. В XII веке бумагоделение появилось в Италии и Франции. В XIII–XV веках производство бумаги было воспринято и другими европейскими странами – Венгрией, Германией, Англией, Польшей и др. Европейская бумага, предназначенная для печати, отличалась большей белизной по сравнению с восточной и проклеивалась животным клеем.

Появление печатных станков в XIV веке стимулировало дальнейшее совершенствование качества бумаги, а также улучшение процессов полировки и сортировки листов. В Московское государство бумага первоначально импортировалась преимущественно из европейских стран во времена правления царя Ивана Грозного. Лишь в середине XVI века в России удалось создать собственную бумажную промышленность [8].

1.2 Бумажная промышленность в России

Целлюлозно-бумажная промышленность является одной из ключевых и наиболее капиталоемких отраслей российской экономики. В последние годы в отрасли отмечается устойчивый рост, обусловленный увеличением спроса на бумагу и изделия из неё как со стороны внутренних, так и зарубежных потребителей. Исторически развитие данной отрасли в России происходило преимущественно в центральных регионах, что было связано с наличием необходимой сырьевой базы. Первый центр производства бумаги был известен как Полотняный завод. В дальнейшем с переходом на древесное сырьё основная промышленная зона сместилась на север, в лесообеспеченные районы.

Крупные целлюлозно-бумажные комбинаты рационально размещать вблизи значимых водных артерий и водоёмов, поскольку производство целлюлозы и бумаги является водоёмким процессом. Так, предприятия расположены на реке Северная Двина (заводы в Архангельске и Новодвинске), на реке Вегда (Куразма), на Волге (Балахна и Волжск), в районе озера Байкал (Байкальск), Ладожского озера (Питкяранта), на Ангаре (Усть-Илимск и Братск) и вблизи Онежского озера (Кондопога). В России действует около тридцати целлюлозных заводов, при этом основное производство сосредоточено всего в 14 регионах, среди которых наиболее значимыми являются Архангельская, Иркутская,

Ленинградская, Калининградская, Пермская области, а также Республика Коми и Республика Карелия.

Современная номенклатура продукции российской целлюлозно-бумажной промышленности включает широкий спектр полуфабрикатов и готовых изделий: различные виды бумаги и картона, целлюлозу для химической промышленности, полиграфические сорта бумаги, офисную (писчую и копировальную) бумагу, упаковочные виды бумаги и картона, белую (мелованную) бумагу, обойные покрытия и др. Конкурентоспособность отрасли во многом определяется высоким спросом на внутреннем и мировом рынках: российская целлюлоза экспортируется примерно в 40 стран, упаковочные материалы – в 75 стран, а белая бумага – в 70 стран.

В 2009 году стоимость экспорта целлюлозно-бумажной продукции составила 2,223 млн долларов США, однако эксперты отмечают, что по ряду параметров часть российской продукции всё ещё уступает зарубежным аналогам. Спецификой российской бумажной промышленности является её интеграция в лесопромышленный комплекс, а также недостаточная развитость транспортной и производственной инфраструктуры в ряде регионов и затруднённый доступ к лесосырьевым ресурсам по суше, что осложняет их эффективное вовлечение в переработку. При этом Россия обладает около четверти мировых запасов лесного сырья, а целлюлозно-бумажная промышленность является одной из базовых отраслей промышленного комплекса Сибири. Восточная Сибирь производит около 7,16 % всего объёма картона в России, а на Иркутскую область приходится 3,7 % продукции лесоперерабатывающих комплексов страны. Согласно данным Государственного лесного реестра, Иркутская область обладает уникальными лесными ресурсами.

Российский рынок газетной бумаги относится к числу наиболее конкурентных в мире. В 2002 году Россия экспортировала 1136,7 тыс. тонн газетной бумаги на сумму 382 млн долларов США. Крупнейшими импортёрами российской газетной бумаги являются Индия, Германия, Турция, Великобритания, Иран и Финляндия. В 2013 году совокупный объём продукции российской целлюлозно-бумажной промышленности составил 766 млрд рублей, а производство целлюлозы в 2014 году достигло около 7,503 млн тонн. В том же 2014 году было произведено около 4,943 млн тонн различных видов бумаги, что на 3,7 % превышает показатель предыдущего года. В 2016 году сальдо внешней торговли бумагой

и картоном было положительным, а в 2018 году выпуск картона достиг 11,872 млн тонн на сумму около 1,6 млрд долларов США.

Группа «Илим» является ведущим производителем целлюлозно-бумажной продукции в России и одним из крупнейших игроков на мировом рынке. В 2018 году объём продаж составил порядка 2,1 млн тонн целлюлозы, 514 883 тонн картона и 99 542 тонн белой бумаги. Продукция компании поставляется примерно в 70 стран мира [67].

1.3 Бумажная промышленность в Сирии

Сирия считается одной из стран, сравнительно бедных естественными лесами, поскольку её лесной фонд в настоящее время составляет около 503 тыс. га, из которых более 233 тыс. га приходятся на естественные и горные леса [94], а около 270 тыс. га – на искусственные насаждения [96]. С начала XX века лесные площади страны претерпели резкое сокращение: если в начале прошлого века леса занимали около 30 % территории, то сейчас их доля не превышает 2,8 % от общей площади государства. Основными причинами такого сокращения являются чрезмерный выпас скота, лесные пожары и вырубки [125].

Пожары, а также дефицит сырья, необходимого для производства бумаги, прежде всего целлюлозы и древесины, привели к нехватке сырьевых ресурсов на местных бумажных предприятиях. Бумажная промышленность Сирии серьёзно пострадала в результате продолжительного вооружённого конфликта и разрушения инфраструктуры, а также из-за отсутствия инвестиций в этот сектор на фоне ухудшения экономической ситуации и введённых экономических санкций. Производство бумаги в стране значительно сократилось в силу сложности обеспечения необходимым сырьём и оборудованием [75].

В годы войны был создан завод по переработке макулатуры и регенерации бумажных отходов, специализирующийся на производстве флютинга (гофрированного слоя). Этот материал используется для изготовления упаковки и картонных коробок и, как правило, имеет коричневый цвет. В настоящее время он производится путём переработки и картона и бумаги. В Алеппо функционирует фабрика по переработке макулатуры [70].

Согласно статистическим данным, предоставленным заместителем председателя совета директоров Промышленной палаты Алеппо, Сирия ежемесячно импортирует тысячи тонн бумаги на сумму от 4 до 5 млн долларов США. По данным Министерства

экономики Сирии, за прошлый год страна импортировала 114 тыс. тонн бумаги и картона [121].

Министерство экономики также сообщило, что количество лицензий на импорт бумаги и картона в 2021 году достигло 646, при общем объёме импорта 87 тыс. тонн, тогда как в 2022 году было выдано 847 лицензий, а объём ввезённых бумаги и картона составил 114 тыс. тонн [121].

Отмечается, что основными странами-поставщиками являются Китай, Германия, Индонезия, Индия, Португалия, Египет, Тунис, Алжир, Объединённые Арабские Эмираты и Швеция, а наибольшие сложности при импорте связаны с логистикой и доставкой [121].

Крупнейшим препятствием для импортёров является значительный объём капитала, необходимый для финансирования поставок бумаги. Это побудило многих торговцев отказаться от закупок и закрыть свои предприятия [122]. В условиях высоких цен импортер вынужден фактически оплачивать двойную сумму: первая – это стоимость поставляемой бумаги иностранной экспортирующей компании, а вторая – эквивалентная ей сумма, которая должна быть размещена в сирийских банках в качестве страхового обеспечения товара. В результате итоговые расходы оказываются крайне высокими и недоступными для многих участников рынка, особенно по сравнению с прошлым периодом. Дополнительным фактором давления являются экономические санкции, затронувшие деятельность судоходных компаний и движение судов в сирийские порты, что вынуждает их заходить в порт Бейрута. Это, в свою очередь, ведёт к росту транспортных и сопутствующих материальных затрат [122].

Бумажная фабрика компании *Asian Paper Industries*, расположенная в городе Алеппо, обладает производственной мощностью около 39 тыс. тонн коричневой бумаги в год. Основным местным сырьём для неё служат бумажные отходы, перерабатываемые в коричневую бумагу, используемую для изготовления картона и упаковочных материалов. Таким образом, предприятие ориентировано на производство упаковочной бумаги [122].

Основные трудности в работе отрасли связаны с обеспечением достаточного количества макулатуры и сохранностью бумажных отходов ввиду их дефицита, а также со снижением качества продукции из-за многократной переработки сырья. Отмечается наличие ещё одной фабрики по переработке бумажных отходов и остатков в промышленном городе, а также ещё одного предприятия в Алеппо [70].

1.4 Эволюция технологии производства бумаги

Физико-химический анализ бумаги ручного производства в Китае позволяет реконструировать древнюю технологию её изготовления, а также установить использовавшееся в то время сырьё [21], качество получаемой бумаги и состав её компонентов [5]. С момента изобретения бумаги в Китае в 105 году н.э. её сущность как материала практически не изменилась: бумага по-прежнему представляет собой систему целлюлозных волокон, взвешенных в воде, которые при осаждении на сито формируют волокнистую структуру листа. Хотя приёмов и деталей ручного изготовления бумаги со временем стало больше, принципиально технология изменилась незначительно. Напротив, современная машинная бумага стала значительно более сложным, технологически насыщенным и зачастую дорогостоящим продуктом, представляющим собой сочетание ремесла, науки и инженерии [89].

Целлюлоза – это природный полисахаридный полимер, состоящий из большого количества повторяющихся звеньев (мономеров), причём их число варьирует в зависимости от происхождения и способа получения целлюлозы. Так, в льняной целлюлозе степень полимеризации составляет примерно от 7000 до 12000 мономерных звеньев, тогда как целлюлоза, выделенная из химически обработанной древесины, содержит порядка 2000–3000 мономеров. При взаимодействии целлюлозных волокон в водной суспензии на их поверхности образуются микрофибриллы, обеспечивающие сцепление волокон друг с другом и формирование бумажного полотна. Бумага на основе целлюлозных волокон является выраженным сорбентом, поскольку легко впитывает воду; поэтому в процессе производства в неё вводят специальные добавки (клеящие и гидрофобизирующие вещества), которые повышают её устойчивость и сохраняют эксплуатационные свойства, особенно для офисной и печатной бумаги [77, 119].

В бумажную массу также вводят минеральные наполнители, которые повышают непрозрачность, гладкость поверхности и улучшают восприятие красок и печатных красок. В качестве наполнителей используют, в частности, каолин, карбонат кальция и диоксид титана [25].

Печатные сорта бумаги часто дополнительно покрывают слоем белого пигмента и клея (например, крахмала или казеина) для улучшения белизны, гладкости и качества печати. Для специальных целей применяют и множество других функциональных добавок. На ранних этапах развития целлюлозно-бумажной промышленности нехватка

доступных и качественных источников целлюлозы сделала поиск более дешёвого и распространённого сырья одной из центральных тем в истории бумагоделия [78].

Китайские исследователи установили, что основным источником целлюлозы в древнем Китае первоначально была конопля, затем широкое распространение получили тутовые волокна, а также ветошь, которая нередко служила стандартным компонентом бумажной массы. Позднее были разработаны специальные измельчительные (дробильные) машины для ускорения процесса приготовления массы, а операция истирания постепенно была заменена размолом. По свидетельству Тин Гуанкая Ву, уже к XVII веку используемое сырьё предварительно размалывали до массы с помощью одного молоткового механизма, в качестве наполнителя применяли белую глину и гипс, объёмы производства существенно возросли, а клей вводился в виде водного клеевого раствора [77].

Для придания бумаге светло-жёлтого оттенка в массу добавляли сок некоторых растений. Введение клея имело принципиальное значение, поскольку оно повышало прочность бумаги, защищало её от насекомых, а также препятствовало слипанию листов в процессе прессования. Минеральные пигменты могли добавляться в массу ещё до формования листа, если требовалось получить окрашенную бумагу.

В традиционной китайской технологии формования бумаги использовали два основных метода. Первый заключался в применении решётчатых форм для отлива листов. Китайские формы оснащались ситами с очень мелкими дренажными отверстиями. Рама, как правило, имела прямоугольную форму, изготавливалась из бамбука и покрывалась тканью. Этот подход напоминал технику изготовления войлока: разжиженный материал выливали на льняное сито, разбавляли водой и вручную распределяли по поверхности. Однако метод имел серьёзный недостаток: получаемый материал отличался неровной поверхностью, а при снятии листа в мокром состоянии он легко повреждался. Если же дать листу полностью высохнуть на форме, существенно увеличивалось время производственного цикла, что делало данный способ малоэффективным [22].

Второй метод представлял собой более прогрессивную технику формирования листов. Вместо выливания пульпы на форму, саму форму погружали в ёмкость с бумажной массой, разбавленной большим количеством воды. При этом волокна осаждались на сетке равномерным слоем. Полученные листы отжимали с помощью примитивного пресса (тяжёлой деревянной или каменной плиты), а затем сушили. Для ускорения процесса

сушки и улучшения качества листы дополнительно прессовали на нагретых плитах, после чего получали готовую бумагу [22].

В 1774 году К.В. Шееле предложил использовать хлор в процессе отбеливания бумаги, что стало важной вехой в развитии технологий отбеливания. В 1807 году Мориц Иллиг установил, что к размолотым волокнам можно добавлять «сосновое мыло» и вызывать его осаждение добавлением квасцов. Полученная при этом бумага обладала необходимой проклейкой уже на стадии формования листа и требовала только сушки, что позволило отказаться от дополнительных этапов поверхностной пропитки и повторной сушки [113].

Дальнейшие поиски альтернативных источников целлюлозы привели к использованию древесины, что открыло возможность получать целлюлозу для производства бумаги из древесных волокон. На ранних этапах применяли в основном механическое измельчение древесины без удаления лигнина, что позволяло производить бумагу удовлетворительного качества, но такая бумага была механически слабой и химически нестабильной. В XIX–XX веках были разработаны технологии химической переработки древесины, направленные на удаление лигнина и низкомолекулярных примесей и получение высококачественной целлюлозной массы. Химически обработанная древесная масса со временем практически полностью заменила ветошь в качестве основного источника волокон для производства бумаги [62].

1.5 Эволюция бумагоделательного оборудования

В 1670 году в Голландии была изобретена размалывающая машина типа «холландер» для подготовки целлюлозной массы. Это оборудование позволило увеличить производительность примерно втрое по сравнению с применявшимися ранее методами дробления и истирания, а также существенно улучшило качество бумаги.

В 1799 году француз Николя-Луи Робер сконструировал первую автоматическую бумагоделательную машину с непрерывно движущимся полотном, которая могла производить около 100 кг бумаги в сутки.

В 1804 году в Англии была установлена первая промышленная бумагоделательная машина, усовершенствованная братьями Фурдринье и инженером Донкином.

В 1823 году к бумагоделательной машине была добавлена сушильная часть: внутри сушильных цилиндров первоначально размещались угольные нагревательные устройства для подогрева их поверхности, а позднее цилиндры стали нагреваться паром.

В 1825 году под формирующей сеткой установили отсасывающие ящики, в которых вакуум создавался с помощью вакуумного насоса, что улучшило процесс обезвоживания бумажного полотна.

К середине XIX века бумагоделательные машины превратились в сложные агрегаты непрерывного и полностью механизированного действия, а бумага стала производиться в виде рулонов.

В 1846 году было изобретено устройство для получения механической древесной массы.

В середине XIX века в Англии и Франции были разработаны методы варки целлюлозы с использованием соды и сернистых соединений; основным сырьём для бумажной промышленности стали механическая и химическая древесные массы, преимущественно из хвойных пород.

В XX веке производство бумаги превратилось в крупную, высокотехнологичную отрасль с полностью автоматизированными линиями, мощными теплоэлектроцентралями и сложными химическими производствами по переработке целлюлозного волокна [22].

1.6 Основные виды сырья для производства бумаги

Все виды древесины остаются основным источником целлюлозы по многим экономическим и технологическим причинам. Наряду с древесиной используются и другие источники, формирующие рынок для многолетних растений, богатых целлюлозными волокнами, таких как хлопок, пшеница, ячмень, кукуруза и тростник. В качестве сырья также применяют макулатуру, бумажные изделия и хлопчатобумажные ткани. На долю древесины приходится около 90 % всех материалов, используемых в отрасли, и одной из причин её доминирования является высокий процент волокон в единице объёма, а также относительная простота переработки. Древесина обладает преимуществами при транспортировке и хранении по сравнению с недревесным сырьём, а её волокна отличаются высокой прочностью и технологичностью. Для производства целлюлозы могут использоваться практически все виды древесины, однако предпочтение обычно отдаётся хвойным породам благодаря их более длинным волокнам по сравнению с лиственными породами [115].

Наиболее широко используемые породы в мире – сосна, ель, тополь, эвкалипт, дуб и берёза. Для производства целлюлозы требуются балансы сравнительно небольших

диаметров, поэтому для этой цели подходят плантационные насаждения или леса, созданные рассадным способом. Заготовку брёвен осуществляют, когда они достигают подходящего диаметра (10–15 см). В переработку могут идти как остатки древесины от коммерческих распилов, так и необрезная древесина. Допускается использование частей стволов и крупных ветвей диаметром более 10 см, способных давать новые побеги [107].

Между различными видами растений существуют значительные различия в свойствах волокон, и разные типы целлюлозных волокон демонстрируют отличающиеся физические характеристики, что напрямую влияет на качество и технологическую ценность волокнистого ресурса при производстве бумаги.

В процессе производства используется несколько категорий древесины, каждая из которых обладает своими особенностями, определяющими её пригодность для тех или иных видов бумаги.

1.6.1 Хвойная древесина

Хвойные породы древесины наиболее широко применяются в целлюлозно-бумажной промышленности благодаря их специфическим анатомическим и физико-механическим свойствам. Характерной особенностью хвойной древесины являются длинные волокна, обеспечивающие получение прочной и одновременно достаточно гибкой бумаги. Так, древесина сосны содержит длинные и устойчивые к разрыву волокна, что делает бумагу, изготовленную на её основе, высокопрочной.

В целлюлозной промышленности для разделения древесины на волокна используют механические и химические процессы. Хвойные породы дают длиноволокнистую массу, которая существенно повышает прочность бумажного полотна [84].

К основным хвойным породам, применяемым в бумажном производстве, относятся белая сосна, красная сосна, ель и красная пихта. Эти породы известны тем, что позволяют получать прочную и долговечную бумагу, а в ряде случаев считаются более экологичными за счёт сравнительно быстрого роста деревьев. Однако древесина хвойных пород может содержать значительное количество смолистых и липких веществ, и иногда бумаге требуется дополнительная обработка для их удаления [116].

1.6.2 Лиственная древесина

У лиственных (широколиственных) пород древесины волокна короче, чем у сосны и других хвойных пород. Короткие волокна не обеспечивают такой же уровень прочности, как длинные хвойные, однако позволяют получать бумагу с особыми свойствами, востребованными для определённых видов продукции. Бумага из лиственной древесины, как правило, более мягкая и менее прочная.

Пиломатериалы лиственных пород перерабатываются с использованием аналогичных технологических схем, но для улучшения свойств целлюлозной массы могут добавляться специальные химические реагенты. В качестве сырья широко используются дуб, тополь, бук и клён [108].

Из такой массы получают мягкую и гибкую бумагу, что особенно важно при производстве писчей и офсетной бумаги, а также гигиенических видов бумаги. Однако прочность таких сортов, как правило, ниже по сравнению с бумагой, изготовленной преимущественно из сосновой массы [132].

1.6.3 Тропическая древесина

Тропические породы древесины, такие как эвкалипт, получили широкое распространение в бумажной промышленности благодаря быстрому росту и специфическим свойствам волокон. Волокна эвкалипта, как правило, имеют короткую или среднюю длину, что обеспечивает получение мягкой бумаги, хотя её прочность может уступать бумаге из хвойной древесины. Целлюлозу из таких пород обычно получают с использованием химических процессов переработки, что облегчает разделение волокон и удаление лигнина [49].

Эвкалипт – одна из наиболее часто используемых пород в производстве бумаги: он быстро растёт и даёт высококачественную древесину, позволяющую получать гладкую, высококачественную бумагу. Однако в ряде случаев её себестоимость оказывается выше из-за более сложного и энергоёмкого процесса удаления лигнина [35].

1.6.4 Бамбук

Бамбук рассматривается как современный и перспективный вид сырья для производства бумаги, обладающий уникальными свойствами, которые делают его привлекательным для целлюлозно-бумажной промышленности. Он характеризуется

относительно длинными волокнами и очень высокой скоростью роста, что делает его экономически выгодным сырьевым ресурсом [53].

Целлюлоза, получаемая из бамбука, отличается высокой белизной и чистотой, содержит относительно небольшое количество лигнина и рассматривается как экологически предпочтительный продукт, поскольку использование бамбука способствует снижению нагрузки на традиционные лесные экосистемы. Тем не менее масштабы его применения пока уступают хвойным и лиственным породам древесины [117].

1.7 Основные ресурсы, используемые в производстве бумаги

Источник волокна. Основным источником волокна при производстве бумаги является древесина [87].

Химические вещества. Современное производство бумаги невозможно представить без использования широкого спектра химических реагентов. Потребление химикатов за последние 25 лет значительно возросло, и ожидается, что их доля в целлюлозно-бумажной промышленности будет увеличиваться примерно на 3% в течение ближайших десяти лет по мере развития технологий и научно-технического прогресса в отрасли.

Энергия. Для работы машин и оборудования на всех стадиях бумажного производства необходим надёжный источник энергии. Все бумажные фабрики в мире используют электроэнергию как основной энергоресурс. Кроме того, целлюлозно-бумажные предприятия относятся к числу паро- и энергоёмких объектов: для выработки пара часто применяются вспомогательные котлы (например, водогрейные и вспомогательные паровые котлы) [131].

Вода. Целлюлозно-бумажная промышленность является одной из наиболее водоёмких отраслей. Вода используется на множестве стадий технологического процесса: при многократной промывке целлюлозы, при перекачке целлюлозной массы через различные технологические узлы, а также при подаче массы на бумагоделательные машины. Масса, поступающая в машину, может содержать до 99 % воды и лишь около 1 % волокна. На старых предприятиях расход воды может достигать 210 м³/т бумаги, тогда как на современных фабриках используются замкнутые системы водоснабжения, позволяющие снизить расход до примерно 42 м³/т готовой продукции [87].

1.8 Отходы целлюлозно-бумажного производства

Вода и сточные воды. Сточные воды целлюлозно-бумажных предприятий содержат значительные количества растворённых твёрдых веществ (TDS) и взвешенных частиц (TSS), образующихся на стадиях приготовления щёлоча, варки целлюлозы, промывки и отбеливания. Кроме того, в них присутствуют растворённые органические соединения, включая хлорорганические вещества и диоксины [124].

Выбросы в атмосферу. Загрязняющие атмосферу выбросы представлены, прежде всего, технологическими газами, состав и концентрация которых зависят от применяемого процесса получения волокна. К ним могут относиться соединения серы, оксиды азота (NO_x), хлор, диоксид углерода и метан. Другими распространёнными источниками газообразных выбросов являются установки по сжиганию отходов, а также паровые котельные и энергетические установки, которые формируют выбросы твёрдых частиц, сернистых соединений и оксидов азота [104].

Отходы и твердые отходы. Бумажные фабрики генерируют значительные объёмы неопасных твёрдых отходов, хотя образуются и отходы с низким, но не нулевым уровнем экологического риска. К таким отходам относятся кора, отделяемая от древесины, неорганические осадки (например, известково-глинистые отложения), образующиеся при химической регенерации, а также биологические иловые осадки, получаемые при очистке сточных вод. К опасным отходам относят масла, смазочные материалы и химические реагенты; их суммарное количество может достигать порядка 1 кг на тонну готовой продукции [114].

1.9 Подготовка древесных балансов к производству целлюлозы

Как только хлысты древесины поступают на завод, начинается процесс их распиловки на короткие деревянные сортименты (балансы) с использованием раскряжёвочных установок, которые обычно включают подающие устройства, подъёмные площадки, рубительные машины и подвесные циркулярные пилы, а также ленточные конвейеры, транспортирующие бревна внутрь предприятия. После поперечной распиловки балансы направляются либо на склад, либо непосредственно в производство [111].

Бревна нарезают на отрезки длиной 60–120 см, что при необходимости позволяет перемещать их на другие участки для очистки или хранения. Если поступают хлысты

различной длины и диаметра, их перерабатывают в более мелкие балансы. В таких случаях вместо продольных фрез используют дисковые пилы, которые легче перемещать и с их помощью можно распиливать стволы на отрезки одинаковой длины, несмотря на различия между самими стволами [71].

Затем короткомерные бревна подвергают окорке на специальных машинах, где кора отделяется от древесины. Кора содержит небольшое количество целлюлозных волокон, а её присутствие в щепе повышает расход химикатов и пара при варке целлюлозы, не давая при этом полезного эффекта: она окрашивает получаемую массу и снижает её чистоту. Кроме того, кора богата смолистыми и липкими веществами, что затрудняет получение качественной целлюлозы [81].

В отдельных случаях очистка некоторых участков лесной подстилки может выполняться вручную или с использованием мобильных механизмов [106].

Крупномерная древесина, используемая для производства химической целлюлозы, раскалывается на более мелкие фрагменты с целью обеспечения полного и быстрого насыщения химическими растворами при варке.

При выходе древесной щепы из рубительной машины она обычно содержит до 2% крупных включений, непригодных для дальнейшей переработки. Щепу сортируют с помощью ситовых классификаторов, состоящих из двух вибросит, установленных одно над другим. Верхнее сито имеет отверстия такого размера, чтобы задерживать крупные частицы, не пропуская их дальше, но при этом свободно пропускать щепу приемлемого и мелкого фракционного состава. Нижнее сито снабжено более мелкими целевыми отверстиями, через которые проходят мелкие частицы. Они могут накапливаться в бункере под сортировкой либо отводиться ленточным транспортером [114].

Заводы оснащены специальными складами для хранения щепы перед процессом варки. Эти склады располагаются между деревообрабатывающим цехом и варочными отделениями. Их размещают таким образом, чтобы обеспечить непрерывную подачу щепы к варочным аппаратам (баллонам) для разложения древесины, а также полную и быструю разгрузку крупных партий щепы при работе по потоково-партидной схеме. Размер складских ёмкостей определяется мощностью предприятия и может варьировать в широких пределах [106].

Основными стадиями производства целлюлозы, бумаги, картона и других продуктов на основе целлюлозы являются: получение целлюлозы, изготовление

бумажного полотна и отделки бумаги. Целлюлозу можно производить механическим, полухимическим или полностью химическим методами. При этом исходная древесина содержит три основных компонента: целлюлозные волокна (необходимые для изготовления бумаги), лигнин и гемицеллюлозы [130].

Цель процесса варки целлюлозы заключается в том, чтобы разложить лигнин и гемицеллюлозы на более мелкие, водорастворимые фрагменты макромолекул и тем самым отделить их от целлюлозных волокон. В отличие от этого, механический способ основан преимущественно на разрушении связей между древесными волокнами без глубокой химической модификации [129].

Производство химической целлюлозы в настоящее время является доминирующим методом: на его основе получают около 70 % мирового объёма целлюлозы. Производство бумаги включает несколько ключевых этапов, среди которых варка целлюлозы, формование, прессование и сушка бумажного полотна [120].

1.10 Методы получения бумажной массы

1.10.1 Механический способ получения целлюлозных волокон

Механическая масса считается одним из самых простых видов бумажной массы, и этот метод начали использовать в 1869 году н. э. Она получается в результате процесса разделения волокон, основанного только на действии механических сил в присутствии водяного пара с использованием специальных деревообрабатывающих машин. Механическая древесная масса примерно на 90% состоит из сухого древесного материала [38].

Круглые балансы (из центральной части стволов деревьев) подают на специальную машину, где древесина измельчается и разделяется на волокна под действием трения в присутствии воды. Тепло, выделяющееся в процессе трения, способствует размягчению лигнина, который отвечает за скрепление клеточных стенок волокон и при размягчении позволяет волокнам отделяться друг от друга. Этот процесс может приводить к разрыву части волокон, а небольшой процент волокон остаётся склеенным, что иногда сопровождается образованием мелких фракций – так называемой древесной муки [102].

Получаемая бумага обладает ограниченной механической прочностью из-за разрыва части волокон и присутствия древесной муки. Механические свойства материала можно улучшить за счёт очистки массы от древесных частиц, в которых не произошло

полного высвобождения волокон, а также путём обезвоживания и сушки массы с последующим использованием её при производстве бумаги или картона [88].

Данный метод характеризуется тем, что получаемая бумага обладает низкой прочностью, содержит примеси, не обладает высокими оптическими и механическими показателями, слабо устойчива к воздействию повреждающих факторов. Она быстро стареет и не отличается долговечностью, поэтому механическую массу редко применяют при производстве важных, долговечных видов бумаги. Полученная целлюлоза отличается низкой прозрачностью, легко впитывает воду и со временем деградирует. В её составе сохраняется значительное количество нецеллюлозных веществ – смол, лигнина и других компонентов, связывающих древесные волокна [39].

Механическая масса используется отдельно или в смеси с химической целлюлозой при производстве газетной бумаги, дешёвых сортов писчей и печатной бумаги, обоев, картона и т. п. Высокий процент механической массы в газетной бумаге обеспечивает её непрозрачность и тем самым повышает пригодность для печати, а также удешевляет производство, несмотря на ограниченные эксплуатационные свойства. Выход целлюлозы при таком способе может достигать 90% от массы исходной древесины. Этот метод применяют преимущественно для пород древесины с длинными волокнами и низким содержанием смолы [95].

1.10.2 Химические методы получения целлюлозных волокон

Для обработки и растворения лигнина и нецеллюлозных компонентов (гемицеллюлоз) применяют химические реагенты при высокой температуре и давлении. Это позволяет легко высвободить целлюлозные волокна без необходимости приложения высокой механической силы. Получаемая таким образом целлюлоза сохраняет полную длину волокон и в основном состоит из целлюлозного компонента. При этом выход по массе снижается по сравнению с механической массой и составляет около 40–55 % от массы древесного сырья. При варке подбирают тип варочного аппарата, величину давления и температуры, а также характеристики варочного раствора [107].

1.10.2.1 Сульфитный метод

Сульфитный метод основан на варке древесины в водном растворе сернистого газа с добавлением сульфита кальция при высокой температуре и давлении. В процессе варки (приготовления) лигнин превращается в серусодержащие соединения. В условиях

кислотного гидролиза молекулы лигнина расщепляются и растворяются в щёлоче, а волокна высвобождаются с образованием целлюлозной массы.

Активным агентом в этом процессе является «свободный диоксид серы», который удаляет лигнин, но одновременно частично разлагает и целлюлозу. Связанный диоксид серы в форме сульфита кальция препятствует повторному осаждению продуктов распада лигнина на волокнах в ходе варки и облегчает их удаление. Отмечено, что кислая среда существенно воздействует на гемицеллюлозы [73] и частично на целлюлозные волокна, что снижает механические свойства массы.

Поэтому данный метод был модифицирован: вместо бисульфита кальция стали применять гидросульфит натрия NaHSO_3 , сульфит аммония $\text{SO}_3(\text{NH}_4)_2$ или сульфит магния $\text{Mg}(\text{SO}_3\text{H})_2$, что позволило снизить кислотность варочной среды [14].

Вместо кальция предпочтительнее использовать соли магния, поскольку соли кальция плохо растворимы в воде и из них практически невозможно регенерировать сернистый газ. Кроме того, они склонны к выпадению в осадок и вызывают засорение трубопроводов и аппаратуры при приготовлении массы [14, 96].

Получаемая сульфитная целлюлоза отличается светлым цветом и сравнительно низкой стоимостью отбеливания. Её широко используют при производстве писчей и печатной бумаги, декоративных сортов, санитарно-гигиенической бумаги, жиронепроницаемой бумаги, мелованных и высококачественных рулонных видов и др. Вместе с тем этот метод непригоден для древесины с высоким содержанием смолы [91].

1.10.2.2 Методы с использованием гидроксида натрия

Второй тип химических процессов основан на применении гидроксида натрия. При высокой температуре гидроксид натрия разлагает лигнин, а также растворяет гемицеллюлозы, связанные с лигнином, и часть экстрактивных веществ, содержащихся в древесине.

Древесину (ветви и другие сортименты) измельчают в щепу и загружают в варочный аппарат. После добавления каустической соды варку ведут при температуре около $90\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2–6 часов при давлении $15\text{--}20\text{ кг/см}^2$. Этот метод используется при переработке древесины с короткими волокнами; при этом окорка перед варкой может не проводиться, поскольку каустическая сода сама разрушает кору и растворяет жиры и

смолистые вещества. Она также растворяет гнилые участки древесины, а жирные и смолистые компоненты омыляются и переходят в водорастворимую форму.

Данный метод особенно подходит для лиственных пород и может применяться для большинства видов древесины в целом; выход целлюлозы при этом составляет около 45 % от массы абсолютно сухой древесины. Щёлочная целлюлоза обычно используется при производстве низкосортной бумаги, в основном упаковочных видов и картона [127, 130].

Активное химическое вещество после варки может быть частично регенерировано и повторно использовано, что делает этот метод экономичным [81].

При производстве технической целлюлозы в настоящее время это наиболее распространённый подход, позволяющий использовать как твёрдые (лиственные), так и мягкие (хвойные) породы древесины, а также различные недревесные материалы. Указанный метод является развитием содового процесса и был предложен немецким химиком Далем в 1884 году [107].

1.10.3 Химико-механический способ

Третий тип – химико-механический способ – обеспечивает более высокий выход целлюлозы по сравнению с чисто химическими методами, а её качество заметно выше, чем у механической целлюлозы. Этот подход сочетает элементы технологии механического и химического получения массы, при этом удельный расход энергии ниже, чем при чисто механическом и чисто химическом способах [103].

Процесс основан на частичном химическом изменении лигнина в межклеточных (срединных) пластинках древесных волокон с помощью реагентов. Измельчённую древесину предварительно обрабатывают одним из известных химических методов (содовым, сульфатным или сульфитным), а затем разделяют на волокна с помощью механической энергии. В результате выход целлюлозы оказывается выше, чем при чисто химической варке, но ниже, чем при механическом способе, в среднем составляя 65–85 % от абсолютно сухой массы древесины.

Этот метод подвергают критике из-за того, что получаемая полухимическая целлюлоза имеет тёмный цвет, относительно невысокую прочность и плохо поддаётся отбеливанию. Поэтому её используют преимущественно при производстве низкосортной упаковочной бумаги и картона [76].

С технологической точки зрения наиболее эффективным полуфабрикатом является химически приготовленная целлюлоза, за ней следует полухимическая масса, тогда как механическая масса считается наименее эффективной [87].

Порода древесины (лиственные или хвойные породы) является одним из важнейших факторов, определяющих как качество, так и количество получаемого продукта. Важную роль играет также плотность древесины: древесина высокой плотности требует более длительной подготовки, тогда как при меньшей плотности на получение того же количества продукта требуется меньше времени. Исследования показывают, что различия между породами древесины приводят к существенным различиям в качестве массы и характеристиках процесса варки.

Продолжительность варки зависит от многих факторов, среди которых: температура, количество и концентрация активной щёлочи, а также сульфидность щелока [112]. Увеличение любого из этих параметров в определённых пределах приводит к сокращению времени варки. В варочный котёл должно быть введено достаточное количество химикатов и древесины, чтобы обеспечить растворение требуемой доли лигнина и достижение целевой температуры. Важными параметрами являются соотношение массы химикатов и древесины, отношение массы раствора к массе древесины, а также исходная концентрация активных веществ в варочном растворе.

Показано [101], что скорость химической реакции определяется концентрацией активных компонентов варочного раствора, что является критическим фактором в процессе удаления лигнина [69]. Крафт-процесс задаёт соотношение «химикаты/древесина» и «вода/древесина», и на основе этих двух переменных определяется начальная концентрация раствора. При этом концентрация химических веществ в растворе в ходе варки не остаётся постоянной, поэтому полагаться только на исходную концентрацию для описания всего процесса нельзя [106].

1.11 Подготовка целлюлозы и формование бумажного полотна

После получения всех видов бумажной массы выполняют специальные технологические операции, направленные на подготовку целлюлозы её к дальнейшему использованию в производстве бумаги и бумажных изделий. К важнейшим из этих операций относятся сортирование и очистка массы от трёх основных типов примесей. На стадии сортирования используют сита с тремя уровнями перфорации, после чего массу

подвергают отбеливанию для удаления окраски, обусловленной присутствием нецеллюлозных компонентов. Для этого применяют определённые химические реагенты, такие как хлор, гипохлорит натрия и перекись водорода. Далее следует стадия сушки массы: сначала удаляют избыток воды с помощью специальных сит, затем массу досушивают в сушильных агрегатах и в таком виде транспортируют на бумажные фабрики [107].

Процесс производства бумаги включает четыре основных этапа. Первый этап – удаление влаги путём отлива и фильтрации на цилиндрах, оборудованных вакуумными насосами, которые отсасывают воду из волокнистого полотна. Затем следует прессование на специальных пресс-цилиндрах, удаляющее до 90 % воды и уплотняющее волокна, что усиливает их сцепление и повышает прочность будущего листа перед окончательной сушкой. На стадии сушки содержание влаги в бумаге уменьшают до 6–10 % за счёт прохождения полотна через систему нагретых цилиндров, обогреваемых паром. После этого бумагу пропускают через группу тяжёлых гладких валов (каландров), которые полируют обе стороны бумажного полотна. Степень каландрирования регулируют изменением давления валов на полотно. На заключительном этапе бумажное полотно продольно разрезают до требуемой ширины и наматывают на рулоны для последующей реализации [103].

Области применения бумаги и бумажных изделий чрезвычайно разнообразны. Помимо традиционного использования для письма и печати (книги, журналы, газеты), к бумажным изделиям относят полотенца, туалетную бумагу, упаковочные картонные и другие материалы.

Книжная бумага изготавливается из смеси отбеленной целлюлозной массы, полученной содово-сульфатным способом. Плотная (креповая или высокопрочная) бумага может производиться из ветоши, шерсти и старой бумаги. Газетная бумага, как правило, представляет собой смесь около 90 % механической массы и 10 % небелёной сульфатной целлюлозы. Рулонные печатные сорта бумаги получают из комбинаций механической и полухимической массы, а также сульфатной и сульфитной целлюлозы; писчую бумагу – преимущественно на основе сульфатной и сульфитной целлюлозы.

Для получения вощёной бумаги листы очень быстро погружают в ванну с расплавленным воском. Для получения так называемой пергаментной или полупергаментной бумаги (белой, плотной, жиростойкой) её на короткое время

погружают в концентрированный раствор серной кислоты. Такая бумага используется для упаковки жиров, хранения масла, изготовления сертификатной бумаги и различных документов [81].

Следует отметить, что способ переработки растительных волокон на основных стадиях изготовления бумаги существенно влияет на состояние целлюлозных волокон, входящих в её состав. При избыточном измельчении и использовании слишком острых инструментов волокна быстрее разрушаются и повреждаются. В машинных процессах степень износа и повреждения волокон высока, особенно при низком рН, поскольку волокна дополнительно диспергируются острыми рабочими органами, а частое использование оборотной воды приводит к накоплению примесей в высоких концентрациях в готовых бумажных материалах [102]. К этим примесям относятся, в частности, остатки хлорсодержащих соединений, образующихся при отбеливании.

Химическое окисление углеводов в древесных волокнах также способствует разрушению и старению бумаги. Одними из наиболее вредных для целлюлозных волокон химических веществ являются квасцы – сульфат калия и алюминия, которые традиционно применялись для предотвращения гниения желатина, используемого при поверхностной проклейке, и для ускорения его схватывания. Однако квасцы повышают кислотность бумаги и тем самым снижают её долговечность. В связи с этим их использование в современном производстве практически прекращено.

1.12 Использование отходов лесозаготовок в промышленности

В настоящее время сучья и вершины деревьев при необходимости используются главным образом для укрепления трелёвочных волоков, насыпей лесовозных дорог, а также в незначительном количестве (около 3 %) – в качестве сырья для промышленности после переработки в технологическую щепу. Опыты, проведённые рядом научно-исследовательских институтов и лабораторий как в нашей стране, так и за рубежом, показали, что отходы лесозаготовок являются полноценным сырьём для целого ряда производств, использующих процессы химической и химико-механической переработки древесины [1].

Так, в Японии уже длительное время здоровые сучья диаметром 30 мм и более применяются в качестве сырья для целлюлозно-бумажного производства. С этой целью сучья предварительно окариваются в окорочных барабанах, после чего измельчаются на

технологическую щепу. Фирма «Кайяни» в Финляндии на протяжении нескольких лет осуществляет заготовку и переработку отходов лесозаготовок в щепу непосредственно на лесосеке после сплошных рубок. Полученная щепа используется в качестве топлива на ТЭЦ фирмы в смеси с торфом (50 % щепы и 50 % торфа). Такое топливо является экономически конкурентоспособным по отношению к бурому углю, и фирма планирует расширять его использование.

Цех древесноволокнистых плит Крестецкого леспромхоза более 10 лет применяет в качестве основного сырья технологическую щепу из отходов лесозаготовок. Прочность плит, изготовленных из такого сырья, выше, чем у плит из стволовой древесины, что объясняется более высокой механической прочностью древесины сучьев. Опыты, проведённые ЦНИИМОДом, показали, что технологическая щепа из отходов лесозаготовок пригодна и для производства древесностружечных плит. Отходы лесозаготовок также широко используются для получения арболита. Эксперименты на Бобруйском гидролизном заводе подтвердили, что они могут служить сырьём и для гидролизного производства [3].

Несмотря на это, в России отходы лесозаготовок пока используются в качестве промышленного сырья в ограниченных объёмах — около 3 % от их общего количества, и то лишь в отдельных регионах. Это объясняется прежде всего отсутствием отработанных технологических схем и технологически совместимых машин для заготовки и переработки отходов лесозаготовок в технологическую щепу. Определённый опыт в этом направлении накоплен в Карелии, Архангельской области, Карпатах и в Гузерипльском леспромхозе.

В объединении «Кареллеспром» за счёт более полного освоения лесосечного фонда и использования отходов лесозаготовок съём древесины с 1 га лесосеки по главному пользованию за последние 10 лет возрос с 119 до 134 м³. При заготовке лесосечных отходов применяются бензомоторные пилы «Тайга-214», которыми отходы разделяются на отрезки длиной до 3 м. Отрезки укладываются в пачки объёмом до 0,5 м³. Сбор и подвозка пачек отходов на погрузочный пункт выполняются подборщиками-погрузчиками. На погрузочном пункте отходы загружаются на поезд и затем доставляются на нижний склад, где после соответствующей подготовки перерабатываются в технологическую щепу на установках УЩЦ.

Заготовка отходов лесозаготовок на лесосеке ведётся специальными звеньями и комплексными лесозаготовительными бригадами по подрядному методу. Производительность лесопогрузчика при этом составляет 22–25 м³ за смену.

На предприятиях Архангельской области в технологическую щепу перерабатываются главным образом отходы лесозаготовок, получаемые на нижних складах при раскряжёвке хлыстов на сортименты [19]. Переработка ведётся на установках УПЩ и передвижных рубильных машинах.

Анализ показывает, что производство щепы из отходов лесозаготовок на УПЩ характеризуется высокой себестоимостью и экономически оправдано в том случае, если получаемая щепка пригодна для целлюлозно-бумажного производства. Отходы, образующиеся непосредственно на лесосеках, используются крайне ограниченно, так как их заготовка и вывозка на нижний склад для переработки в щепу экономически невыгодны [6].

В Карпатах отходы лесозаготовок, образующиеся на лесосеке, перерабатываются в технологическую щепу на нижнем складе. Заготовка, сбор в кучи и подвозка на верхний склад выполняются рабочими малых комплексных бригад по трём технологическим схемам [28]. Выбор конкретной схемы определяется уклоном лесосеки, а также тем, примыкает ли лесосека к магистральным транспортным путям или нет.

В США и скандинавских странах отходы лесозаготовок и низкокачественная древесина также перерабатываются в так называемую «зелёную щепу» непосредственно на лесосеке с использованием мобильных машин. При этом полученная щепка сразу подаётся в щеповоз.

Таким образом, российский и зарубежный опыт показывает, что после соответствующей переработки отходы лесозаготовок являются полноценным сырьём для промышленности. Наиболее рационально перерабатывать эти отходы в технологическую щепу непосредственно в местах их образования – на лесосеке или нижнем складе; при производстве щепы на лесосеке целесообразно применять мобильные машины. Заготовка и доставка отходов лесозаготовок с лесосеки на нижний склад для переработки их в щепу экономически оправдана только в том случае, если из этого древесного сырья может быть получена технологическая щепка, пригодная для целлюлозно-бумажного производства.

1.13 Переработка макулатуры

В мире ежегодно производится множество миллионов тонн различных видов бумаги, что неизбежно ведёт к росту объёмов бумажных отходов. Бумажные отходы составляют около трети твёрдых бытовых отходов, образующихся во всём мире. Ранее макулатуру, как правило, захоранивали на полигонах, где она занимала значительные площади, либо сжигали. При сжигании бумаги выделяется диоксид углерода, нарушающий естественный газовый баланс атмосферы, что делает захоронение и сжигание неприемлемыми и экологически вредными вариантами обращения с бумажными отходами.

В связи с этим возникает необходимость перерабатывать бумажные отходы для получения вторичной, сравнительно чистой целлюлозной массы для новых циклов бумажного производства и освобождения её от сопутствующих примесей, что позволяет уменьшить загрязнение окружающей среды и снизить темпы вырубки лесов [105]. В развитых странах этому процессу уделяется серьёзное внимание: в населённых пунктах устанавливаются контейнеры для отдельного сбора бумажных отходов, что облегчает их последующую переработку. Наряду с этим предусматриваются специализированные контейнеры для стекла, металла и иных видов отходов (включая пищевые), которые собираются отдельно и направляются на соответствующие перерабатывающие предприятия [15].

Переработка макулатуры является эффективным способом уменьшения накопления твёрдых отходов, особенно с учётом того, что бумага производится в очень больших объёмах в течение года. Этот процесс включает восстановление значительной части волокон из использованной бумаги, которые могут быть повторно использованы для производства картона, новой бумаги и других видов бумажной продукции [16].

Хотя переработка бумаги по ресурсной эффективности и кратности использования сырья несколько уступает переработке металлов или стекла, она является важным инструментом охраны окружающей среды и рационального использования ресурсов. Она позволяет уменьшить объём отходов, сократить потребление воды, энергии и древесины. Исследования показывают, что переработка бумаги может обеспечивать до 40 % более высокую экологическую эффективность по сравнению с производством бумаги исключительно из первичного сырья с точки зрения снижения совокупного воздействия на окружающую среду. Кроме того, переработка может осуществляться с использованием

экологически щадящих технологий, например, применения нетоксичных отбеливателей, альтернативных источников энергии и замкнутых систем водооборота при переработке бумаги [74].

Процесс переработки макулатуры считается высокоэффективным с экономической точки зрения. Согласно статистике Агентства по охране окружающей среды США за 2008 год, переработка одной тонны 100 % бумажных отходов позволяет сэкономить около 4100 кВт·ч энергии и 28 м³ воды, а также уменьшить загрязнение воздуха примерно на 24 кг загрязняющих веществ [83]. Несмотря на это, в Соединённых Штатах ежегодно перерабатывается лишь около 9,2 млн тонн бумаги по сравнению с примерно 52,4 млн тонн бумаги, отправляемой на утилизацию. Существенная часть бумажных изделий так и не попадает в систему переработки. Переработанная бумага в значительной степени используется, например, при печати ежедневных газет [105].

Важность переработки макулатуры обусловлена, в частности, тем, что переработка одной тонны бумаги позволяет сохранить около 19 деревьев, которые ежегодно поглощают до 127 кг диоксида углерода. Поскольку процесс традиционного изготовления бумаги чрезвычайно ресурсоёмок, переработка способствует экономии примерно 1500 литров нефти, 2,68 м² площади полигонов, 4400 кВт·ч электроэнергии и 29 000 литров воды, а также снижает загрязнение воздуха на 73 % по сравнению с производством бумаги только из первичного сырья. Для производства одной тонны газетной бумаги требуется около 24 деревьев [66]. При этом стоимость закупки переработанной бумаги, как правило, ниже стоимости бумаги из первичного сырья, а предприятия по переработке и связанные с ними виды деятельности создают рабочие места для значительного числа людей [47, 83].

Помимо сохранения природных ресурсов, переработка направлена на замедление темпов их истощения и рационализацию использования энергии. Без операций по переработке макулатуры многие деревья должны были бы быть срублены, вывезены, окорены и переработаны в конечную бумажную продукцию с затратой больших объёмов энергии на всех стадиях производственной цепочки, что сопровождается дополнительным негативным воздействием на окружающую среду [23]. Масштабная вырубка лесов влияет на климат, нарушает экологический баланс и способствует росту загрязнения. При этом, хотя процессы переработки также требуют энергии, уровень загрязнения, связанный с ними, несопоставим с загрязнением, возникающим при энергоёмком первичном производстве бумаги [37].

1.14 Макулатура в России

Использование макулатуры в России началось в начале XX века. В крупных городах стали появляться предприятия, скупавшие у населения бумажные отходы, сортировавшие их и поставлявшие на бумажные фабрики. Потребление макулатуры в России за последние годы увеличилось примерно на 60 %. Так, если в 2010 году было переработано более 2,0 млн тонн макулатуры, то в 2014 году — уже 3,17 млн тонн, при этом общий ресурс оценивался примерно в 8 млн тонн макулатуры [10].

Разнообразие ассортимента бумажной и картонной продукции и специфика её использования обуславливают большое разнообразие состава макулатурного сырья. Для получения требуемого качества продукции из вторичного волокна необходимо использовать строго определённые виды макулатуры [24].

Нарушение этого принципа приводит либо к снижению качества готовой продукции, либо к удорожанию процессов подготовки макулатурного сырья в соответствии с требованиями ГОСТ 10700-89. В связи с этим все виды макулатуры подразделяют на группы [10]:

1. по содержанию древесной массы в макулатуре;
2. в зависимости от прочности использованного бумажного сырья во влажном состоянии;
3. по степени загрязнённости макулатуры посторонними материалами и наличию печати;
4. по содержанию небелёных целлюлозных волокон;
5. по однородности состава макулатуры.

1.15 Классификация видов макулатуры

По ГОСТ макулатура классифицируется на группы и марки в зависимости от качества. ГОСТ 10700-97 является стандартом, принятым практически во всех странах постсоветского пространства. Согласно ГОСТ, все бумажные отходы делятся на три группы:

1. Группа А – высокое качество;
2. Группа Б – среднее качество;
3. Группа В – низкое качество.

В группу А входят следующие четыре марки:

- МС-1А — отходы производства белой бумаги: бумага для печати, чертёжная, писчая, рисовальная и другие виды белой бумаги;
- МС-2А — отходы производства и переработки всех видов белой бумаги в виде чёрно-белых или цветных обрезков и лент: бумага для печати, писчая, миллиметровая, чертёжная и др.;
- МС-3А — отходы производства небелёной сульфатной бумаги, упаковочных материалов, шпагата, а также отходы производства электроизоляционного картона;
- МС-4А — использованные бумажные мешки, не влагостойкие; данный вид макулатуры имеет достаточно высокий потенциал вторичной переработки.

Эти марки макулатуры в основном используются при производстве заготовок для гофрокартона и различных видов бумажно-картонной упаковки [11].

В группу Б входят следующие три марки:

МС-5Б – отходы производства и потребления гофрированной бумаги, картона и их компонентов, а также использованные коробки из гофрированного картона, изготовленные как из первичного, так и из переработанного волокна. Этот картон содержит значительное количество крахмального клея, склеивающего плоские и гофрированные слои гофрокартона;

МС-6Б – отходы, образующиеся при производстве и потреблении всех видов картона с чёрно-белой и цветной печатью. Эти бумажные отходы могут содержать большое количество печатных красок, наполнителей и красителей;

МС-7Б – бывшие в употреблении книги, журналы, брошюры, флаеры, каталоги, блокноты, плакаты и другие виды полиграфической и бумажной продукции монохромной и цветной печати, без переплёттов, обложек и корешков, изданные на белой бумаге.

Эти марки макулатуры используются при производстве санитарно-гигиенических материалов, писчей, полиграфической и других видов бумаги. Перед использованием в производстве данная макулатура, помимо предварительной сортировки, проходит процессы рафинирования [11].

В группу В входят следующие шесть марок

МС-8В – данная марка макулатуры образуется из отходов газетной бумаги; такая макулатура содержит различные виды механической древесной массы. К ней могут относиться отходы печатной и окрашенной бумаги. Этот вид макулатуры используется при производстве газетной бумаги, наружных слоёв картона и формованных изделий из целлюлозы;

МС-9В – бумажные гильзы, катушки (без стержней и заглушек); данный вид макулатуры состоит из плотно склеенных между собой слоёв бумаги или картона;

МС-10В – формованные целлюлозные изделия. Эти продукты изготавливаются из переработанных волокон и предназначены для упаковки пищевых продуктов и промышленных товаров. Указанные марки макулатуры используются в производстве в зависимости от состава волокна и назначения изделий;

МС-11В – отходы, образующиеся при производстве и потреблении влагостойкой бумаги и картона, а также материалов типа линолеума, ламината и т. п. Данная марка макулатуры может использоваться при производстве различных видов продукции;

МС-12В – отходы, образующиеся при производстве и потреблении чёрной и коричневой бумаги и картона, а также бумаги с копировальным (углеродным) слоем;

МС-13В – отходы производства и потребления различных видов картона, белой и цветной бумаги, включая продукцию, не подпадающую под другие марки макулатуры [17].

Классификация рассматриваемых видов макулатуры основана на тех же принципах, что и европейская, а по инициативе переработчиков макулатуры перечень сортов дополнительно дифференцирован с учётом технологических особенностей макулатуры и её переработки.

1.16 Макулатура МС-5Б:

Класс 1, промышленный (МС-5Б/1) – отходы производства: гофрокартон, неиспользованные гофрокороба, гофрокартон и другие комплектующие на основе целлюлозы и древесных волокон. Массовая доля примесей и других видов макулатуры не превышает 1,0%;

Класс 2, хозяйственный (МС-5Б/2) – бывшие в употреблении коробки из гофрокартона;

– Класс 1 (МС-5Б/2-1) – то же, что класс 2, но допускается содержание примесей других видов макулатуры и загрязнений не более 3 %;

– Класс 2 (МС-5Б/2-2) – общий характер макулатуры тот же, однако допустимая массовая доля примесей других видов макулатуры и загрязняющих веществ составляет от 3,1 до 8%.

Приведённый пример свидетельствует о тенденции к увеличению количества разновидностей макулатуры и детализации её классификации [10].

1.17 Осина (*Populus tremula*)

Осина (*Populus tremula*) является одним из наиболее перспективных источников бумажного волокна. Эти деревья характеризуются быстрым ростом и высокой способностью адаптироваться к различным условиям окружающей среды, что делает их возобновляемым и экологически более экологичным ресурсом [44].

Это лиственное дерево из рода *Populus* семейства ивовых (*Salicaceae*). Осина широко распространена в регионах с умеренным и холодным климатом Европы и Азии, а также обычна в Республике Карелия, за исключением её северной части.

Осина имеет прямостоячий ствол высотой до 35 м и диаметром до 1 м (рисунок 1.1). Крона у молодых деревьев узкоконическая, у старых – округлая или овальная, достаточно ажурная, хорошо пропускающая свет. Она состоит из крупных скелетных ветвей, несущих многочисленные укороченные и удлинённые побеги. Листья округлые или ромбические (рисунок 1.2), длиной 3–7 см, с острой или тупой вершиной, с округлым основанием, волнистыми краями и перистым жилкованием.

Осина – двудомное растение. Цветки мелкие, малозаметные, собраны в поникающие серёжки (рисунок 1.3). Мужские серёжки красноватые, длиной до 15 см, женские – зеленоватые и более тонкие. Цветёт осина ранней весной, в апреле, до распускания листьев, обычно в возрасте 10–35 лет и старше. Плод осины – двустворчатая, многосемянная коробочка. Семена очень мелкие, снабжены пучком пушистых волосков и легко переносятся ветром на большие расстояния. Семена грушевидной формы, состоят из наружной оболочки и зародыша [85].

Кора молодых деревьев осины гладкая, светло-зелёная или серо-зелёная (рисунок 1.4), ближе к комлю с возрастом темнеет и растрескивается. Осина отличается большим разнообразием лишайников и играет важную роль в поддержании общего

биоразнообразия, в том числе в сохранении редких видов. Покрытие стволов дрожащего тополя мохообразными и лишайниками в среднем составляет от 38 до 94%. При этом у основания ствола их больше, тогда как на высоте 1–1,3 м от земли их количество уменьшается примерно вдвое [55].



Рисунок 1.1 – Форма дерева осины



Рисунок 1.2 – Форма листа осины



Рисунок 1.3 – Форма цветка осины



Рисунок 1.4 – Форма ствола осины

Стволы осины обыкновенной с высокими таксационными показателями и хорошо развитым моховым покровом создают оптимальные условия для расселения и развития слоевищ охраняемого лишайника лобарии лёгочной (*Lobaria pulmonaria*) [29].

Хотя технология получения осинового целлюлозы существует и известна уже многие годы, коммерческое производство осинового крафт-целлюлозы в промышленном масштабе началось всерьёз только в 1980-х годах. Осиневая крафт-целлюлоза была быстро воспринята рынком: её охотно использовали производители бумаги в Канаде, а

также в США, Европе и Японии. Отбеленная осиновая крафт-целлюлоза по своим свойствам в производстве бумаги близка к отбеленной эвкалиптовой целлюлозе [46].

Свойства и области применения осиновой целлюлозы в бумажном производстве весьма широки. Начиная с XX века накоплен значительный объём сведений о технологиях получения осиновой целлюлозы и изготовления бумаги на её основе. Технические и экономические преимущества использования осины неоднократно подчёркивались и продвигались в Канаде, особенно с конца XX века. Однако этим возможностям долгое время уделяли недостаточное внимание из-за обилия хвойных пород древесины в стране [109].

1.18 Физико-химические свойства древесины ветвей осины

Имеющиеся литературные данные о компонентном составе древесины ветвей осины, представлены в сводной таблице 1.1 [64].

Таблица 1.1 – Химический состав древесины ветвей и ствола осины

Компоненты древесины	Ветви осины, % а.с.д.	Ствол осины, % а.с.д.
Целлюлоза	43,3	51,2
Лигнин	24,1	20,3
Зольность	0,86	0,4
Экстрактивные вещества, растворимые в органических растворителях:		
хлористом метилена	2,58	1,43

На основании результатов химического анализа можно сделать вывод о сходстве древесины ветвей с древесиной ствола осины. При этом древесина ветвей, по сравнению с древесиной ствола, содержит на 8 % меньше целлюлозы, на 4 % больше лигнина, на 1,1 % больше экстрактивных веществ, растворимых в хлористом метилена, а также характеризуется на 0,46 % более высокой зольностью.

Однако, несмотря на многочисленные исследования физических, анатомических и химических свойств древесины осины, в литературе отсутствуют достаточно чёткие данные, касающиеся основных свойств ветвей. В связи с этим выявление основных характеристик древесины ветвей (физических, анатомических и химических) также является одной из задач настоящего исследования.

1.19 Выводы по обзору литературы, постановка цели и задач исследования

Одной из основных тенденций развития целлюлозно-бумажной промышленности является повышение ресурсной эффективности производства и снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду. В современных условиях всё большее значение приобретают технологии, ориентированные на рациональное и более полное использование древесного сырья, сокращение отходов и расширение сырьевой базы за счёт вовлечения в переработку альтернативных источников волокнистых полуфабрикатов.

Традиционно основным сырьём для получения целлюлозы и бумаги служит стволовая древесина. Однако рост потребности в бумажной и картонной продукции, а также необходимость соблюдения принципов устойчивого развития приводят к поиску новых решений, позволяющих одновременно снизить ресурсоёмкость производства и повысить экологичность готовой продукции. Одним из таких направлений является использование лиственных лесосечных отходов, образующихся при заготовке древесины и включающих ветви и вершинки.

Как показано в обзоре литературы, лесосечные отходы представляют собой значительный по объёму и потенциально доступный ресурс, который в большинстве случаев недостаточно эффективно используется или остаётся не вовлечённым в технологические процессы. В то же время ветви и вершинки характеризуются специфическими морфологическими и анатомическими особенностями, отличающими их от стволовой части древесины. Эти особенности проявляются в структуре волокна, степени одревеснения, распределении клеточных элементов, а также в химическом составе, включая содержание целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина, что в совокупности может оказывать влияние на выход полуфабриката, его технологические свойства и качество получаемой бумаги.

В литературе отмечается, что применение альтернативного сырья на основе лесосечных отходов может обеспечить ряд преимуществ, связанных с расширением сырьевой базы, снижением затрат на основную древесину и уменьшением объёмов древесных остатков лесозаготовки. Вместе с тем подчёркивается, что использование ветвей и вершинок требует научно обоснованного подхода, поскольку данный вид сырья способен изменять параметры процесса получения волокнистых полуфабрикатов, а также влиять на формирование бумажного полотна и свойства конечного продукта.

На основании анализа опубликованных данных можно предположить, что листовные лесосечные отходы, представленные ветвями и вершинками, являются перспективным альтернативным источником получения волокнистых полуфабрикатов для производства упаковочной бумаги, в том числе видов бумаги с пониженной степенью химической обработки. Однако данное утверждение требует экспериментального подтверждения с установлением характерного уровня структурно-морфологических и прочностных показателей получаемой целлюлозы, а также оценки закономерностей изменения свойств волокон в процессе размола и их влияния на бумагообразующие характеристики при изготовлении готовой продукции.

Актуальность исследований данного направления усиливается в условиях перехода к принципам циркулярной экономики и внедрения экологически ориентированных технологий, предусматривающих комплексное использование древесного сырья и максимальное вовлечение отходов в производство материалов с добавленной стоимостью. В связи с этим проведение экспериментальных исследований, направленных на оценку возможности использования листовных лесосечных отходов в качестве альтернативного сырья, является обоснованным с научной и практической точки зрения.

Цель диссертационной работы.

Оценить возможность использования листовных лесосечных отходов, представленных ветвями и вершинками, в качестве альтернативного сырья для получения бумаги с пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью.

В работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Оценить возможность получения сульфатным способом полуфабриката из древесины ветвей осины как альтернативы целлюлозы из стволовой 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 сульфатной ЦВВ из ветвей осины на бумагообразующие свойства при получении бумаги с пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью.

2 МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для исследований использованы ствол и ветви осины (*Populus Tremula*), местом произрастания которых является Приморский район Архангельской области (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Образцы осины, использованные в исследовании

2.1 Подготовка образцов древесины к химическому анализу

Из ствола осины были напилены «шайбы» толщиной 2,5 – 3,0 см. Сучья были отделены от ствола и распилены на сегменты длиной от 6 – 15 см. (Рисунок 2.2). На рисунке 2.3 представлена фотография установки для изготовления щепы, она состоит из деревянной поверхности, образующей стол, и специального ножа. Древесина была нарезана в щепу толщиной не более 4,0 – 5,0 мм.



Рисунок 2.2 – Шайбы из ствола и ветви осины после снятия коры



Рисунок 2.3 – Установка для изготовления щепы

Полученная отсортированная щепа хранилась в лабораторном шкафу при комнатной температуре, после хранения ее влажность соответствовала воздушно-сухому состоянию. Опилки, полученные при пилении древесины, были собраны, просеяны через сито с перфорацией 0,25 мм, рисунок 2.4, после чего использованы для изучения химического состава древесины. На рисунке 2.5 представлены фотографии фракций опилок, прошедших сквозь сито и оставшихся на нем. Анализ компонентного состава древесины в виде опилок и волокнистого полуфабриката проводили по общепринятым методикам [30].



Рисунок 2.4 – Просеивание опилок



а

б

Рисунок 2.5 – Просеивание опилок: а – крупная фракция; б – мелкая фракция

2.2 Микроскопические исследования

Микроскопическое исследование позволяет детально узнать состав всех элементов древесины и проводится на тонких срезах. Ввиду анизотропии древесины, микроскопическое исследование проводится в трех типов срезов: поперечный (X), проходящий перпендикулярно оси дерева, на котором отчетливо видны годовичные кольца; радиальный (R), проходящий перпендикулярно от центра к периферии; и тангенциальный (T), параллельный годовичным кольцам [107]. При исследовании микроскопического строения древесины ствола и ветвей осины был использован цифровой микроскоп Imager M2m Carl Zeiss, рисунок 2.6. Данный исследовательский микроскоп предназначен для изучения структуры и строения микрообъектов с возможностью формирования электронной базы данных фотографий. Получение и обработки цифровых фотографий проводится с применением программного обеспечения AxioVision Rel.4.8.



Рисунок 2.6 – Исследовательский моторизованный микроскоп высокого разрешения «Imager M2m Carl Zeiss»

2.3 Определение физических свойств древесины

Древесина – неоднородный материал, состав которого варьируется в зависимости от породы и преобладающих факторов окружающей среды. Поэтому физические, химические и механические свойства древесины напрямую связаны с размером, количеством и расположением составляющих ее анатомических элементов [90]. Изучены физические свойства: влажность, плотность и зольности древесины.

2.3.1 Определение содержания влаги в древесине

Содержание влаги сильно влияет на физические и механические свойства древесины, а также влияет на ее использование, производство и защиту от вредителей [65]. Содержание влаги в древесине оказывает существенное влияние на ее использование в производстве бумаги, поскольку влажная древесина весит больше, чем сухая, что увеличивает затраты на транспортировку, а также влияет на расчет объема закупки пиломатериалов, поскольку высокое содержание влаги увеличивает общий вес, но не объем целлюлозы, необходимой для производства бумаги, а также увеличивает затраты энергии, необходимые для сушки пиломатериалов, и это может значительно увеличить общие затраты на производство бумаги [68].

Определение влажности воздушно-сухих опилок проводили по стандартной методике методом высушивания в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 103 ± 2 °C [28]. Определение влажности целлюлозы проводили по ГОСТ 50316–92. Для вычисления влажности w , %, и коэффициента сухости $K_{\text{сух}}$ материала, показывающего относительное содержание в пробе абсолютно сухого материала, использовали три параллельных определения.

Во всех последующих химических анализах для расчета абсолютно-сухой навески древесины или целлюлозы, значение взятой воздушно-сухой навески умножают на $K_{\text{сух}}$.

2.3.2 Плотность древесины

Он определяется как отношение массы древесины к ее объему, выражается в г/см^3 и зависит от конкретного уровня влажности [57].

Плотность древесины является важным параметром, влияющим на эффективность и качество производства бумаги, поскольку плотная древесина содержит больше целлюлозных волокон на единицу объема [90], что делает ее более эффективной для производства бумаги. Это означает, что для производства определенного количества целлюлозы потребуется менее плотная древесина по сравнению с древесиной низкой плотности, которая также содержит более прочные и длинные волокна, что способствует производству более прочной и высококачественной бумаги [3].

Плотность древесины для производства бумаги варьируется в зависимости от породы древесины и требований к конечному продукту. Выбор древесины оптимальной

плотности помогает добиться высокого выхода целлюлозы и качества конечного продукта [12].

Для определения плотности были изготовлены прямоугольные образцы с основанием 20×20 мм и высотой по длине волокна 30 мм. Измеряли размеры и длину сечения, затем взвешивали образцы, определяли их влажность и рассчитывали плотность древесины по формуле (1):

$$\rho_w = m_w \cdot V_w \quad (1)$$

где ρ_w – плотность древесины при влажности w , кг/м³(г/см³);

m_w – масса образца древесины при влажности w , кг(г);

V_w – объем образца древесины при влажности w , м³(см³).

2.3.3 Определение зольности древесины

Древесная зола – это материал, остающийся после сгорания древесины в процессе сгорания. Древесная зола содержит множество минеральных соединений, таких элементов, как кальций, калий, магний и железо.

Состав древесной золы варьируется в зависимости от вида сжигаемой древесины и условий горения. Состав древесной золы анализируется, чтобы установить наличие различных компонентов. Высокое содержание золы может повлиять на качество бумаги и требует специальных мер для управления ею в производственном процессе [88].

Определение зольности воздушно-сухих опилок проводили по общепринятой методике методом прокаливания в муфельной печи (в течение 3- 4 часов) навески, соответствующей 1 г древесных опилок, при стандартной температуре (575±25)°С до постоянной массы [28]. Определение зольности целлюлозы проводили по ГОСТ 18461–93. Для вычисления зольности материала использовали не менее трех параллельных определений.

2.4 Определение компонентного химического состава

Химический состав древесины очень сложен. Древесная ткань состоит из различных химических компонентов, которые распределены неравномерно из-за анатомического строения древесины. В то же время древесина – это не просто смесь химических компонентов, и поведение древесины в целом определяется не только свойствами отдельных составляющих материалов. Большинство древесных материалов состоят из высокомолекулярных соединений. Основными химическими компонентами, содержащимися в древесине, являются целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин [2]. В этом

исследовании определяли процентное содержание целлюлозы, лигнина, экстрактивных веществ и веществ, растворимых в холодной и горячей воде.

2.4.1 Определение содержания целлюлозы

Оценка содержания лигнина и целлюлозы в древесном сырье дает информацию о потенциально ожидаемом выходе технической целлюлозы и необходимой интенсивности реализации процессов делигнификации. Целлюлоза представляет собой полисахарид и является основным компонентом растительных клеток. В клеточной стенке растений целлюлоза имеет волокнистый вид, белый цвет и имеет удельный вес $1,54 \text{ г/см}^3$. Лигнин также является одним из компонентов древесины, его процентное содержание варьируется от 17 до 32 %, и его процентное содержание варьируется в зависимости от породы древесины, возраста и высоты, поскольку его концентрация увеличивается с возрастом растения [93].

Определение содержания целлюлозы проводили азотно-спиртовым методом. Навеска воздушно-сухих опилок (около 1 грамма), помещена в коническую колбу емкостью 250 мл и добавлено 25 мл азотно-спиртовой смеси, состоящей из одного объема концентрированной HNO_3 (плотность $1,4 \text{ г/см}^3$) и четыре объема этанола. При подключенном к колбе обратном холодильнике опилки кипятили с азотно-спиртовой смесью на водяной бане в течение 1 часа. После окончания кипячения дали опилкам осесть и осторожно слили жидкость через высушенный до постоянной массы стеклянный пористый фильтр. Попавшие на фильтр опилки смыли обратно в колбу, используя 25 мл свежей азотно-спиртовой смеси, и снова кипятили с обратным холодильником в течение 1 часа. Такую обработку провели 3-4 раза.

Затем целлюлозу фильтровали методом вакуумной фильтрации с использованием колбы Бунзена и фильтр промывали 10 мл свежей азотно-спиртовой смесью. Полностью профильтрованную азотно-спиртовую смесь сливали в ту же емкость с крышкой. Затем к целлюлозе в стакане добавляли горячую воду, перемешивали и все содержимое стакана количественно переносили на фильтр. Далее целлюлозу промывали горячей водой. Затем целлюлозу полностью сушили на фильтре вакуум. Целлюлозный фильтр сушили сушильном шкафу при температуре $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ до постоянной массы [57].

Массовую долю препарата целлюлозы рассчитывали в процентах по отношению к абсолютно сухой древесине по формуле (2):

$$X = \frac{m_1 - m}{q} \cdot 100 \quad (2)$$

где m_1 – масса а. с. фильтра с целлюлозой, г;
 m – масса пустого а. с. фильтра, г;
 q – масса навески а. с. древесины, г.

2.4.2 Определение содержания веществ, экстрагируемых холодной и горячей водой

К водозэкстрагируемым веществам древесины относятся дубильные вещества, крахмал, камедь, пектин и растворимые соли. Общее количество водорастворимых веществ определяли по разнице массы полностью сухих первичных опилок и полностью сухого нелетучего остатка, полученного после экстракции.

Использовался метод растворения веществ как в холодной, так и в горячей воде: Использование холодной воды путем длительного воздействия холодной воды, разделение раствора и определение количества растворенных веществ по потере массы древесных остатков, 2 г опилок помещали в стакан емкостью 500 мл и заливали 300 мл дистиллированной воды. Смесь оставляли на 48 часов, периодически помешивая, рисунок 2.7.



Рисунок 2.7 – Экстракция с холодной водой

Затем содержимое стакана фильтровали через пористый стеклянный фильтр, промывали холодной водой до тех пор, пока она не станет бесцветной. Затем высушили фильтр в сушильном шкафу при температуре 103 ± 2 °С до постоянной массы.

Содержание в древесине веществ, экстрагируемых холодной водой (%) рассчитывали по формуле (3) [57]:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (3)$$

где m – масса навески а.с. древесины до экстракции, г;

m_1 – масса навески а.с. древесины после экстракции, г.

Что касается использования горячей воды, то этот метод основан на извлечении из древесины водорастворимых веществ путем нагревания водой, разделения раствора и определения количества растворенных веществ по потере массы древесных остатков. В колбу вместимостью 250 мл взяли навеску около 2 г опилок с точностью до 0,0001 г, залили 100 мл дистиллированной воды, соединили колбу с обратным холодильником и погрузили в кипящую водяную баню, рисунок 2.8. По истечении трех часов опилки отфильтровали на стеклянном фильтре с пористостью 160, заранее доведенном до постоянной массы. Так же на фильтре опилки промыли горячей дистиллированной водой до бесцветных промывных вод и высушили в сушильном шкафу при температуре 103 ± 2 °С до постоянной массы [57].



Рисунок 2.8 – Экстракция с горячей водой

Содержание экстрагируемых горячей водой материалов в древесине (%) рассчитывали по формуле (3).

2.4.3 Определение содержания веществ, экстрагируемых органическими растворителями

Вещества, извлеченные из древесины органическими растворителями, включают жирные кислоты, жиры, терпены, воски и смолы. Метод определения содержания экстрагируемых органических растворителей основан на многократной экстракции и упаривании полученного экстракта с последующей сушкой и взвешиванием нелетучего остатка. Процесс экстракции проводился в аппарате Сокслета, рисунок 2.9.



Рисунок 2.9 – Аппарат Сокслета

Экстракцию проводили в аппарате Сокслета по методике [28]. В хлопковом мешочке взвесили около 5 г опилок с точностью до 0,0002 г, после чего мешочек поместили в экстрактор. В колбу налили на 2/3 объема растворитель, собрали аппарат, пустили воду в холодильник и начали нагрев колбы. Нагрев регулировали таким образом, чтобы растворитель сливался из экстрактора каждые 8–10 минут. Экстракцию проводили в течение 3 часов, после завершения экстракции, мешочек с опилками извлекли из экстрактора и опилки высушивали на фильтровальной бумаге, для дальнейшего использования при определении содержания лигнина. Установку собрали обратно и отогнали растворитель, после чего колбу со смолистыми веществами поместили в сушильный шкаф и довели до постоянной массы. Содержание в древесине веществ, экстрагируемых органическими растворителями, определили по формуле, %: (4):

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100, \quad (4)$$

где m – масса навески а. с. древесины до экстракции, г;

m_1 – масса колбочки с а. с. смолистыми веществами, г;

m_2 – масса пустой а. с. колбочки, г.

2.4.4 Определение содержания лигнина

Для определения содержания лигнина использовали метод определения сернокислотного лигнина в модификации Ф.П. Комарова. Взяли навеску около 1 г воздушно-сухих обессмоленных опилок с точностью до 0,0001 г.

Навеску поместили в коническую колбу, вместимостью 250 мл с резиновой пробкой, добавили 15 мл 72 % H_2SO_4 и выдерживали в термостате при температуре 24 - 25°C в течение 2,5 ч при периодическом и осторожном помешивании во избежание

образования комков. Затем смесь лигнина с кислотой разбавили 200 мл дистиллированной воды и кипятили с обратным холодильником на электрической плитке при слабом кипении в течение 1 ч. После окончания кипячения, колбу закрыли резиновой пробкой и убрали в шкаф, для того чтобы частицы лигнина укрупнились и осели на дно колбы. Фильтрование проводили на следующий день, на стеклянном пористом фильтре, предварительно высушенном до постоянной массы. Отфильтровав, осадок промыли горячей водой, после чего фильтр с лигнином высушили в сушильном шкафу при температуре $103 \pm 2^\circ\text{C}$ до постоянной массы и взвесили [56, 58].

Массовую долю лигнина в процентах рассчитали по отношению к абсолютно сухой обессмоленной древесине по формуле (5):

$$X = \frac{(m_1 - m)(100 - z)}{m_2} \quad (5)$$

где, m_1 – масса фильтра с лигнином, г;

m – масса пустого фильтра, г;

z – содержание экстрактивных веществ, %;

m_2 – масса навески обессмоленной а. с. древесины, г.

Определение лигнина в целлюлозе проводили так же, как указано в вышеприведенной методике для древесины [56, 58].

2.5 Проведение лабораторных варок целлюлозы

Сульфатную варку в лабораторных условиях проводили с помощью автоклавной системы CAS 420 для варки целлюлозы, рисунок 2.10. Система управляется через ПК посредством HMI программы, вид диалогового окна которой представлен на рисунке 2.11.



Рисунок 2.10 – Автоклавная система CAS 420

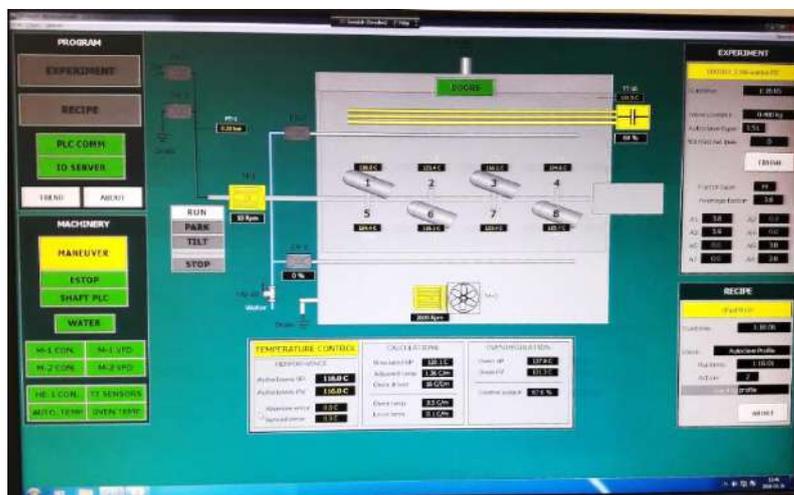


Рисунок 2.11 – HMI программа

В автоклав вместимостью 1,5 л поместили навеску воздушно-сухой щепы, варочный раствор и дистиллированную воду. Объемы воды и раствора рассчитали согласно выбранным условиям варки (гидромодуль, количество навески). Варку проводили несколько раз, по режимам, представленным в таблице 2.1. Условия варки для щепы из ствола и из ветвей были одинаковыми. Основное отличие режимов варок, заключается в разном расходе активной щелочи и гидромодуле варки.

Таблица 2.1 – Режим варок

Параметр	Варка 1	Варка 2	Варка 3
Расход активной щелочи на варку, в ед. Na ₂ O, % к а.с.древесине	16	15	14,5
Гидромодуль	3	4	4
Общая продолжительность варки, мин	135	135	135

По окончании варки, содержимое автоклава пропустили через сетку и по средствам отжима отделили черный щелок, далее целлюлозу подвергли промывке и сортированию, тем самым отделив непровар. В черном щелоке определили содержание активной щелочи, содержание сухих веществ и сульфидность, а в целлюлозе – содержание остаточного лигнина (число Каппа) и выход целлюлозы после варки [48].

На рисунке 2.12 представлена фотография целлюлозы на сите при отделении черного щелока (рисунок 2.13), процесс промывки целлюлозы представлен на рисунке 2.14.

На рисунке 2.14 представлено отделенного черного щелока.



Рисунок 2.12 – Отжим черного щелока



Рисунок 2.13 – Черный щелок после варки

*a**б*

Рисунок 2.14 – Промывка целлюлозы: *a* – щепа из автоклава на первом (крупном) сите; *б* – промывка на втором (мелком) сите

2.6 Анализ целлюлозы и щелоков

2.6.1 Определение выхода целлюлозы

Выход целлюлозы рассчитали по формуле (6):

$$B = ((M_1 K_1) / (M_2 K_2)) \cdot 100, \quad (6)$$

где M_1 , M_2 – масса целлюлозы, полученной после варки, и щепы, взятой на варку;
 K_1 , K_2 – коэффициенты сухости целлюлозы, полученной после варки, и щепы, взятой на варку [13].

2.6.2 Определение степени делигнификации целлюлозы (число Каппа)

Определение степени делигнификации целлюлозы перманганатным методом проводилось в соответствии с ГОСТ 10070-74 (ИСО 302-81). Фотографии процесса представлены на рисунке 2.15.



а



б

Рисунок 2.15 – Определение степени делигнификации целлюлозы:
а – проба до анализа; б – проба после анализа

2.6.3 Анализ отработанного черного щелока

2.6.3.1 Определение содержания активной щелочи в черном щелоке:

В мерную колбу вместимостью 50 мл поместили 10 мл воды, внесли пипеткой 10 мл щелока, 10 мл 0,1 М раствора хлористого бария, перемешали и дали смеси отстояться. Затем каплю осветленной жидкости нанесли на часовое стекло и добавили каплю серной кислоты. Если жидкость при этом не помутнела, то в мерную колбу добавили еще 2-4 мл 0,1 М раствора хлористого бария и вновь проверили после отстаивания полноту осаждения.

После достижения избытка хлористого бария содержимое колбы довели дистиллированной водой до метки, хорошо перемешали и профильтровали через плотный фильтр.

В стакан вместимостью 100-150 мл перенесли 10 мл фильтрата, добавили дистиллированную воду, свободную от CO_2 , и 1 мл формальдегида, оттитровали потенциметрически 0,1н HCl до $\text{pH}=3,5$.

По результатам титрования на график нанесли кривые потенциметрического титрования и определили объем соляной кислоты, пошедшей на титрование до $\text{pH}=8,5$ (V_1). Содержание активной щелочи (г/л) определили по формуле (7) [48].

$$\text{АЩ} = \frac{0,0031(V_1 - V_2) \cdot 1000}{2} \quad (7)$$

На рисунке 2.16 представлены фотографии этапов проведения анализа.



Рисунок 2.16 – Определение содержания активной щелочи в черном шлаке

2.6.3.2 Определение содержания сухих веществ в черном шлаке

Из плотной фильтровальной бумаги (баритовый фильтр) вырезали круги и подсушили в сушильном шкафу 30 минут, затем охладили в эксикаторе 10 минут и взвесили. После этого, на полученный фильтр медленно спустили из пипетки 1 мл черного шлака, равномерно распределяя капли по бумаге. Фильтр поместили в сушильный шкаф и довели до постоянной массы [48].

Содержание сухих веществ в черном шлаке (г/л) рассчитали по формуле (8):

$$CB = \frac{m_1 - m_2}{V} \cdot 1000 \quad (8)$$

где m_1 – масса а. с. фильтровальной бумаги со шлаком, г;

m_2 – масса а. с. фильтровальной бумаги, г;

V – объем шлака, мл.

Фотографии высушенных до постоянной массы бумажных фильтров с черным шлаком, представлены на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Бумажные фильтры, при определении содержания сухих веществ в черном шлаке

2.7 Изготовление образцов для испытаний

Из полученной после варки целлюлозы были изготовлены лабораторные образцы отливок для определения бумагообразующих и физико-механических характеристик образцов полученного волокнистого полуфабриката.

2.7.1 Лабораторный размол целлюлозы

Размол образцов до степени помола 30 °ШР проводился в лабораторной мельнице Йокро центробежного действия при концентрации массы 6 % (16 г. абсолютно сухой целлюлозы), рисунок 2.18.



Рисунок 2.18 – Лабораторная мельница Йокро: *а* – общий вид мельницы; *б* – вращающийся горизонтальный стол с шестью ячейками для размольных стаканов; *в* – размольная единица

2.7.2 Определение степени помола целлюлозы

Степень помола массы определяли на аппарате системы Шоппер-Риглер, рисунок 2.19. Верхняя, снимающаяся часть аппарата представляет собой цилиндр, дно которого изготовлено из одинарной миткалевой сетки № 40. Сетчатое дно цилиндра закрывается клапаном, края которого обтянуты уплотняющим резиновым кольцом. Неподвижная нижняя часть аппарата выполнена в виде конуса, укрепленного на устойчивом штативе, и имеет два отверстия: центральное узкое (диаметр 3,1 мм) и боковое широкое (диаметр 12,5 мм). Отверстия расположены так, что вода, стекающая через слой массы и сетку из

верхнего цилиндра, может уходить через боковое отверстие лишь тогда, когда скорость стекания ее больше, чем пропускная способность центрального отверстия. Перед испытанием дно цилиндра закрывается коническим клапаном, который опускается в цилиндр. Подъем клапана во время испытания производится нажатием кнопки на панели управления.



Рисунок 2.19 – Аппарат системы Шоппер-Риглер

Для определения степени помола взяли навеску 2 г абсолютно сухого волокна, поместили в мерный цилиндр и затем, разбавили водой до 1 л с температурой 20 °С. Хорошо перемешав массу путем переливания из одной кружки в другую, ее вылили в цилиндр аппарата, сетка которого закрыта клапаном. Затем подняли клапан. Объем воды в боковом цилиндре замерили с точностью до 10 мл и определили степень помола массы по формуле, °ШР [43].

$$\text{СП} = (1000 - V) / 10 \quad (9)$$

где V – количество воды, которое вытекло через боковое отверстие, мл.

2.7.3 Получение смесей целлюлозы из ветвей осины и макулатуры

Для получения целлюлозных волокон из макулатуры МС-5Б, листы макулатуры в виде флутинга ООО «Сухонский КБК», разрывали на мелкие кусочки, и замачивали в горячей воде на 40 минут, рисунок 2.20, затем дезинтегрировали в течение 8 минут.

Использовался дезинтегратор с акриловым стаканом (РТА, модель № 95568, соответствует стандартам: ISO 5263-1, TAPPI T 205, SCAN C18/M2, ГОСТ 14363.4), рисунок 2.21.



Рисунок 2.20 – Замачивание макулатуры МС-5Б в воде



Рисунок 2.21 – Дезинтегрирование макулатуры для получения волокна

Полученная суспензия была отфильтрована на воронке Бюхнера через полотняный фильтр, и отжата до концентрации 6 %, контроль выполнялся по массе.

Аналогично подготавливали целлюлозу из ветвей осины.

Смеси целлюлозы из ветвей осины и макулатуры в соотношении 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 100:0 %, составляли в размольном стакане мельницы Йокро. В таблице 2.2 указано количество целлюлозной массы при концентрации 6 %, используемой для получения смесей в требуемых пропорциях.

Таблице 2.2 – Количество волокна, используемого для получения смесей в требуемых пропорциях

Соотношение смешивания	Масса волокна в смеси (г)	
	из ветвей	из макулатуры
Целлюлоза из ветвей : макулатура		
Макулатура 100%	0	300
10:90	30	270
20:80	60	240
30:70	90	210
40:60	120	180
50:50	150	150
Ветви 100 %	300	0

Затем заданную навеску, суммарно содержащую 16 г а.с. волокна, помещали в размольный стакан, равномерно распределяя по всему объему. Размол веди до степени помола 30 °ШР.

2.7.4 Изготовление лабораторных отливок

Лабораторные образцы из предварительно подготовленной бумажной массы изготовили на листоотливном аппарате Estanit системы Рапид-Кеттен, рисунок 2.22.



Рисунок 2.22 – Листоотливной аппарат системы Рапид-Кеттен

Приготовленную бумажную массу размешали, затем отобрали порцию массы предварительно рассчитанного объема, необходимую для получения отливок с заданной массой 1 м². Листоотливную сетку смочили водой и наложили на опорную решетку формирующей камеры, ребра которой должны быть расположены параллельно оси шарнира. Формующую камеру закрыли и прижали к фланцу отсасывающей (вакуумной) камеры ручкой-зажимом.

Управление листоотливным аппаратом ведется путем поворачивания рычага на панели, по часовой стрелке. Поворот рычага на одно деление приводит к переключению режима отлива.

Формующую камеру прибора заполнили водой до отметки примерно 5 л и залили в нее подготовленную волокнистую суспензию, после чего довели уровень жидкости в формирующей камере до 8 л. Затем режим переключили на перемешивание и выждав примерно 30-60 секунд, режим вновь переключили, спуская воду из формирующей камеры. После того как уровень суспензии в формирующей камере снизился до отметки 2 л, повернули рычаг на панели, включая тем самым отсос. Затем, повернули рычаг, чтобы

слить воду из отсасывающей камеры и выключить прибор. После этого освободили ручку-замок и откинули корпус формирующей камеры «от себя».

На мокрую отливку наложили картонный лист массой 200 г/м^2 и по картону прокатали под собственной массой валик, обтянутый фетром. Сняли отливку с сетки, накрыли листом тонкой гладкой бумаги с другой стороны и положили в сушильную камеру на 5 минут. По истечении заданного времени, отливку извлекли из сушильной камеры, отделили от картона и покровной бумаги и взвесили на технических весах. При несоответствии отливки заданной массе, вводили поправку к объему отмеряемой волокнистой суспензии.

2.8 Определение бумагообразующих свойств целлюлозы

2.8.1 Микроскопический анализ целлюлозы

Для приготовления препарата взяли небольшой кусочек влажной пробы целлюлозы, перенесли его на предметное стекло, увлажнили дистиллированной водой и тщательно разделили препарировавшими иглами на отдельные волокна. Затем препарат покрыли чистым покровным стеклом, подводя его сбоку, чтобы избежать попадания пузырьков воздуха. Избыток жидкости, выступающей из-под стекла, удалили фильтровальной бумагой. Приготовленный препарат просмотрели на свет, обращая внимание на равномерность распределения волокон и на отсутствие пузырьков воздуха, затрудняющих рассмотрение препарата в микроскоп. Убедившись, что препарат приготовлен правильно, поместили его на предметный столик микроскопа для исследования [43]. Для микроскопических исследований полученной целлюлозы был использован исследовательский моторизованный микроскоп высокого разрешения «ImagerZ2m Carl Zeiss».

2.8.2 Определение структурно-морфологических характеристик волокна на анализаторе Fiber Tester L&W

Прибор Fiber Tester L&W позволяет проводить исследование водных суспензий целлюлозных волокон в автоматическом режиме. Испытательный комплекс совмещен с ПЭВМ, который управляет тестированием образца, обрабатывает данные и генерирует отчет по показаниям. Фотография анализатора представлена на рисунке 2.23.

всей измерительной системы. Зазор между дисками измерительной ячейки на время промывки увеличивается. После этого измерительный столик поворачивается на один шаг для помещения следующего образца в положение для теста.

С помощью анализатора Fiber Tester оценивают характеристики волокон:

- количество измеренных волокон
- средняя ширина волокон в образце, мкм;
- средний фактор формы волокон в образце;
- доля волокон в классах длины, мм: 0,2-0,5; 0,5-1,5; 1,5-3,0; 3,0-4,5; 4,5-7,5;
- доля мелочи в образце;
- средняя грубость волокон, мг;
- средний угол излома;
- среднее число всех изломов на 1 мм длины волокна;
- число больших изломов (больше 60°) на 1 мм;
- среднее число всех изломов на одно волокно;
- средняя длина одного сегмента, мм.

2.9 Определение физико-механических характеристик образцов целлюлозы

Для получения воспроизводимых результатов перед испытанием образцы бумаги подвергли кондиционированию в стандартных условиях, так как показатели бумаги сильно меняются в зависимости от ее равновесной влажности. Согласно ГОСТ 13523–78 кондиционирование и последующее испытание образцов должны проводиться в режиме относительная влажность воздуха $(50 \pm 2) \%$, температура $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

В помещении, где проводят испытания бумаги, установлен кондиционер для автоматического поддержания заданных параметров воздуха. Контроль относительной влажности воздуха ведется с помощью гигрометров или психрометров. Время кондиционирования образцов должно составлять не менее 2 часов.

2.9.1 Определение стандартных характеристик лабораторных отливок

Определение массы 1 м^2 лабораторных образцов проводится согласно ГОСТ 13199–88.

Определение толщины и плотности лабораторных образцов проводится в соответствии с ГОСТ 27015–86 с использованием микрометра SE 250 Lorentzen&Wetpre, рисунок 2.25. Метод заключается в определении толщины бумаги при давлении подвижной пятки измерительного прибора 0,1 МПа на площади контакта с измеряемой поверхностью 2 см². Была измерена толщина каждого образца: в пяти точках на отливке и в трех точках на вырезанных образцах, по которым рассчитано среднее значение в микрометрах.



Рисунок 2.25 – Цифровой микрометр Lorentzen & Wetter SE 250

2.9.2 Определение сопротивления раздиранию

Определение сопротивления раздиранию по ГОСТ 13525.3–78 выполнено на приборе Elmendorf 09ED, рисунок 2.26. Одновременно испытали несколько образцов, каждый из которых вырезали специальным ножом. Размер образцов $(45 \pm 1) \times (63 \pm 0,1)$ мм. Меньшая сторона образцов, предназначенных для испытаний в машинном направлении, должна совпадать с поперечным направлением, и наоборот.



Рисунок 2.26 – Прибор для определения сопротивления раздиранию Elmendorf 09ED

Образцы вставили в зажимы прибора, после чего, для замыкания фиксаторов нажали кнопку Clamp на панели прибора. Нажатием на рычаг ножа, нанесли надрез на испытуемый образец. Нажав кнопку Pend на панели прибора, освободили маятник, и дав ему качнуться 3-4 раза, остановили его и закрепили нажатием кнопки Clamp. Записали результат испытания, отображенный на экране прибора.

2.9.3 Определение сопротивления продавливанию (ГОСТ 13525.8–86)

Сопротивление продавливанию является одним из основных показателей прочности многих видов бумаг, хотя и является чисто эмпирическим критерием, зависящим как от сопротивления разрыву, так и от растяжимости.

Определение сопротивления продавливанию поведено согласно ГОСТ 13525.8–86 на приборе для определения сопротивления продавливанию SE 180/181 L&W. Различают абсолютное сопротивление продавливанию, относительное сопротивление продавливанию – приведенное к массе 1 м² бумаги 100 г и индекс продавливания – абсолютное сопротивление продавливанию отнесенное к массе 1 м² бумаги.

Метод заключается в том, что на зажатый по окружности образец бумаги воздействует постепенно и равномерно нарастающее гидростатическое давление, передаваемое через резиновую диафрагму, которое фиксируется в момент разрушения образца. Сопротивление продавливанию равно максимальному давлению, которое выдерживает непосредственно перед разрушением образец бумаги.



Рисунок 2.27 – Прибор для определения сопротивления продавливанию SE 180 L&W

2.9.4 Определение сопротивления сжатию на коротком расстоянии по методу SCT

Для определения сопротивления сжатию на коротком расстоянии 0,7 мм (SCT) по ГОСТ Р ИСО 9895-2013 используют прибор модели Frank PTI F18510. Зажимы прибора представлены на рисунке 2.28.

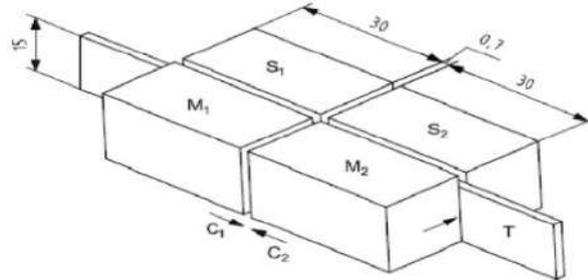


Рисунок 2.28 – Зажимы прибора. C_1 и C_2 – зажимы; M_1 и M_2 – подвижные губки; между сжимающими поверхностями, S_1 и S_2 – неподвижные губки; Т – образец

Сопротивление сжатию по методу SCT представляет собой максимальное усилие, которое выдерживает образец бумаги или картона до разрыва под действием сжимающего усилия, приложенного параллельно плоскости образца, помещенного на коротком расстоянии деленное на ширину образца. За результат принимают среднее арифметическое из 10 параллельных испытаний образцов.

2.9.5 Определение сопротивления разрыву (ГОСТ ИСО 1924-3)

Для характеристики сопротивления бумаги разрыву пользуются понятием разрывной длины. Разрывная длина – это длина полоски испытуемой бумаги, которая, будучи подвешена за один конец, оборвалась бы под собственным весом [32].

Для определения сопротивления разрыву использовали испытательную машину «ТЕСТСИСТЕМА 101», рисунок 2.29. Перед испытанием были нарезаны образцы размером 15×170 мм и измерена толщина каждого образца.

После включения разрывной машины, на подсоединенной к машине ЭВМ запустили программу «Komplex», создали файл для записи данных, и ввели исходные данные образца. На панели управления разрывной машины задали все необходимые параметры для испытания. Вид экрана при работе программы «КОМПЛЕКС» приведен на рисунке 2.30.

Образец плотно закрепили в зажимах разрывной машины, на панели прибора нажали кнопку «ИСП», для начала испытания. После окончания испытания убедились,

что испытание прошло корректно, а именно, произошло разделение испытуемого образца на части, линия разрыва расположена на расстоянии более 10 мм от зажимов. В случае если необходимые условия не выполнены, заменили образец и повторили испытание. Если же все прошло удовлетворительно, то на ЭВМ, в окне программы «КОМПЛЕКС», нажали кнопку «ИСПЫТАТЬ» и передали данные с разрывной машины на ЭВМ.



Рисунок 2.29 – Испытательная машина «ТЕСТСИСТЕМА 101» с ЭВМ

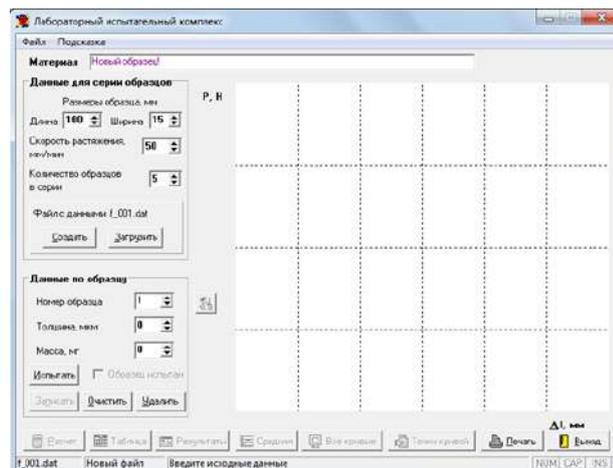


Рисунок 2.30 – Вид экрана при работе программы «КОМПЛЕКС»

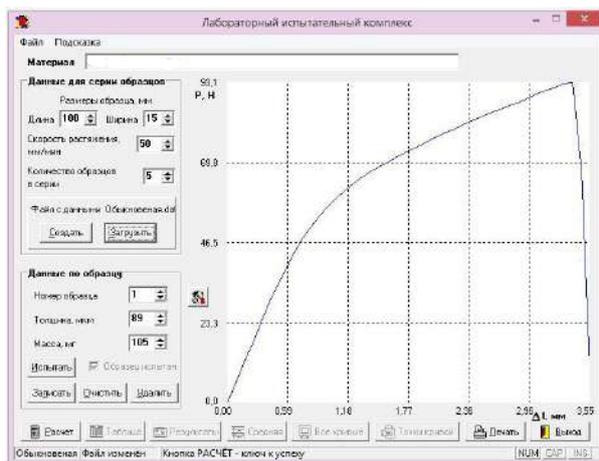
Ввели данные по толщине образца и по массе образца, участвующей в испытании. После занесения всех данных, нажали кнопку «ОК» в главном экране программы на ЭВМ, затем, нажатием кнопки «ЗАПИСАТЬ», сохранили данные. Аналогично провели испытание остальных образцов. Для обработки данных по всем образцам, нажали кнопку «РАСЧЕТ», в главном экране программы.

2.9.6 Получение и математическая обработка кривой зависимости «напряжение-деформация» при растяжении

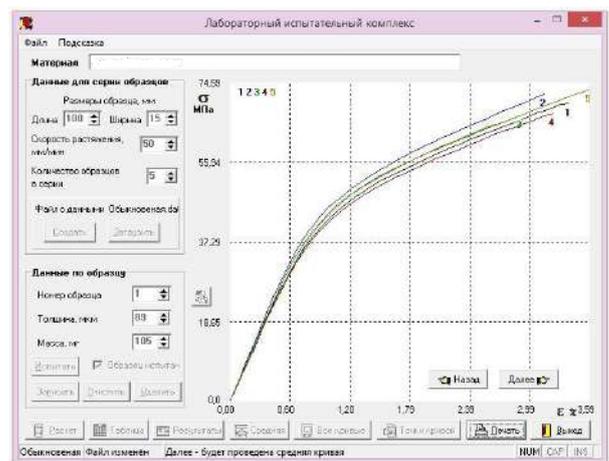
Испытав образцы на сопротивление разрыву, необходимо провести корректную обработку данных. Каждый испытуемый образец характеризуется длиной (l), шириной

(b) и усредненной по измерениям в нескольких точках толщиной (δ). После проведения испытания каждого образца с машины «ТЕСТСИСТЕМА 101», через интерфейс, передаётся информация о данных образца и результатах испытания в порт ЭВМ. Принятые данные - параметры образца, условия испытаний, а также массив до 1000 точек, снятых с интервалом 20 мс (сила, Н - перемещение, мм), сохраняются в файле ЭВМ. Данные выводятся в виде графика, представленного на рисунке (2.31 а). Есть возможность просмотра: кривых для каждого из испытанных параллельных образцов; всех кривых на одном графике, рисунок (2.31 б), кнопка «РАСЧЕТ»; проведения исключения выпадающих точек (кнопки «ОЧИСТИТЬ» и «УДАЛИТЬ») и проведения повторных испытаний.

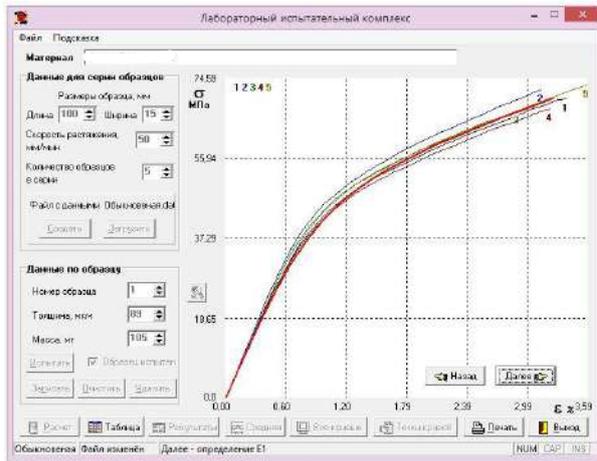
При выполнении математической обработки на ПЭВМ экспериментальных кривых нагрузка-удлинение, полученных при параллельных испытаниях, производится: сглаживание исходных кривых методом скользящей средней; построение средней кривой (рисунок 2.31 в); автоматическое, с возможностью ручной корректировки, выделение начального и конечного прямолинейных участков; вычисление модулей упругости начального (E_1) и в области предразрушения (E_2); а также определение характерных точек зависимости напряжение-деформация: предел упругости (1); эффективная точка (Э); точка начала пластических деформаций (П); точка начала дополнительной вытяжки (В); точка разрушения образца (Р), рисунок (2.31 в).



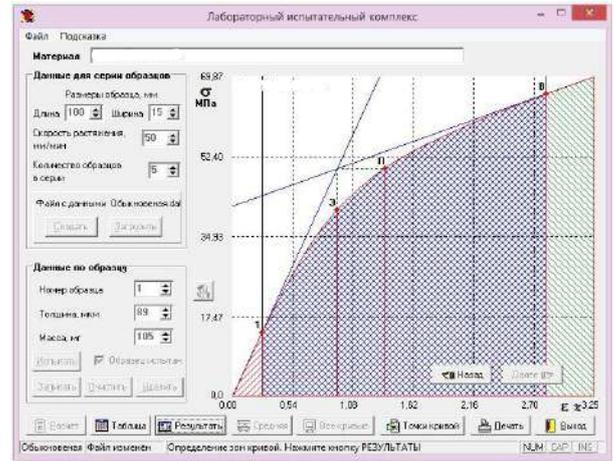
а



б



в



г

Рисунок 2.31 – Этапы обработки данных в программе «Комплекс»:

- а* – графическое представление результатов единичного испытания на растяжение;
- б* – экспериментальные кривые зависимости « σ – ϵ » для всех параллельных образцов;
- в* – построение средней кривой « σ – ϵ »; *г* – результат математической обработки кривой зависимости « σ – ϵ »

Для начального и конечного прямолинейных участков диаграммы, определяются коэффициенты уравнений прямых. Абсциссу эффективной точки (ϵ_3) и ординату точки начала пластических деформаций ($\sigma_{п}$) определяют совместным решением линейных уравнений для первого и третьего участков. Эффективное напряжение σ_3 и деформация в точке начала пластичности ($\epsilon_{п}$) вычисляются интерполяцией точек сглаженной экспериментальной кривой. Текущие модули E_i вычисляются как первая производная для кривой в точке i . Работа A_i вычисляется интегрированием полученной зависимости « P – Δl » с применением численных методов.

Результаты расчетов представляются в виде таблиц и графиков и выводятся на экран монитора с предоставлением возможности вывода на печать в порядке, определяемом пользователем. Предоставляется возможность распечатки результатов расчетов на принтере и вывода их текстовый файл ANSI. При нажатии кнопки «РЕЗУЛЬТАТЫ» выводится таблица, в которой приводятся величины деформационных и прочностных характеристик в каждой характерной точке кривой зависимости « σ – ϵ »; величины этих же характеристик в процентах от разрушающих значений; и относительный вклад упругой, замедленно-упругой и пластической составляющих в общую деформацию и работу разрушения. Во второй таблице, выводимой при нажатии кнопки «ТОЧКИ КРИВОЙ», приводятся данные, отражающие кинетику изменения

прочностных и деформационных характеристик процессе испытания через каждые 0,05 мм удлинения. Формат таблицы позволяет использовать данные из нее в табличном процессоре Excel для сопоставления кривых зависимости « σ – ϵ » разных образцов [43].

2.9.7 Поверхностная впитываемость воды при одностороннем смачивании (Кобб₆₀)

Расчетная масса воды, поглощенная поверхностью бумаги или картона площадью 1 м² за установленное время x при определенных условиях.

Измерение производится на приборе L&W SE 146, рисунок 2.32.



Рисунок 2.32 – Прибор для испытания влагопоглощения L&W SE 146 по Коббу

Образцы были изготовлены квадратной формы размерами 125×125 мм. Определяется масса сухого образца, затем образец помещали на плоское основание испытываемой стороной, обращенной к воде. Цилиндр помещают шлифованным концом на испытываемый образец и плотно фиксируют, чтобы исключить просачивание воды между цилиндром и испытываемым образцом.

В чашу прибора наливают 100 мл воды и включают секундомер продолжительность теста составила 60 секунд, вода была слита через 45 секунд.

Продолжительность испытания определяется как время между моментом контакта воды с испытываемым образцом и началом удаления избытка воды с помощью промокательной бумаги [18].

Через 60 секунд от начала теста накрываем испытываемый образец еще одним листом промокательной бумаги и удаляем лишнюю воду с помощью прижимного валика, прокатывая его дважды (вперед и назад), не применяя дополнительной силы.

После взвешивания сырого образца рассчитывали величину $K_{обб60}$ по уравнению (10):

$$K_{обб60} = M_B - M_c \times 100 \quad (10)$$

где M_B – масса влажного образца,

M_c – масса сухого образца.

2.9.8 Определение межволоконных сил связи

Под этим свойством подразумевают когезионные силы между волокнами, подвергнутыми растяжению в плоскости листа бумаги [20, 60]. Величина межволоконных сил связи определяется собственной когезионной способностью целлюлозы и площадью контакта между волокнами [26, 27]. Количество связей между волокнами определяется общей длиной волокнистого материала в листе, шириной и гибкостью волокон и практически не зависит от длины отдельных волокон.

Образцы готовили двухслойными, размером 15×50 мм. Слои разделяли, а прочность соединения проверяли на растяжение на расстоянии 2,5 мм. На рисунке 2.33 показан тест на межволоконные силы связи.

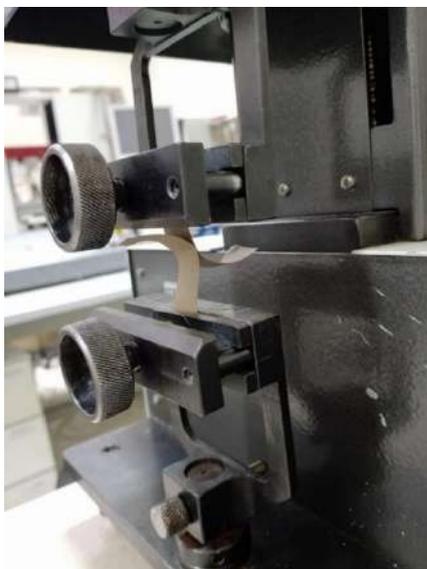


Рисунок 2.33 – Тест межволоконные силы связи

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Получение сульфатным способом полуфабриката из древесины ветвей осины как альтернативы целлюлозы из стволовой части спелой древесины

3.1.1 Микроскопический анализ древесины ветвей и ствола осины обыкновенной

Древесина лиственных пород по сравнению с древесиной хвойных имеет более сложное строение. Основные анатомические элементы древесины лиственных пород образованы паренхимными и прозенхимными клетками.

Механическую функцию выполняют прозенхимные клетки, представленные волокнами либриформа, объем которых составляет приблизительно 60...70 %, но может колебаться в пределах от 25 до 75 %.

Волокна либриформа представляют из себя достаточно вытянутые по длине клетки с заостренными концами и толстыми межклеточными стенками. Длина этих волокон примерно в два раза меньше волокон хвойных пород, трахеид и колеблется от 0,3 до 1,5 мм. Пор на стенках немного, они узкие, щелевидные.

Водопроводящие ткани, состоящие из сосудов, занимают 20 – 30 % от объема древесины. Сосуды, представленные прозенхимными клетками, представляют собой трубки длиной около 20 мм с тонкими стенками. Сосуды, в свою очередь, состоят из коротких, широких клеток.

При исследовании древесины был использован Микроскоп Imager Z2m Carl Zeiss. Полученные в результате исследования микрофотографии срезов древесины осины представлены на рисунке 3.1.

На радиальном и тангенциальном срезах отчетливо просматриваются волокна либриформа; в стенках которых имеются мелкие щелевидные косо расположенные поры. На радиальном срезе, кроме того, отчетливо видны сосуды и сосудистые трахеиды. На поперечном срезе можно обнаружить границу годичного слоя по нескольким рядам сплюснутых волокон либриформа, которая выражена слабо, и сосуды, которые выделяются более крупными отверстиями. На тангенциальном срезе граница годичного слоя не наблюдается. На микрофотографиях препаратов срезов ствола заметны включения экстрактивных веществ.

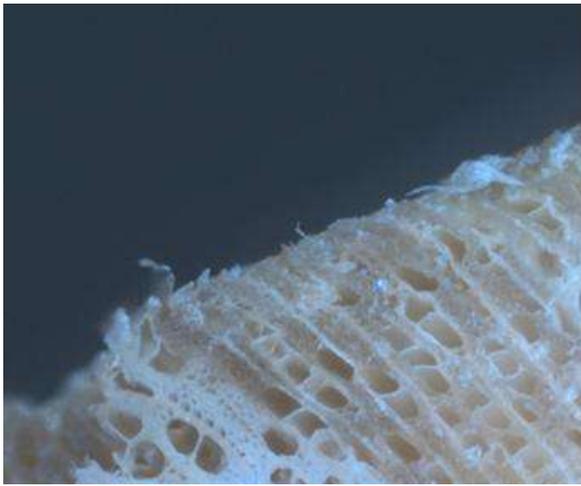
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 3.1 – Микрофотографии древесины осины: *a, в, д* – древесина ствола; *б, г, е* – древесина ветвей; *a, б,* – поперечный срез; *в, г* – радиальный срез; *д, е* – тангенциальный срез

3.1.2 Физические свойства исследованных образцов древесины

Результаты определения физических свойств древесины ветвей и ствола осины представлены в таблице 3.1. Измерения проведены (рис. 3.2) после хранения образцов в комнатных условиях в течение 2 месяцев.

Кроме естественных различий в поперечных размерах, количестве годовых колец на срезе и толщине годовых колец, плотность древесины из ветвей (608 кг/м^3) оказалась значительно выше, чем у древесины из ствола (501 кг/м^3).

Таблица 3.1 – Физические свойства древесины ветвей и ствола осины

Параметр	Вид сырья	
	Ветви	Ствол
		
Средний диаметр, мм	$20,6 \pm 1$	166 ± 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, кг/м^3	608	501
Относительная влажность щепы (после хранения), %	8,7	13,1



a



б

Рисунок 3.2 – Измерение диаметра образцов осины: *a* – из ствола; *б* – из ветви

Щепа из ветвей осины в сравнении со щепой, полученной из ствола имеет меньшую влажность (7,8 против 13,1 %), хотя условия хранения у них были одинаковые. Таким образом, свойства образцов влияют на взаимодействие с влагой, находящейся в воздухе, Влажность древесины влияет на эффективность делигнификации, поэтому для получения высококачественной целлюлозы важно поддерживать оптимальную влажность

древесины, так как при избыточной влажности древесины могут возникнуть проблемы с равномерным распределением химикатов при варке, что может повлиять на качество конечного продукта [11].

Результаты измерения плотности древесины из ствола осины (501 кг/м^3) и из ветвей (608 кг/м^3) могли быть следствием нескольких факторов, в том числе состав волокон, влажность и химический состав, которые учитываются. Плотность древесины является важным фактором, определяющим качество и свойства производимой целлюлозы.

Отмеченные различия следует учитывать при подготовке щепы к варке для получения целлюлозы. Разная плотность и влажность щепы должны быть учтены при определении условий пропитки щепы перед варкой, и определении режимов сульфатной варки [11].

3.1.3 Химические свойства исследованных образцов древесины

Данные по компонентному химическому составу древесины осины, представленные в литературе, дают достаточно большой разброс значений [1]. Так, содержание целлюлозы варьируется от 41,8 до 52 %, лигнина – от 16 до 22 %, экстрактивные вещества – от 1,0 до 5,0 %; зольность – от 0,26 до 0,5 %.

Результаты анализа компонентного состава исследованных образцов древесины приведены в таблице 3.2 и находятся в диапазоне значений, приводимых в литературе [45].

Таблица 3.2 – Компонентный состав древесины ветвей и ствола осины, % от а.с. древесины

Компоненты древесины	Ветви	Ствол
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	$3,3 \pm 0,1$	$4,43 \pm 0,1$

Результаты показали, что содержание целлюлозы в древесине ветвей и ствола не было одинаковым: в древесине ствола оно достигало 53,1%, тогда как в древесине ветвей оно составляло 44,9, что считается хорошим для ее использования в производстве бумажной массы, так как он дает хороший выход. Также по содержанию лигнина процент был близким, так как в древесине ствола составляла 16,75%, а в древесине ветвей была

меньше, 14,8 %. Это можно считать положительным моментом, так как чем меньше процент лигнина, тем легче проходит делигнификация.

Что касается веществ, удаляемых холодной водой, то они в основном включают минеральные соли, простые сахара и некоторые органические кислоты [4], наибольший процент был в ветвях 4,05%, по сравнению со стволом 1,86%, в их состав входят такие дополнительные соединения, как пектин, гемицеллюлоза и некоторые фенольные соединения, процентное соотношение также было самым высоким. В ветвях оно составляет 4,43% по сравнению со стволом 3,3%. Это означает, что в стволе содержится меньшее количество веществ, удаляемых из холодной и горячей воды, это делает его более подходящим для производства высококачественной бумаги с большей долговечностью, поскольку наличие большого количества материалов, удаленных из воды, может отрицательно повлиять на качество бумаги, поскольку эти материалы могут привести к ослаблению связей между волокнами и снижению долговечности бумаги, а некоторые удаленные материалы могут повлиять на цвет и стабильность бумаги. Химические вещества, поскольку они взаимодействуют с химикатами, используемыми в бумажной промышленности, что влияет на цвет конечной бумаги [110].

Что касается экстрагированных органическими растворителями материалов, к которым относятся жиры, смолы и восковые вещества [2]. То наибольший процент был в стволе 1,38% и в ветвях 0,75%, что указывает на наличие большего количества этих соединений в Ствол по сравнению с ветвями. Присутствие жирных и восковых материалов может повлиять на способность волокон к скречиванию, снижает прочность бумаги, но может придать бумаге некоторые водостойкие свойства.

Результаты показали, что зольность в древесине ствола составила 0,26 %, а в древесине ветвей – 0,55 %. Это связано с тем, что ствол обычно содержит меньший процент минеральных веществ и примесей по сравнению с древесиной. ветви и содержит более развитые и устойчивые ткани, что приводит к меньшему накоплению неорганических материалов, а также потому, что он отвечает за поддержание общей структуры и транспортировку воды и минералов от корней к ветвям и листьям. Поэтому он содержит самый низкий процент неорганических материалов по сравнению с ветками. Что касается ветвей, то они содержат более высокий процент минералов и питательных веществ, поддерживающих рост листьев и ветвей, что приводит к увеличению зольности.

В целом, 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 %.

Таким образом, древесина ветвей по сравнению с древесиной ствола как в микростроении, так и в компонентном составе имеет ряд отличий, которые влияют как на физические свойства, так и должны проявляться в процессе переработки данного сырья.

3.1.4 Результаты лабораторных варок целлюлозы из ветвей и ствола осины

В литературе, где приводятся результаты проведенных ранее исследований, отмечалось, что в связи со сложностями окорки и пониженными бумагообразующими свойствами, древесина из ветвей и вершин деревьев с лесосек, имеет определенный потенциал для получения полуфабрикатов высокого выхода, используемых в композиции картона, к которым не предъявляются высокие требования по механической прочности [14]. Поэтому в данной работе сделан акцент на получении сульфатным способом волокнистого полуфабриката повышенного выхода.

Варки сульфатной целлюлозы проводилась в лабораторной автоклавной системе CAS-420. Использовались одинаковые условия варки древесины из ствола и из ветвей. Отличия в морфологическом строении и компонентном составе двух видов сырья должны показать различия в качестве волокнистого полуфабриката.

Первоначально была проведена варка по режиму №1. Параметры варки – расход активной щелочи 16 %, температура 170 °С и продолжительность 135 мин была принята по примеру варок производственной лиственной щепы. Данные по режиму и результатам варки представлены в таблице 3.3. Получен полуфабрикат с числом каппа 20 и 25, что не соответствует требованиям к ЦВВ. А различия в выходе целлюлозы и числе каппа у целлюлозы из ветвей и из ствола оказались очень большие, что связано с различиями в плотности древесины. Таким образом, для получения ЦВВ требуется корректировка режима.

Таблица 3.3 – Условия и результаты варки №1

Параметр	Вид сырья	
	Ветви	Ствол
Условия варки		
Расход активной щелочи на варку, в ед. Na ₂ O, к а.с.древесине	16	16
Гидро модуль	3	3
Общая продолжительность варки, мин	135	135
Результаты варки		
Выход а.с. целлюлозы, %	46	57
Количество непровара, %	1,5	0,6
Число Каппа	25	20
Содержание сухих веществ в черном щелоке, г/л	190	167
Содержание а.щ. в черном щелоке, г/л Na ₂ O	7,4	5,8

Далее была проведена варка №2, режим и результаты которой представлены в таблице 3.4. Был снижен расход щелочи на варку с 16 до 15 % и увеличен гидро модуль до 4. Тем не менее, осталась существенная разница в выходе и числе каппа целлюлозы из ветвей и из ствола, а выход сортированной целлюлозы получился малым для отнесения полученного полуфабриката к ЦВВ.

Таблица 3.4 – Условия и результаты варки №2

Параметр	Вид сырья	
	Ветви	Ствол
Условия варки		
Расход активной щелочи на варку, в ед. Na ₂ O, к а.с.древесине	15	15
Гидро модуль	4	4
Общая продолжительность варки, мин	135	135
Результаты варки		
Выход а.с. целлюлозы, %	51	61
Количество непровара, %	12	7
Число Каппа	55	43
Содержание сухих веществ в черном щелоке, г/л	151	149
Содержание а.щ. в черном щелоке, г/л Na ₂ O	5,9	6,4

Заключительную варку №3 вели аналогично температурному и временному режиму 1-ой и 2-ой варок, но расход щелочи был снижен до 14,5 %, а полученный полуфабрикат после варки подвергался размолу в стакане мельницы Йокро. Результаты представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Условия и результаты варки №3

Параметр	Вид сырья	
	Ветви	Ствол
Условия варки		
Расход активной щелочи на варку, в ед. Na ₂ O, к а.с.древесине	14,5	14,5
Гидромодуль	4	4
Режим варки:		
подъем температуры до 170 °С, мин	80	80
стоянка при температуре 170 °С, мин	55	55
Общая продолжительность варки, мин	135	135
Результаты варки		
Выход а.с. целлюлозы, %	56,7	59,3
Количество непровара, %	3,5	2,5
Общий выход целлюлозы, %	60,2	61,8
Число Каппа	52	54
Содержание сухих веществ в черном щелоке, г/л	105	98
Содержание а.щ. в черном щелоке, г/л Na ₂ O	5,0	6,1

В 3-м режиме варки у целлюлозы, полученной из ветвей значения выхода, числа каппа целлюлозы, количество непровара и содержание остаточной щелочи в черном щелоке имеют наименьшие различия со значениями, полученными при анализе целлюлозы полученной из стволовой части осины. 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.

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 для производства картона. Таким образом, контрольные данные 3-го режима варки указывают, что данный режим наиболее оптимален.

3.1.5 Бумагообразующие свойства целлюлозы из древесины ветвей осины

При оценке бумагообразующих свойств технической целлюлозы, чрезвычайно важна информация о структурно-морфологических свойствах целлюлозных волокон. Общепринято, что наиболее важными свойствами являются длина и ширина волокна, а также его способность сохранять размеры и форму при воздействии гидромеханических

нагрузок при размоле. При этом именно размол волокнистых полуфабрикатов часто является необходимым и самым важным процессом всего производства бумаги. В процессе размола происходит изменение исходного состояния волокна, т.е. его природных структурно-морфологических свойств и состояния поверхности клеточной стенки. Скорость и степень изменения их величины определяют, как качество готовой бумаги, так и энергоёмкость процесса массоподготовки.

В силу особенностей морфологического строения, химического состава и физических свойств древесины из ветвей и вершин, свойства целлюлозных волокон из них отличаются от свойств волокон из балансовой древесины.

3.1.5.1 Структурно-морфологические характеристики волокна

Определение структурно-морфологических характеристик волокна проводилось на анализаторе L&W Fiber Tester. Для обработки данных использована технология сравнительного анализа свойств волокон в MS Excel, которая позволяет выбрать образцы для анализа, представить данные в табличном виде, и построить сравнительные диаграммы свойств и фракционного состава. Результаты представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Структурно-морфологические свойства волокон 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

После размола, реализуемого при массоподготовке при изготовлении бумаги и картона, свойства волокон изменяются. По сравнению с целлюлозой из ствола, до размола, 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).

Таким образом, 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 %).

При размоле 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 (рис 3.3).

На рисунке 3.4 представлены фракционный состав волокон целлюлозы из ствола и ветвей осины по длине, ширине и фактору формы волокон.

Максимумы кривых фракционного состава по длине и ширине волокна для целлюлозы из ветвей сдвинуты в область более малых значений, по сравнению с целлюлозой из ствола, что соответствует разнице в средних значениях длины и ширины волокон.

На рисунке (3.4, а) видно, что у кривой фракционного состава по длине волокна, полученного из ствола, наблюдается четко выраженное плечо в диапазоне от 0 до 0,2 мм, что характерно для мелкой фракции, длина которой составляет менее 0,2 мм. Однако, на кривой волокна, полученного из ветвей такого плеча не наблюдается, это может быть объяснено тем, что древесина ветвей состоит в основном из клеток волокон либриформа, которые менее подвержены повреждениям в ходе варочного процесса и именно это приводит к значительному снижению мелочи.

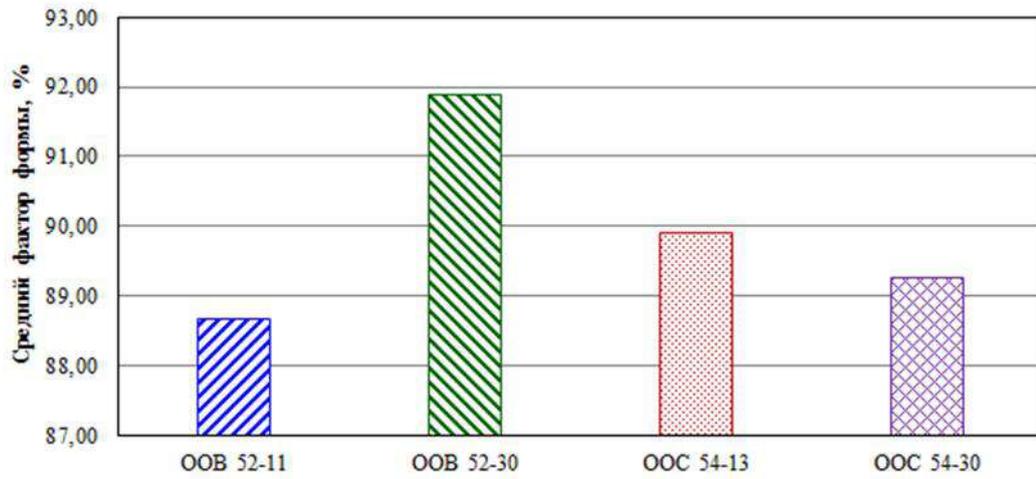
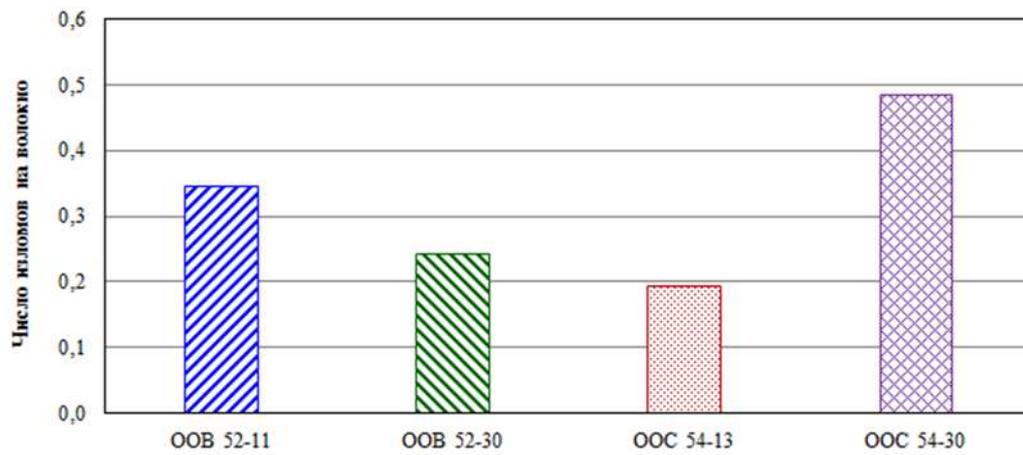
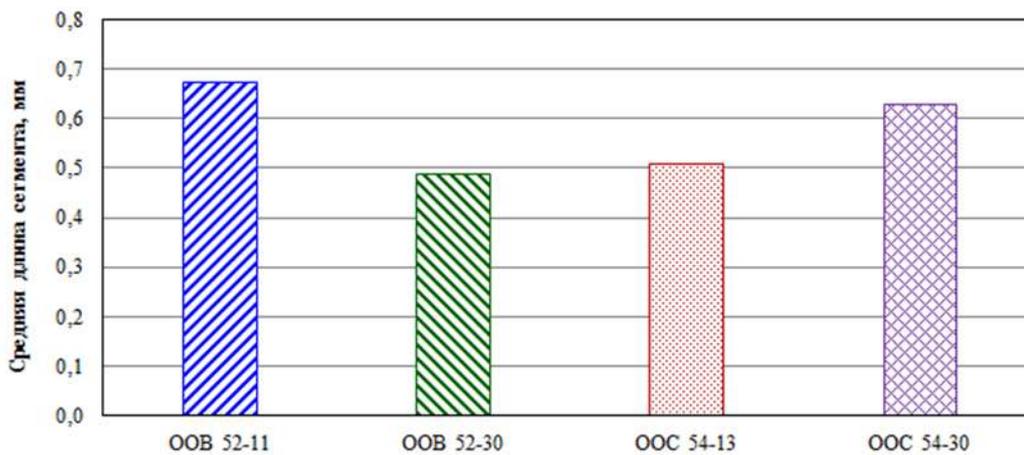
*a**б**в*

Рисунок 3.3– Изменение при размоле показателей, характеризующих поврежденность волокон из ветвей (ООВ) и из ствола (ООС) осины при размоле: *a* – средний фактор формы; *б* – число изломов на волокно; *в* – средняя длина сегмента

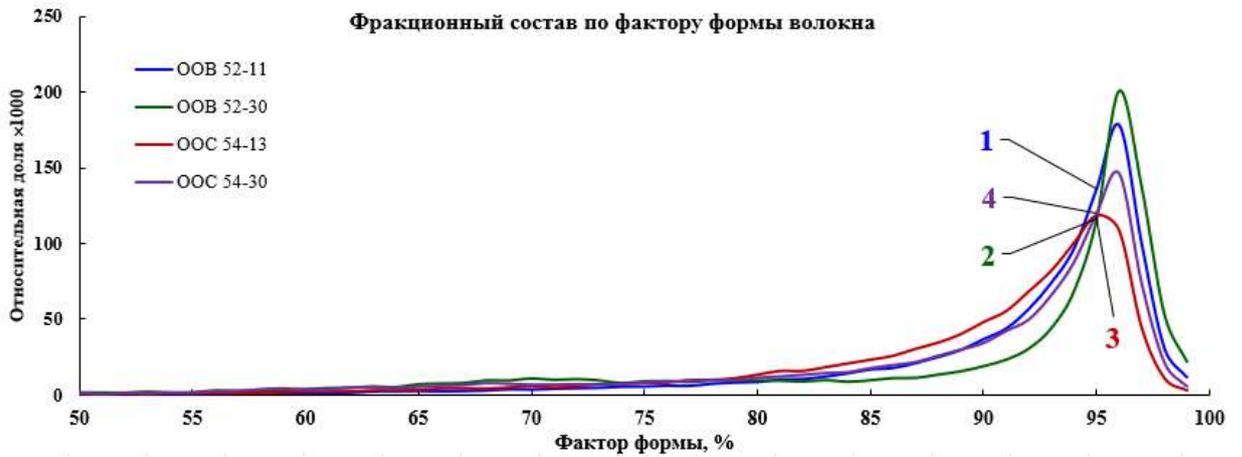
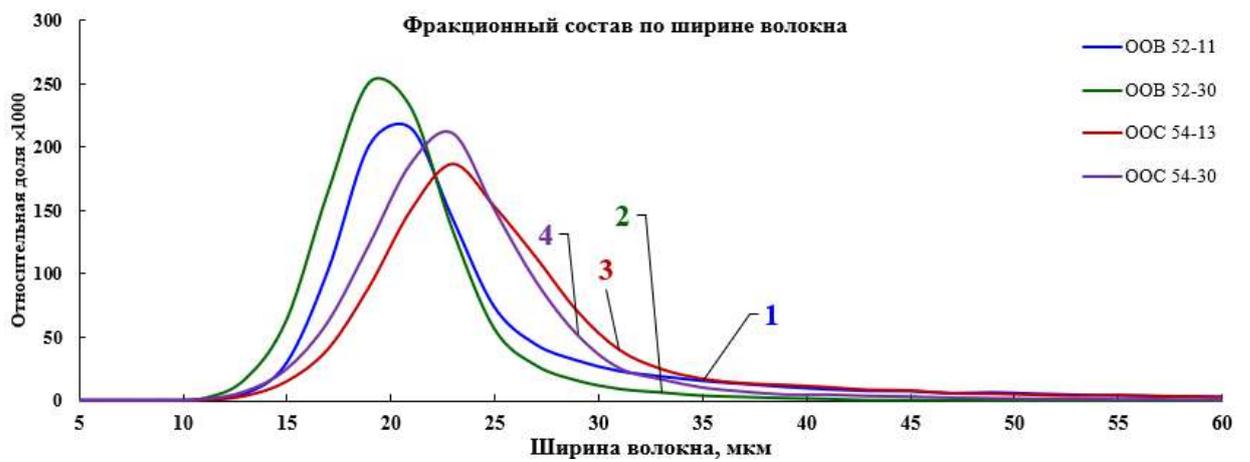
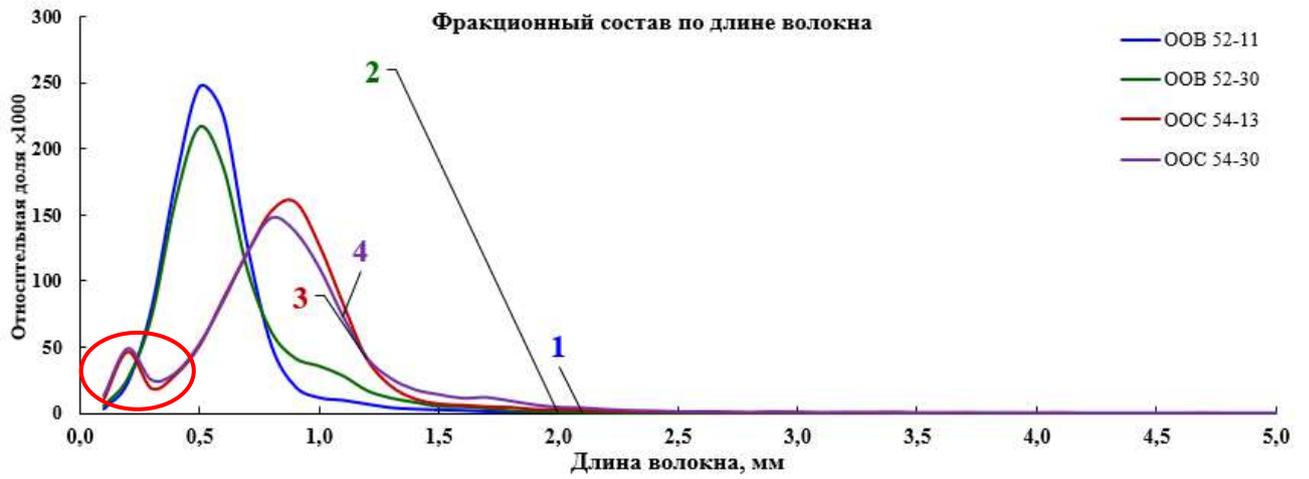


Рисунок 3.4 – Фракционный состав волокон целлюлозы из ствола и ветвей осины: *a* – по длине волокна; *б* – по ширине волокна; *в* – фактора формы; 1; 2 – целлюлозы из ветвей; 3, 4 – целлюлозы из ствола; 1; 3 – без размола; 2; 4 – при степени помола 30 °ШР

Размол, и в том, и в другом случае, приводит к сдвигу максимумов и перераспределению фракций – увеличение доли фракций малых размеров и снижение доли фракций больших размеров длины и ширины, что является типичным для всех волокнистых полуфабрикатов.

Диаграммы фракционного состава по фактору формы показывают преобладание относительно прямых волокон и снижение кривизны волокон после размола, что вызвано обрывом изогнутых участков волокон при механическом воздействии размалывающей гарнитуры.

Одновременное перераспределение фракций по длине и ширине волокна можно отследить по диаграммам «Длина-ширина» волокна, представленным на рисунке 3.5. Визуально хорошо заметны различия в волокнах из ветвей и ствола, а также изменения, происходящие при размоле.

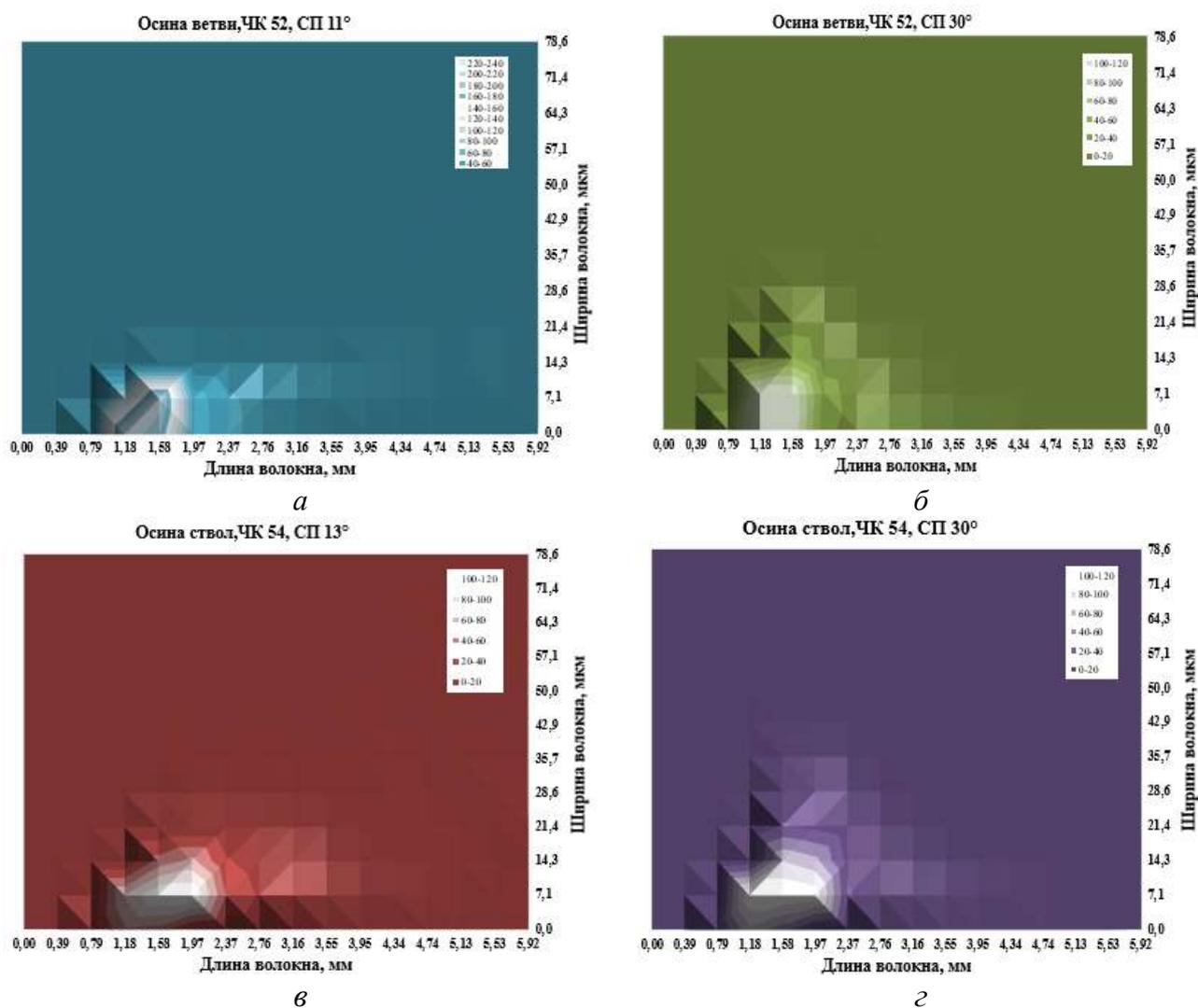


Рисунок 3.5 – Диаграммы «длина-ширина» волокна: *а* – образец из целлюлозы ветвей до размола; *б* – образец из целлюлозы ветвей после размола до 30°ШР; *в* – образец из целлюлозы ствола до размола; *г* – образец из целлюлозы ствола после размола до 30°ШР

В целом, целлюлозное волокно, полученное из ветвей осины, при более низких показателях длины и ширины волокна, по сравнению с волокном из спелой древесины, в процессе воздействия размалывающей гарнитуры хуже сохраняет первоначальные свойства волокон, и требует бережного режима размола.

В ходе эксперимента были выявлены следующие особенности изменения при размоле свойств волокон сульфатной целлюлозы из ветвей и ствола осины:

- целлюлоза из ветвей обладает короткими, тонкими и прямыми волокнами, которые менее повреждены при варке;
- при меньшей длине волокна целлюлоза из ветвей содержит меньше мелочи (2,6 против 6,0 %);
- изменение характеристик волокон из ветвей, по сравнению с волокном из ствола, в ходе размола происходит в более сильной степени.
- целлюлоза из ветвей требует более бережного режима размола.

3.1.5.2 Микроскопические исследования волокон целлюлозы

Микроскопические исследования образцов целлюлозы из ветвей, позволяют оценить изменение состояния волокон по сравнению с целлюлозой из ствола. На рисунках 3.7 и 3.8 представлены микрофотографии, полученные на цифровом микроскопе Imager M2m Carl Zeiss, без применения красителей. На фотографиях хорошо видны появляющиеся визуальные отличия в морфологии образцов целлюлозы из ветвей, которая плохо разделяется на отдельные волокна, в отличие от целлюлозы из ствола. Также визуально отмечаются меньшие размеры волокон из ветвей, и наличие большого числа изломов на волокнах. При роспуске сваренной ЦВВ, содержащей большое количество лигнина, более тонкие волокна из ветвей, повреждаются легче.

Микроскопическое изображение волокон из ствола осины, рисунок 3.6, показывает наличие длинных и тонких растительных волокон, и фрагментов сосудов, типичных для лиственной древесины. Хорошо различима продольная и упорядоченная структура клеток, что указывает на правильное строение клеточных стенок. Также встречаются паренхимные клетки. Окраска свидетельствует о наличии лигнина.

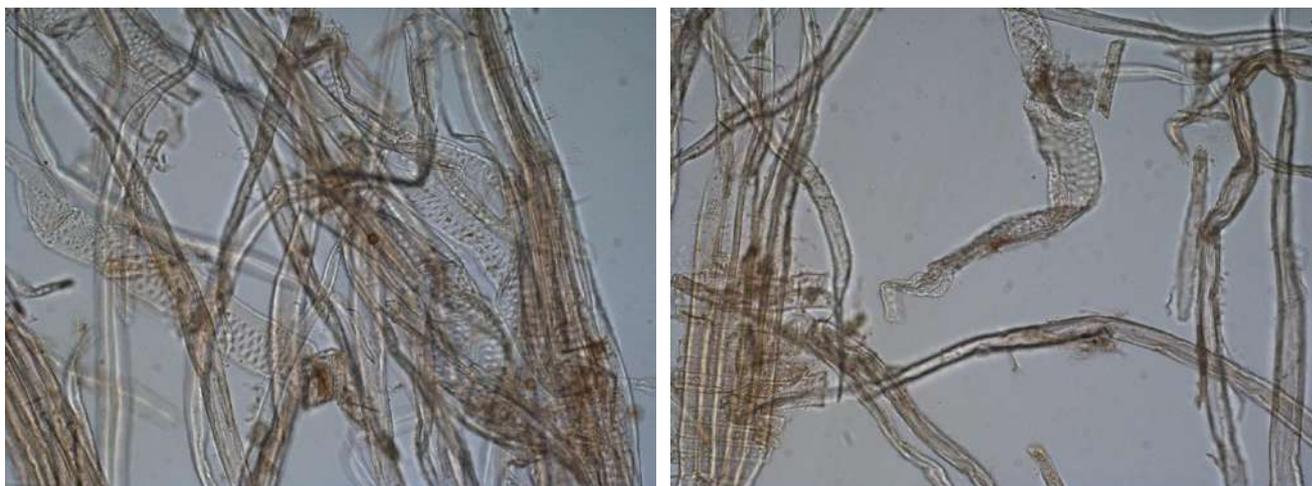


Рисунок 3.6 – Микрофотографии волокон целлюлозы из ствола осины

На рисунке 3.7 приведены микроскопические изображения волокон ветвей осины, они, как правило, тоньше и короче по сравнению с волокнами ствола. Некоторые из них имеют заострённые или острые концы, что характерно для длинных древесных волокон. Также можно наблюдать клетки веретенообразной формы, вероятно, паренхимные клетки. Кроме того, видны клетки, которые, возможно, являются трахеидами или элементами сосудов, типичными компонентами проводящей ткани в ветвях. Ветви обычно содержат менее грубые волокна, чем ствол, что может проявляться в менее утолщённых клеточных стенках.



Рисунок 3.7 – Микрофотографии волокон целлюлозы из ветвей осины

3.1.5.3 Фундаментальные свойства волокна целлюлозы

Известно, что уровень физико-механических и деформационных свойств обеспечивается фундаментальными (по Кларку) свойствами волокнистых полуфабрикатов. К ним относят среднюю длину волокон, грубость волокон, собственную прочность волокон, способность к уплотнению во влажном состоянии, когезионную способность.

Фундаментальные (по Дж. Кларку) свойства целлюлозы из ствола и ветвей осины были исследованы для образцов после размола в мельнице Йокро до степени помола 30 °ШР. Из полученных полуфабрикатов были изготовлены и испытаны лабораторные отливки, массой 75 г/м². Результаты представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Фундаментальные свойства волокна осины

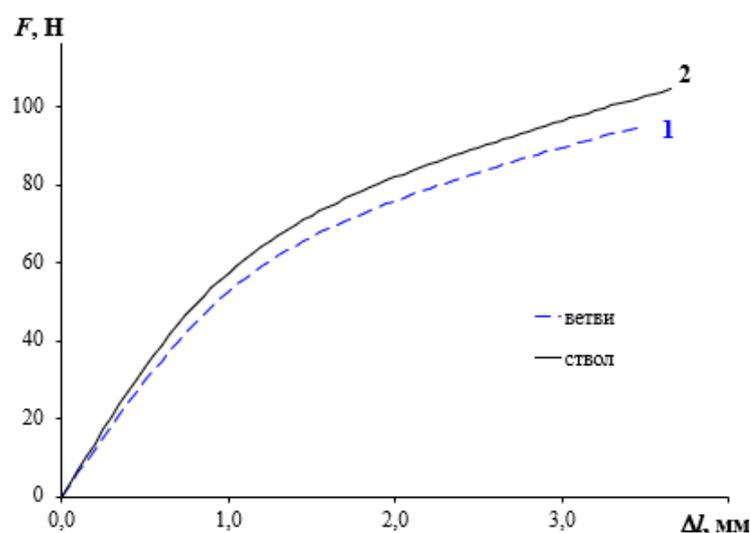
Параметр	Целлюлоза из ветвей	Целлюлоза из ствола	Ветви, % от ствола
Средняя длина волокна, мм	0,586	0,862	68,0
Плотность отливок, г/см ³	0,805	0,865	93,1
Межволоконные силы связи, МПа	2,43	2,37	102,3
Грубость волокон, мг/м	14,3	18,9	75,7
Сопротивление разрыву при нулевом зазоре (нулевая разрывная длина), км	11,3	14,5	77,7

Приведенные в таблице 3.7 данные, показывают, что у волокон целлюлозы, полученной из ветвей по сравнению с целлюлозой из ствола, ниже на 32 % средняя длина волокна (0,59 против 0,86 мм), на 24,3 % ниже грубость (14,3 против 18,9 мг/м), и 22,3 % ниже собственная прочность волокна (нулевая разрывная длина 11,3 против 14,5 км). При этом целлюлоза из ветвей обладает несколько большей, на 2,3 % (2,43 против 2,37 МПа), величиной сил связи, которые, в свою очередь, отвечают за упругие свойства бумаги и картона. Также обращает на себя внимание достаточно высокая плотность отливок (0,86 г/см³), практически равная плотности отливок целлюлозы из ствола (0,87 г/см³), которая играет важную роль в обеспечении уровня прочности и жесткости бумаги и картона.

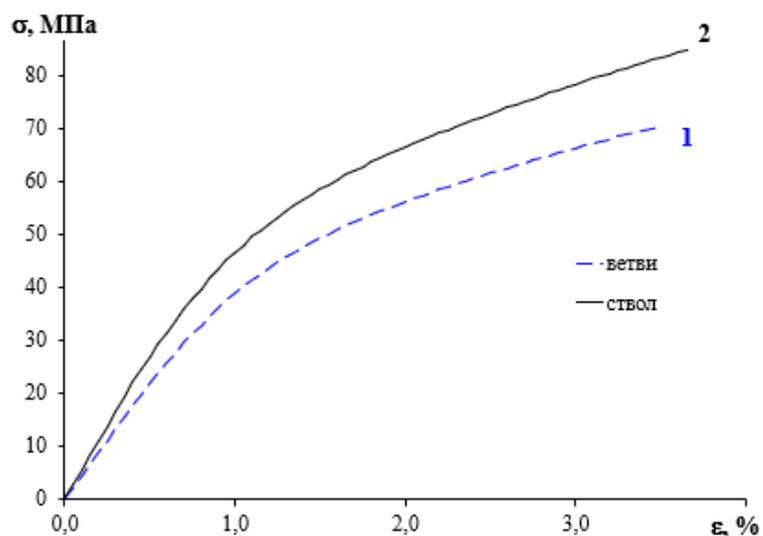
3.1.6 Физико-механические характеристики целлюлозы

Механические свойства образцов были исследованы для лабораторных отливок, массой 75 г/м^2 . Испытания серий образцов проведены после кондиционирования в стандартных условиях.

На рисунке 3.8 представлен график зависимости «нагрузка-удлинение», а график зависимости «напряжение-деформация» для исследованных образцов, полученный при испытании на растяжение и обработанных с применением программного обеспечения [19].



а



б

Рисунок 3.8– Кривые зависимости «нагрузка-удлинение» и «напряжение-деформация», полученные при испытании на растяжение образцов сульфатной небеленой целлюлозы из ветвей (1) и ствола (2) осины при степени помола $30 \text{ }^\circ\text{ШР}$

Кривая нагружения целлюлозы из ветвей идет ниже, чем целлюлозы из ствола, что свидетельствует о меньшей жесткости, прочности и растяжимости материала. При этом следует учесть, что при расчете напряжения (σ , МПа) учитывается толщина отливок, которая у целлюлозы из ветвей несколько больше. Отличия обусловлены разницей в размерах, гребности и собственной прочности волокон, при компенсирующем воздействии состояния поверхности и структуры клеточной стенки, которые претерпевают изменения в результате гидромеханического воздействия при размоле, что сопровождается развитием межволоконных сил связи и способности к уплотнению во влажном состоянии. Таким образом, проанализировав полученные графики, можно сделать вывод, что образцы из целлюлозы ветвей по сравнению с образцами из целлюлозы ствола являются менее прочными и растяжимыми, но эти отличия не велики и соответственно полуфабрикат, полученный из ветвей, может быть использован при производстве картона.

Соответственно, отмеченные закономерности изменения хода кривых нагружения отражаются на величинах деформационных и прочностных характеристик. При определении механических, прочностных и деформационных свойств отливок, для каждого показателя проведено 5 параллельных определений и рассчитано среднее значение. Результаты представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Физико-механические характеристики отливок из целлюлозы ветвей и ствола осины (30 °ШР)

Характеристика	Образец из ветвей	Образец из ствола	Ветви, % от ствола
Средняя толщина образца, δ , мкм	88	82	108
Индекс продавливания, $J_{П}$, кПа·м ² /г	5,0	5,1	97
Разрывная длина, L , м	8300	9800	85
Индекс раздираания, J_R , мН·м ² /г	3,0	3,9	76
Жесткость при изгибе, S_b , Н·м	19,2	22,7	85
Индекс SCT, кН·м/кг	36,1	37,2	97
Жесткость при растяжении, S_t , кН/м	410	460	89
Предел упругости, σ_1 , МПа	18,6	20,3	92
Предел упругой деформации, ϵ_1 , %	0,42	0,37	113
Разрушающее усилие, F_p , Н	95,1	104,5	91
Разрушающее напряжение, σ_p , МПа	70,5	85	83
Деформация разрушения, ϵ_p , %	3,48	3,65	95
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

По результатам измерения основных физико-механических характеристик лабораторных образцов, отчетливо видно, что образец целлюлозы из ветвей осины по сравнению с образцом из целлюлозы ствола имеет более низкие значения в большинстве исследуемых свойств.

Обладая на 32 % меньшей длиной волокна и на 22 % меньшей собственной прочностью волокна, целлюлоза из ветвей осины имеет сопротивление раздиранию ниже на 24 %, на 20 % модуль упругости, на 15 % разрывную длину, на 15 % жесткость при изгибе, на 11 % жесткость при растяжении, на 5 % деформация разрушения.

В тоже время, различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не превышают 3 %, что может быть связано с повышенной величиной межволоконных сил связи целлюлозы из ветвей при сопоставимой плотности, которые компенсируют отрицательное влияние меньшей длины и прочности волокна.

Стоит отметить, что у образца целлюлозы из ветвей осины по сравнению с образцом из целлюлозы ствола имеет значительно высокий предел упругой деформации (0,42 против 0,37 %), это объясняется повышенными межволоконными связями.

Это свидетельствует о том, что целлюлоза из ветвей имеет перспективу для использования в композиции упаковочных видов бумаги и картона. Если полученную целлюлозу использовать в композиции тарного картона, то минимальные различия в величине сопротивления продавливанию и сжатию позволяют говорить об определенном потенциале целлюлозы из ветвей. Однако, в данном случае использование к композиции 100 % ЦВВ из ветвей не будет наилучшим решением. В то же время, перспективным является использование данного волокнистого полуфабриката совместно с другими видами волокна, когда свойства волокон ЦВВ из ветвей – хорошая гибкость и когезионная способность будут использованы наилучшим образом.

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

В настоящее время для контроля структурно-размерных характеристик волокнистых полуфабрикатов применяются автоматические анализаторы волокна [135,136]. Результаты представляются в виде среднего значения, гистограммы распределения целого ряда характеристик волокон, учитывающих взвешенную, объёмную или массовую долю. Среди них ключевую роль играют длина, ширина, и фактор формы волокна.

Установленная разработчиками анализаторов волокна технология представления результатов измерений подразумевает формирование отчета на экране в виде серии таблиц и графиков, и вывода отчета в формате **.pdf*. Для проведения собственной обработки результатов, пользователь может экспортировать результаты в формате, позволяющем их загрузить в электронную таблицу в формате **.xls*. Далее производится обработка данных и представление результатов в форме, которую предпочитает каждый отдельный исследователь для построения собственных таблиц и диаграмм. Пример выполнения сравнительной оценки результатов анализа серии различных образцов представлен в работе [138].

Недостатками данной технологии являются:

- настройка шаблона расчета до проведения измерения;
- невозможность пересчета по другому шаблону после проведения измерения;
- разный набор массивов данных по разным шаблонам;
- невозможность унифицированной обработки данных, измеренных по разным шаблонам.

Поэтому возникла необходимость в технологии представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна, которая была разработана и реализована в виде методики [4].

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 с использованием разработанной нами Методики МВИ 03-2025, расчеты выполняются в специально разработанной электронной таблице Excel.

Методика включает в себя:

- импорт массивов с результатами измерений, рисунок 3.9;
- настройку фильтров для исключения неволокнистых включений, артефактов и шумов, не соответствующих параметрам волокна. Критерием отнесения к волокнам является отношение длины (l , мкм) к ширине (w , мкм) волокон (l/w) и максимальная ширина (мкм), что позволяет исключить из расчета частицы и обрывки сосудов, грязь, смоляные частицы и т.д. в случае, если они не исключены ПО анализатора, рисунок 3.10;
- определение граничные значения для параметров, классифицирующих фракцию как мелочь;
- устанавливаются размерные интервалы (классы) для последующего построения гистограмм фракционного состава;
- средняя величина длины (l), ширины (w) и фактора формы (f) вычисляется в трех вариантах: среднеарифметическая $X_{ср}$; средневзвешенная по длине $X_{срл}$; средневзвешенная по массе $X_{срм}$;
- при вычислении средних характеристик массивов полидисперсных массивов параметров волокон применяется технология расчета взвешенных по длине значений:

$$X_{срл} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (11)$$

$$l_{срл} = \frac{\sum l_i^2}{\sum l_i} \quad (12)$$

$$w_{срл} = \frac{\sum w_i l_i}{\sum l_i} \quad (13)$$

$$f_{срл} = \frac{\sum f_i l_i}{\sum l_i} \quad (14)$$

где X_i – измеренный параметр каждого волокна (длина, ширина или фактор формы);

l_i – длина каждого волокна;

w_i – ширина этого же волокна;

f_i – фактор формы этого же волокна.

Ветви Исх 1 Листва 2024-09-17 16:52:34
Fibre

No	Length	Width	Shape
1	375	29,6	91,7
2	483	20	96,5
3	525	25,6	91,3
4	246	22,5	96,8
5	498	18,2	95,4
6	917	21,5	83
7	305	17,8	90,6
8	345	18,4	96,3
9	287	18	97,1
10	523	18,8	95,8
11	394	21,4	94,5
12	350	19,2	95,5
13	1569	66,2	69,2
14	414	25,5	88,9
15	411	16,9	95,2
16	577	23,2	97,5
17	207	24,1	95,2
18	564	23,1	92,9
19	338	16,7	94,5
20	341	16,8	95,4
21	420	31,8	96
22	207	13,8	88,4
23	231	17,1	96,3
24	510	19,9	97,3
25	506	24,3	89
26	570	22,4	95,8
27	462	22,6	89,4
28	515	20,1	95,9
29	325	31,3	92,4
30	467	19,4	89,9

20057	306	20,4	94,7
20058	554	35,7	96
20059	513	24,3	96,5
20060	592	22	93,3
20061	621	23,5	82
20062	407	17,1	99,7
20063	645	28,6	65,4

a

	A	B	C	D
1	Образец:	Из ветвей, 14 ШР		
2	Число строк	20063		Последний
3		Для всех данных		
10	n	20001	20001	
11				
12	Срдл вол	0,462		
13	Взв.дл вол	0,493		
14	Масс.дл вол	0,672		
15	Длина волокна, мкм			
16	Ширина волокна, мкм			
17	Фактор формы, %			
18	Iw			
19	Исходные данные			
20				
No	Length	Width	Shape	
22	1	629	39,5	96,2
23	2	619	19,1	96,5
24	3	223	43,8	86,4
25	4	556	22,6	89,4
26	5	295	17,8	78,9
27	6	666	28,8	89,6
28	7	314	19,6	96,4
29	8	185	26,5	92,8
30	9	391	15,3	91,1
31	10	407	20,4	95,8
32	11	834	32,5	94,7
33	12	123	21,8	95,7
34	13	408	32,6	81,1
35	14	541	20,8	94,8
36	15	284	20,3	97,7
37	16	578	22,4	96,9
38	17	679	20,9	97,4
39	18	176	34,8	95,3
40	19	540	19,7	93,2
41	20	384	20,1	94,4
42	21	207	23,6	94,6
43	22	423	16,5	97,1
44	23	567	22,8	85,5
45	24	456	27,9	87,9
46	25	631	21,5	96,2
47	26	481	24,4	97,9
48	27	278	16,3	96,9
49	28	235	21,3	90,6
50	29	245	19,8	87,7
51	30	560	22,8	95,9
52	31	458	23,2	91,1
53	32	581	20,3	97,2

б

Рисунок 3.9 – Импорт данных для обработки: *a* – текстовый ANSI-файл; *б* – импортированные данные в электронной таблице

Ограничения			
	Длина, м	Ширина	Форма, %
мин	0.02	1	50
макс	1.9	80	100

a

Критерии отнесения к волокнам	
Отношение L/W	2
Максимальная ширина, м	80

б

Критерий отнесения к мелочам	
менее	0.2 мм

в

Рисунок 3.10 – Граничные значения для параметров и размерные интервалы

Для всех волокон					
Длина, м	Ширина	Форма, %			
0.433	23.2	92.6			
0.055	10.9	50.3			
1.882	80	100			
0.181	8.083	6.215			
41.8	34.9	6.7			
19781	19781	19781			
по фракциям		По всему массиву			
0.433	21.2	92.6	0.433	23.2	92.6
0.511	24.3	93.0	0.509	24.0	92.1
0.598	29.3	93.4	0.594	25.6	91.1

Волокна без мелочи					
Длина, мм	Ширина	Форма, %			
сред	0.459	23.3	92.5		
мин	0.201	11	50.3		
макс	1.882	80	100		
ско	0.165	8.194	6.270		
v, %	36.0	35.1	6.8		
n	18179	18179	18179		
по фракциям		По всему массиву			
0.460	21.4	92.6	0.459	23.3	92.5
0.521	24.5	93.0	0.518	24.1	92.1
0.601	29.7	93.4	0.598	25.6	91.1

Мелочь					
Длина, м	Ширина	Форма, %			
сред	0.141	21.3	93.1		
мин	0.055	10.9	59		
макс	0.2	49.3	100		
ско	0.040	6.397	5.530		
v, %	28.0	30.1	5.9		
n	1602	1602	1602		
По всему массиву					
0.141	21.3	93.1			
0.152	21.9	92.8			
0.161	22.3	92.7			

Рисунок 3.11 – Результаты статистической обработки и средние значения характеристик: арифметическая, взвешенная по длине, взвешенная по массе

– формирование диаграмм зависимостей между длиной, шириной, фактором формы волокон и отношением l/w , рисунок 3.12;

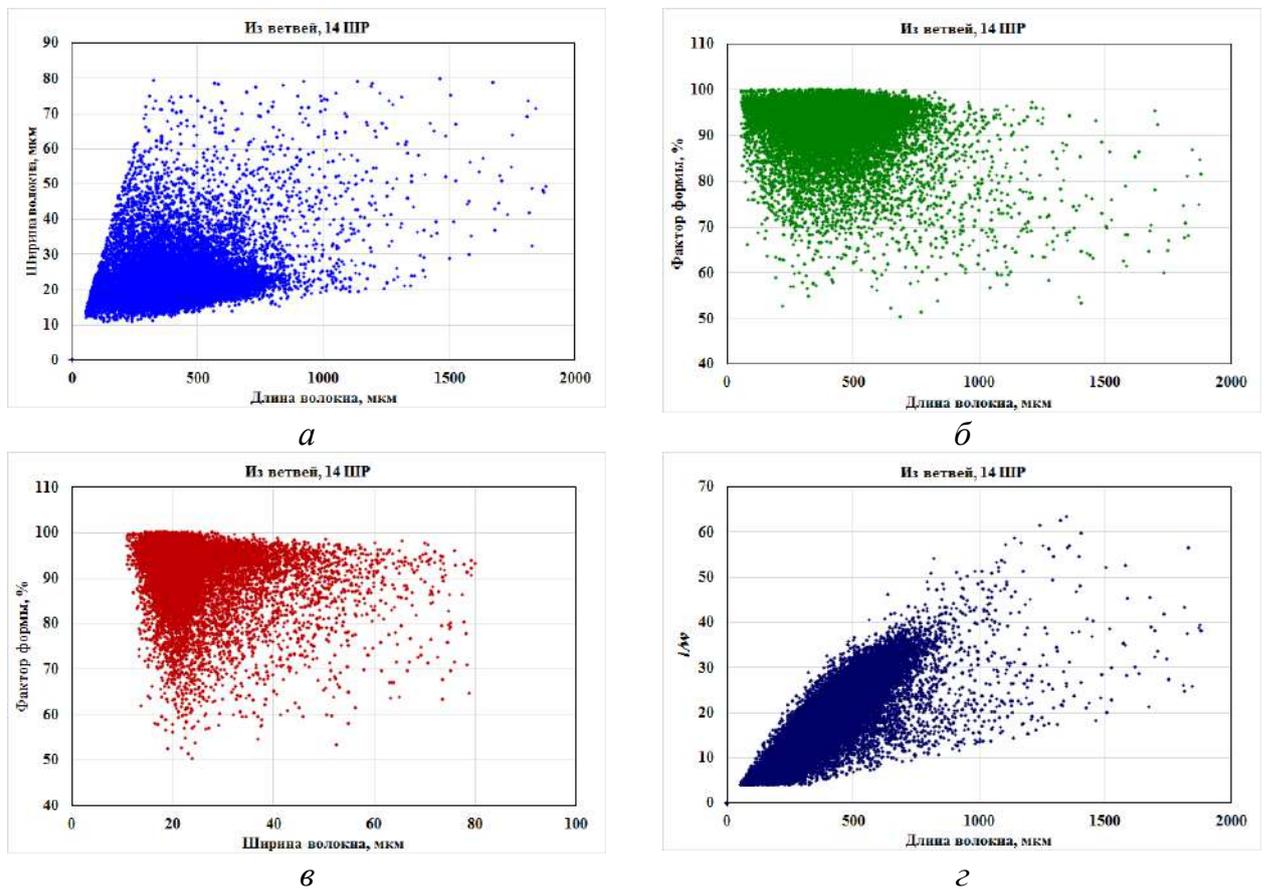


Рисунок 3.12 – Зависимости между длиной, шириной и фактором формы волокон

– формирование графиков фракционного состава: по длине, ширине и фактору формы; как с учетом мелочи, так и без неё – для оценки структуры и однородности волокнам (рисунок 3.13, 3.14, 3.15) для визуального анализа распределения параметров по всему массиву.

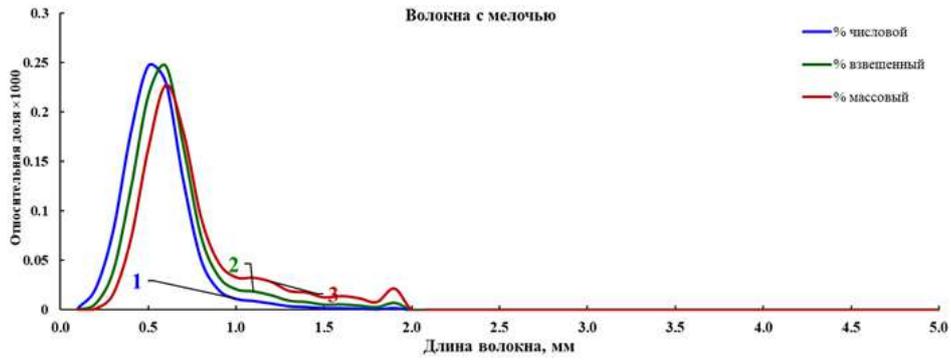


Рисунок 3.13 – Распределение по длине волокна

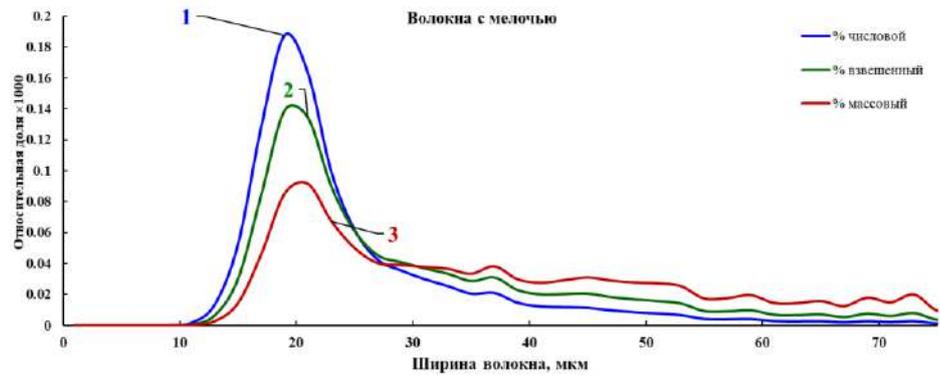


Рисунок 3.14 – Распределение по ширине волокон

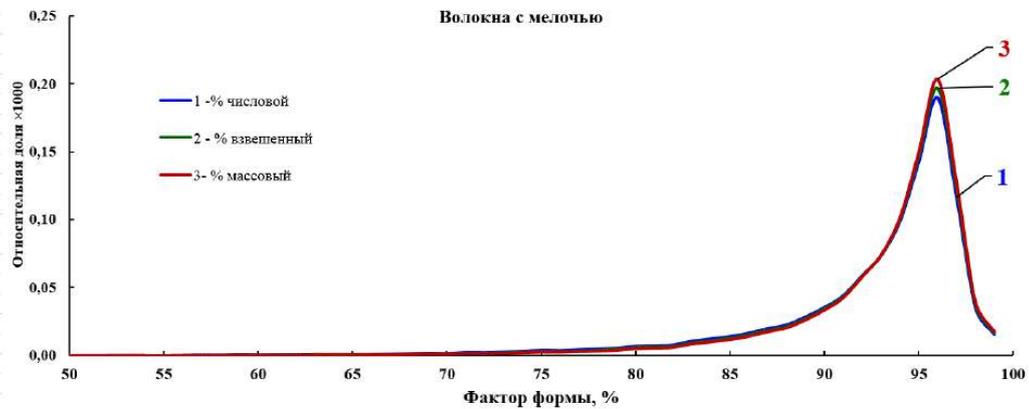


Рисунок 3.15 – Распределение по фактору формы

- формирование двумерных диаграмм распределения длина-ширина для визуального анализа распределения параметров волокна, рисунок 3.16;
- формирование массива данных для экспорта в систему сравнительного анализа.

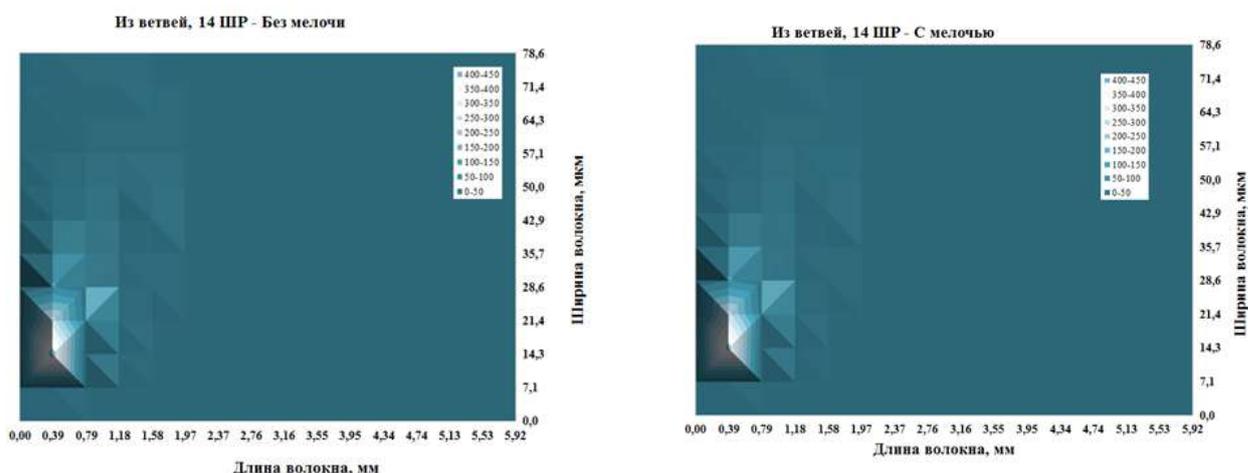


Рисунок 3.16 – Диаграммы длина-ширина с учетом мелочи и без мелочи

Методика успешно внедрена и используется в рамках деятельности Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера», где она применяется как инструмент для мониторинга качества сырья и оптимизации технологических процессов.

Применение разработанной методики расширенной характеристики геометрических размеров волокон позволяет не только установить количественные закономерности изменения свойств волокон, но и получить графическое подтверждение установленных зависимостей.

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

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-лайнер) 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 лесосечных отходов в виде ветвей и вершинок, которые составляют около 20...25 % от всей древесины. Это позволяет сократить объем отходов и снизить нагрузку на леса и сократить величину углеродного следа.

В экспериментах по изучению бумагообразующих свойств сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины было установлено, что она, обладая волокнами меньшего размера, имеет пониженное содержание мелочи, и, несмотря на несколько пониженные характеристики прочности, обладает уровнем жесткости при сжатии, сопоставимым с целлюлозой из стволовой части древесины.

Целью данной работы является исследование введения в композицию макулатурного флютинга сульфатной ЦВВ из ветвей осины на бумагообразующие свойства при получении конечного продукта с пониженной ресурсоемкостью и повышенной экологичностью.

В проводимом эксперименте 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.

Макулатура МС-5б, после роспуска и дезинтегрирования, размалывалась на мельнице Йокро до степени помола 30 °ШР. ЦВВ из ветвей размалывалась отдельно также до степени помола 30 °ШР. Исследовались свойства смеси целлюлозы из веток осины и макулатуры следующего состава: 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 100:0 %.

3.3.1 Микроскопический анализ волокон макулатуры МС-5Б

На рисунке 3.17 представлены микроскопические изображения волокон макулатуры МС-5Б, полученные на цифровом микроскопе Imager M2m Carl Zeiss.

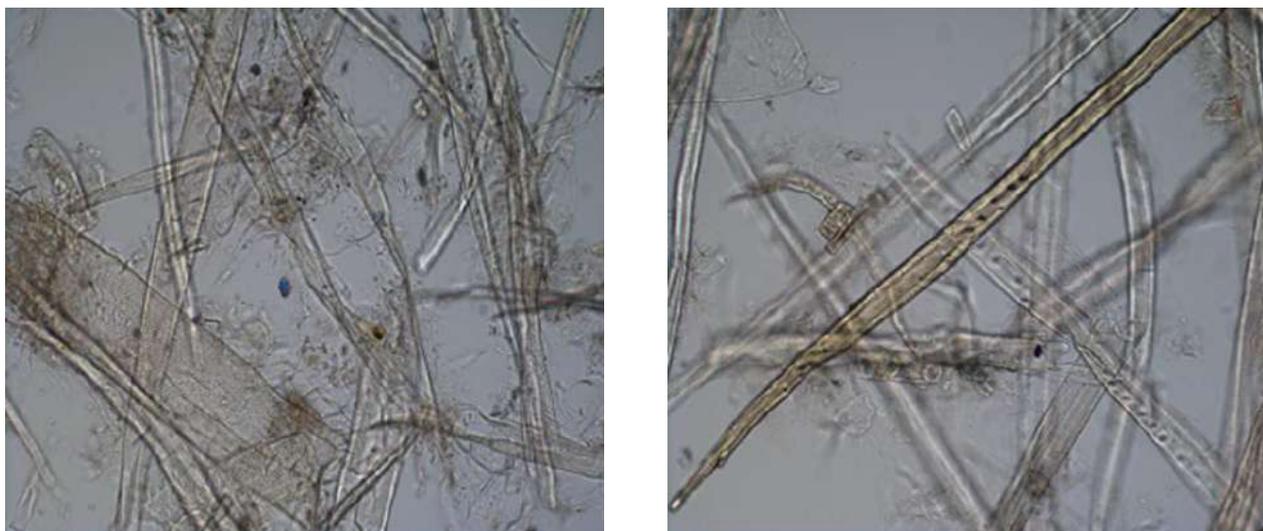


Рисунок 3.17 – Микроскопическое изображение волокон макулатуры МС-5Б

В волокнах, полученных из макулатуры, наблюдается значительное разнообразие: по сравнению с чистыми растительными волокнами, такими как волокна ствола или ветви осины, здесь встречаются волокна различных форм и размеров, некоторые из них повреждены или загрязнены мелкими частицами. Также можно заметить короткие или разрушенные волокна, что является следствием предыдущих стадий переработки – роспуска, размола, прессования и сушки. Присутствуют мелкие включения: окрашенные фрагменты, наполнители или неорганические остатки. В целом, макулатурные волокна неоднородны по составу, размерам и свойствам, что указывает на их смешанное происхождение из различных растительных материалов и типов бумаги.

3.3.2 Бумагообразующие свойства целлюлозы из смеси осиновой целлюлозы и макулатуры МС-5Б

3.3.2.1. Структурно-морфологические характеристики волокна

Массивы данных, полученные при измерении структурно-морфологических свойств волокнистых смесей на анализаторе волокна FiberTester, были экспортированы в систему сравнительного анализа, с помощью которой выполнено сравнение количественных данных, полученных при измерениях свойств волокон, структурно-морфологические свойства волокон представлены в таблице 3.9 и на рисунках (3.18, 3.19, 3.20), при расчете всех характеристик использовано взвешивание по длине.

Таблица 3.9 – Структурно-морфологические свойства волокон из смеси целлюлозы ветвей и макулатуры МС-5Б

	В:М 0:100	В:М 10:90	В:М 20:80	В:М 30:70	В:М 40:60	В:М 50:50	В:М 100:0
Средняя длина волокна, 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
Средний фактор формы, %	89,4	90,8	91,0	91,6	91,5	91,5	91,7
Содержание мелочи, %	0,70	0,78	0,86	0,87	0,91	0,95	0,84
Грубость, дг	263,7	165,3	163,7	165,1	99,5	181,5	158,0
Средний угол излома, град	52,2	49,0	48,0	46,0	41,9	45,8	37,9
Число изломов на мм	0,432	0,366	0,396	0,383	0,513	0,458	0,441
Число больших изломов на мм	0,130	0,091	0,094	0,083	0,088	0,104	0,056
Число изломов на волокно	0,421	0,295	0,299	0,268	0,319	0,292	0,237
Число больших изломов на волокно	0,126	0,074	0,071	0,058	0,054	0,066	0,030
Средний индекс излома	1,101	0,900	0,961	0,903	1,146	1,079	0,937
Средняя длина сегмента, мм	1,069	0,940	0,871	0,816	0,660	0,664	0,494
Число сосудов на 100000 волокон	490,3	339,3	295,3	178,3	126,0	165,7	49,0
Число сосудов на грамм	15993	14429	19133	12023	14314	11849	3687
Площадь сосудов/объем волокна	0,547	0,488	0,701	0,502	0,670	0,567	0,127
Средняя площадь сосудов	0,052	0,046	0,046	0,049	0,043	0,049	0,041
Средняя длина сосудов	0,392	0,358	0,358	0,378	0,334	0,380	0,350
Средняя ширина сосудов	0,131	0,127	0,129	0,128	0,129	0,127	0,117

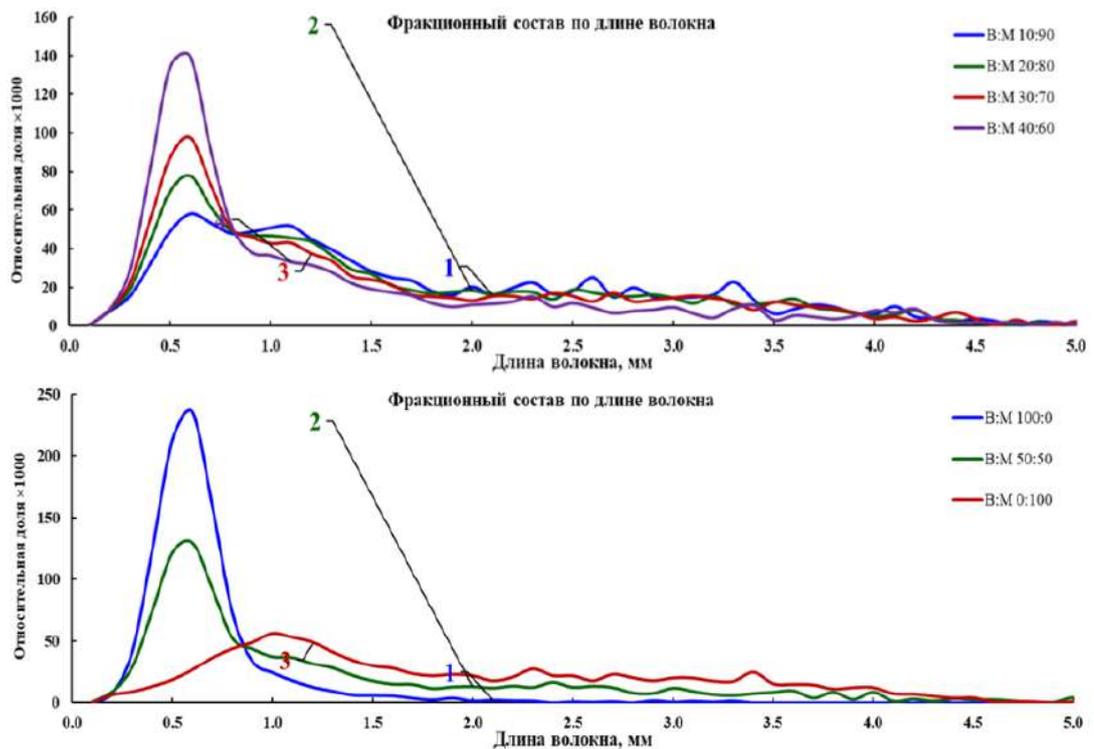


Рисунок 3.18 – Фракционный состав по длине волокна смесей волокна ЦВВ из осины (В) и макулатуры МС-5Б (М)

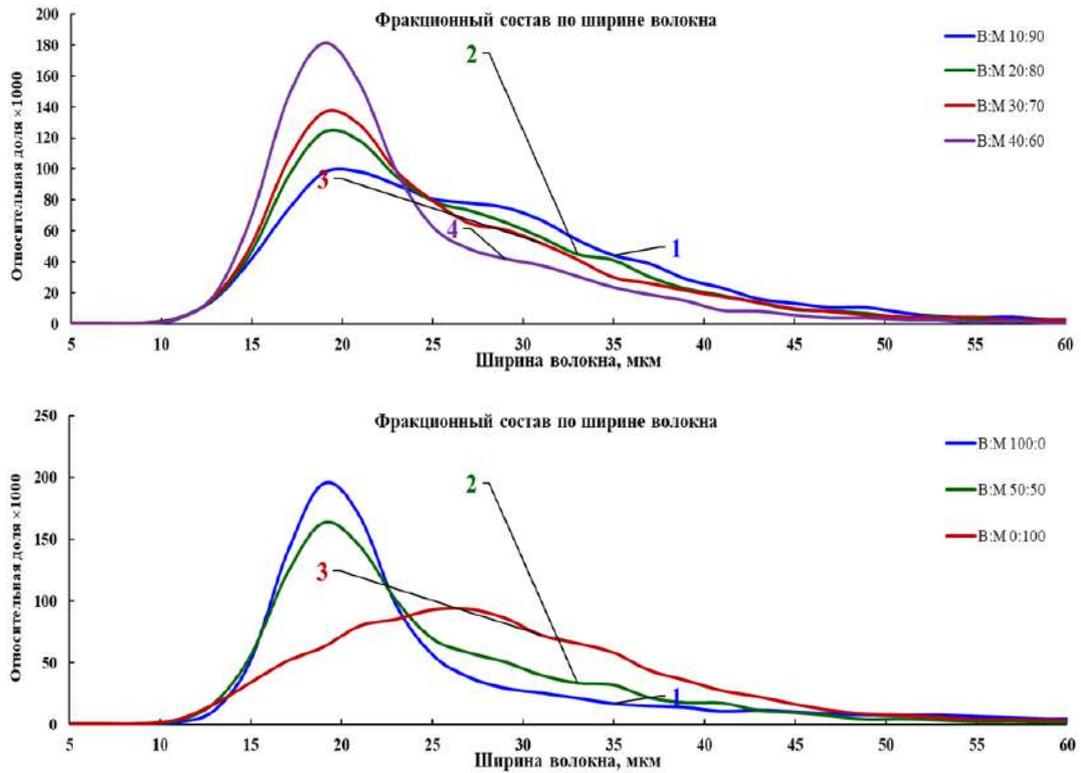


Рисунок 3.19 – Фракционный состав по ширине волокна смесей волокна ЦВВ из осины (В) и макулатуры МС-5Б (М)

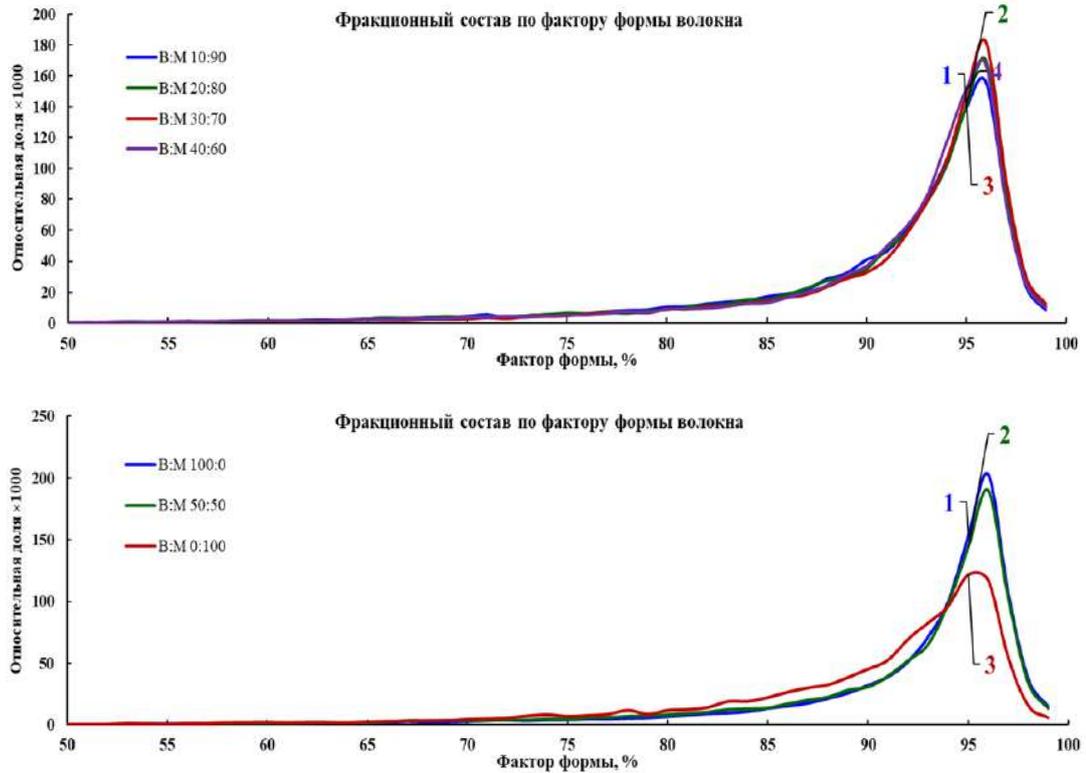


Рисунок 3.20 – Фракционный состав по фактору формы волокна смесей волокна ЦВВ из осины (В) и макулатуры МС-5Б (М)

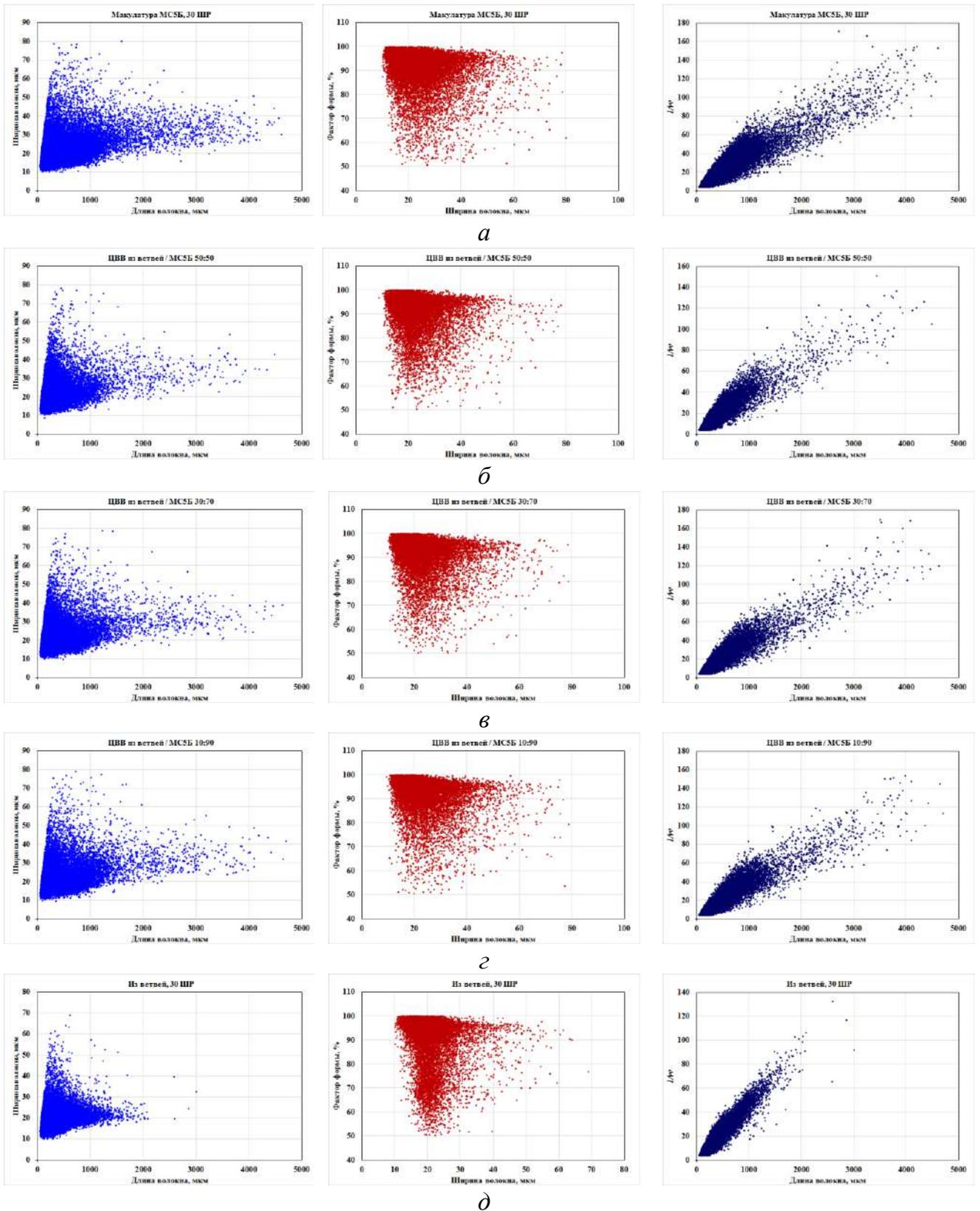
Волокна целлюлозы из ветвей, по сравнению с волокнами макулатуры МС-5Б, при степени помола 30 °ШР, более короткие (0,54 против 1,19 мм), с меньшей шириной (24,6 против 27,1 мкм), менее изогнутые (фактор формы 91,7 против 89,4) и содержат чуть больше мелочи – волокон с длиной менее 0,2 мм (8,4 против 7,0 %).

В смесях параметры волокон приобретают промежуточные значения, при этом правило аддитивности соблюдается не всегда, а изменение характеристики при введении ЦВВ в композицию бумажной массы происходит не по линейному закону. 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 рисунке 3.21 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.

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 $l/w = f(l)$, при добавлении волокон осины в макулатуру (которая включает переработанные короткие волокна), она может не удерживать исходную длину волокон. Поскольку средняя длина не всегда тесно связана с изучаемыми характеристиками [40, 41].

У волокон из ветвей подавляющее большинство волокон имеют длину меньше 0,8 мм, при этом много коротких волокон имеют ширину больше 30 мкм. Короткие волокна являются в большинстве случаев более прямыми, что подтверждено величиной среднего фактора формы. Разница в ширине волокон из ветвей, по сравнению с волокнами из ствола, меньше, чем разница в длине волокон, поэтому степень вытянутости волокон (отношение l/w) ограничена, в основном, значением 100, тогда как у волокон макулатуры достигает 150 и более. При этом рост величины l/w с увеличением длины l происходит быстрее.



д

Рисунок 3.21 – Зависимости между длиной l , шириной w ; фактором формы f , и отношением l/w для смесей волокон ЦВВ из ветвей и макулатуры МС-5Б:

a – 100 % МС-5Б; $б$ – ЦВВ:МС-5Б 50:50 %;

$в$ – ЦВВ:МС-5Б 30:70 %;

$г$ – ЦВВ:МС-5Б 10:90 %; $д$ – ЦВВ 100 %

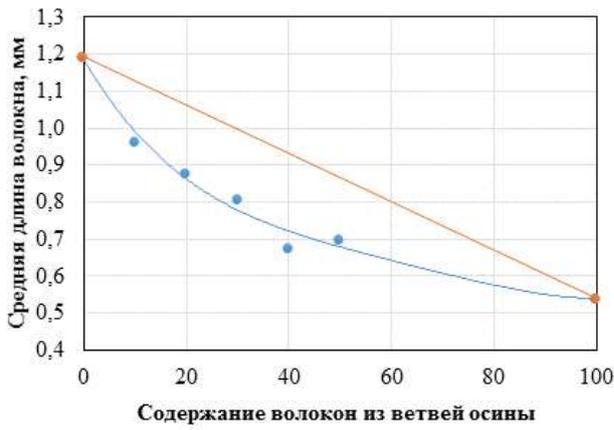
Введение в композицию бумаги из макулатуры ЦВВ из ветвей осины в количестве до 50 % закономерно повышает содержание мелочи с 7,0 до 9,5 %. Снижается изогнутость волокон (фактор формы повышается) с 89,4 до 91,5, средний угол излома снижается с 52,2 до 45,8 °, снижается число изломов на волокне с 0,42 до 0,29, что связано с малой длиной, шириной, и повышенной прямизной волокон ЦВВ из ветвей.

В смеси волокон разной морфологии также перераспределяется содержание коротковолокнистых и длиноволокнистых фракций. Диаграммы фракционного состава по длине волокна (рисунок 3.18) подтверждают это. Целлюлоза из ветвей содержит большую долю короткой фракции – менее 0,5 мм, поэтому введение осиновой ЦВВ из ветвей увеличивает долю фракций 0.2–0.5 мм.

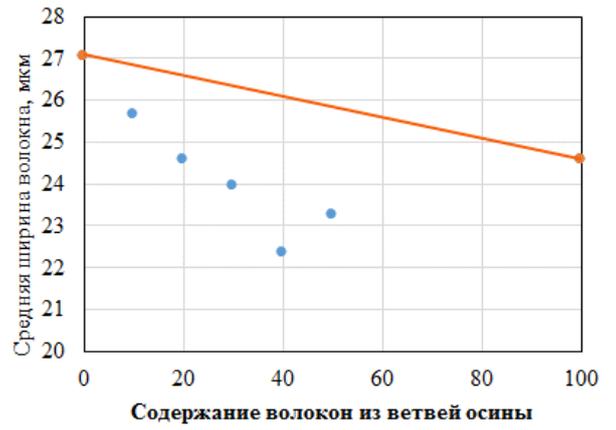
На рисунке 3.22 представлены графики, иллюстрирующие влияние доли целлюлозы из ветвей осины на структурно-морфологические свойства смеси. Композиция размолотой целлюлозы представляет собой смесь лиственных, хвойных, первичных и вторичных волокон, свойства которых изначально зависят от морфологии, а после размола – от восприимчивости силового воздействия размалывающей гарнитуры стенкой волокна. При отсутствии взаимодействий между компонентами смесей должно соблюдаться правило смесей, в соответствии с которым свойства смеси определяются долей смешиваемых компонентов и должны изменяться пропорционально долям компонентов с различными свойствами. Проведенные на рисунке 3.23 прямые соответствуют правилу смесей, а кривые с маркерами или маркеры – экспериментально измеренные значения.

Все измеренные структурно-размерные свойства волокон композиции разделились на две группы: одни соответствуют правилу смесей (правый столбец), у других наблюдаются отклонения (левый столбец). Не подчиняются правилу смесей: средняя ширина волокна, средний фактор формы, содержание мелочи.

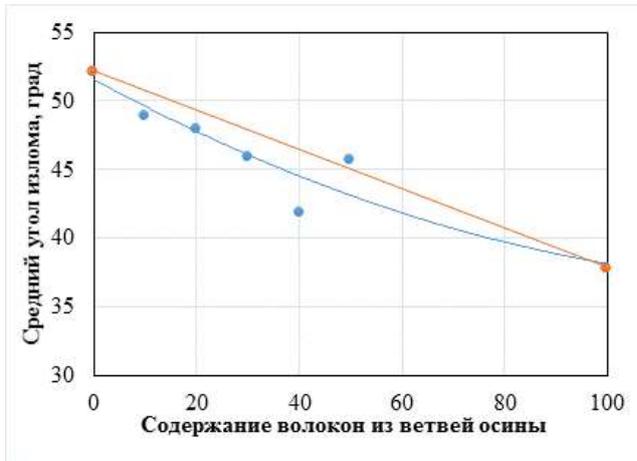
Таким образом, в результате проведенного эксперимента установлены закономерности изменения фракционного состава композиции из макулатуры БС-5Б при введении в нее волокон сульфатной ЦВВ из ветвей осины. Разные по длине фракции содержат разное количество макулатурных и осиновых и бамбуковых волокон из-за их собственного фракционного состава.



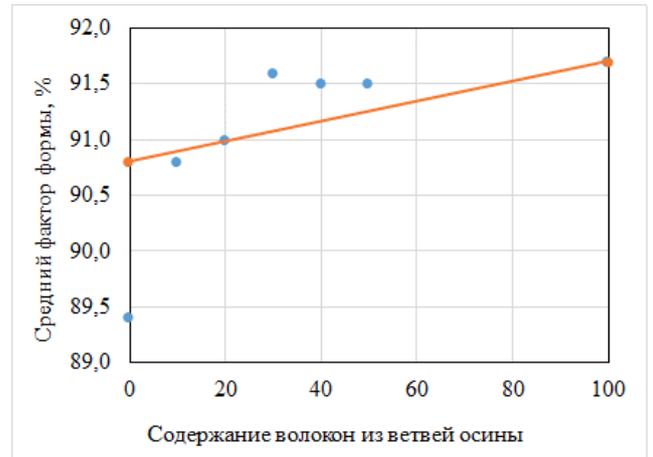
а



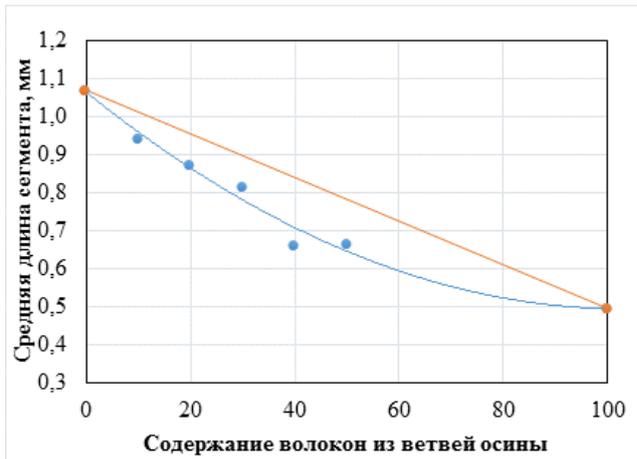
б



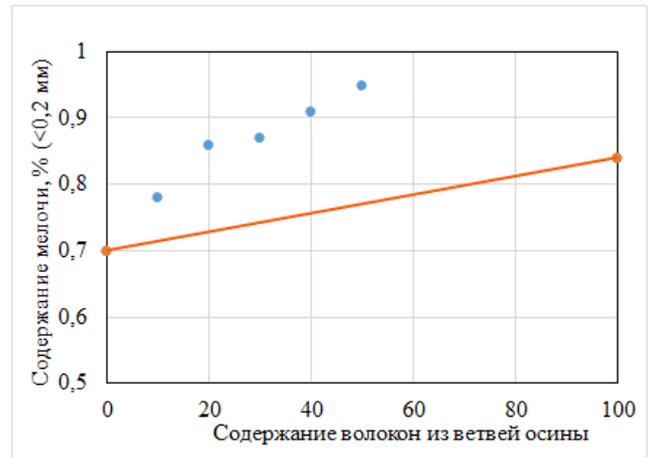
в



г



д



е

Рисунок 3.22 – Влияние соотношения волокон веток осины на некоторые свойства волокна

В целом введение волокон целлюлозы из ветвей осины приводит к снижению средней ширины волокна, увеличению фактора формы, уменьшению средней длины сегмента и увеличению доли мелочи, уменьшению числа изломов на волокно, в том числе больших. Исходные различия во фракционном составе по длине и ширине волокна приводят к возникновению отклонений от правила аддитивности при изучении свойств волокнистых смесей из волокна после размола.

Применение разработанной методики расширенной характеристики геометрических размеров волокон в смесях из ЦВВ из веток осины и макулатуры МС-5Б позволило не только установить количественные закономерности измерения свойств волокон, но и получить графическое подтверждение установленных зависимостей.

3.3.2.2. Свойства упаковочной бумаги из смеси сульфатной целлюлозы из ЦВВ из ветвей осины и вторичного волокна

Механические свойства образцов были исследованы для лабораторных отливок, массой 75 г/м^2 , изготовленных на листоотливном аппарате Estanit BBS-2 системы Рапид-Кеттен. Исследовались свойства смеси ЦВВ из веток осины и макулатуры МС-5Б следующего состава: 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 100:0 %. На рисунке 3.23 показаны лабораторные образцы, полученные из смесей целлюлозных волокон веток осины и макулатуры.

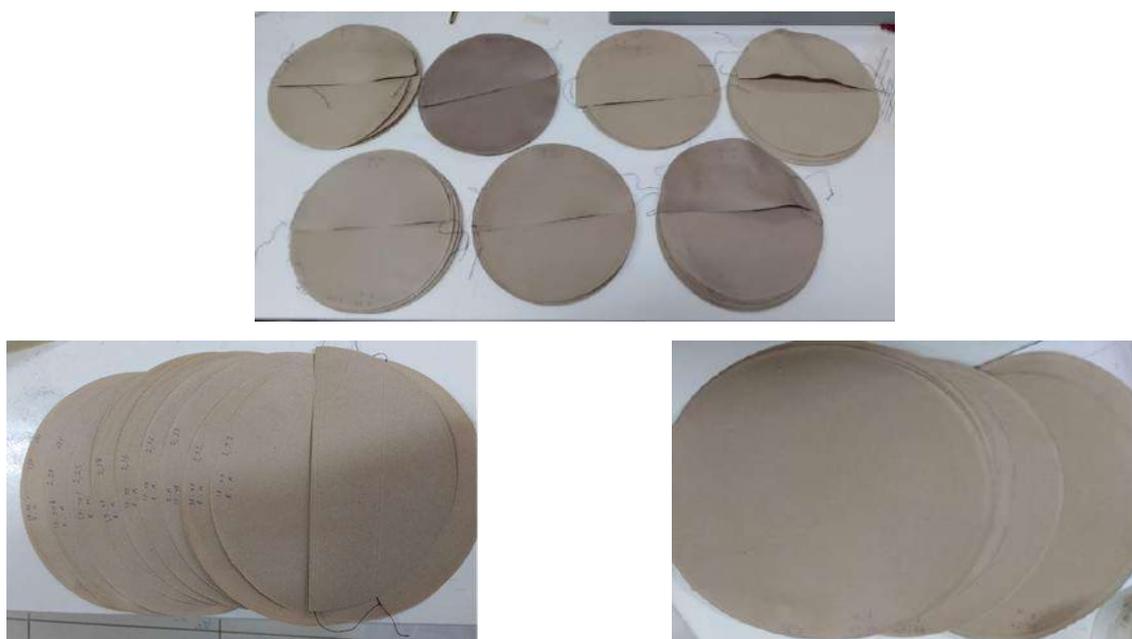


Рисунок 3.23 – Лабораторные отливки целлюлозы из смесей волокон

Испытания отливок проведены после кондиционирования в стандартных условиях.

В таблице 3.10 приведены данные о фундаментальных свойствах смешиваемых полуфабрикатов и их смесей. Установлено, что у волокон целлюлозы, полученной из ветвей по сравнению с целлюлозой из макулатуры, ниже на 50 % средняя длина волокна (0,54 против 1,19 мм), ниже грубость (158 против 264 мг/м), при этом ЦВВ из ветвей обладает несколько большей (1,08 против 0,86 МПа), величиной сил связи, которые, в свою очередь, отвечают за упругие свойства бумаги и картона.

Также обращает на себя внимание достаточно высокая плотность отливок (0,86 против 0,59 г/см³), которая играет важную роль в обеспечении уровня прочности и жесткости бумаги и картона.

Таблица 3.10 – Физико-механические характеристики отливок из смеси осиновой целлюлозы и макулатуры МС-5Б (30 °ШР)

Характеристика	Композиции из макулатуры МС-5Б с долей осинового ЦВВ из ветвей, %						
	0	10	20	30	40	50	100
Фундаментальные свойства							
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
Грубость волокон, Г, мг/м	264	165	164	165	100	181	158
Содержание мелочи (<0,2 мм), %	7,0	7,8	8,6	8,7	9,1	9,5	8,4
Плотность отливок ρ , г/см ³	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
Стандартные физико-механические свойства							
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_P , кПа·м ² /кг	1,96	2,34	2,59	3,55	3,95	3,68	3,06
Индекс раздираания, J_R , мН·м ² /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
Деформационные и прочностные свойства при испытании на растяжение							
Жесткость при растяжении, кН/м	330	400	390	400	310	380	370
Предел упругости, σ_1 , МПа	6,87	10,5	10,8	12,9	13,28	13,7	21,6
Разрушающее напряжение, σ_p , МПа	28,45	41,67	37,43	43,65	36,69	40,59	46,13
Разрушающее усилие, F_p , Н	48,20	67,65	61,76	67,65	36,78	58,65	51,90
Предел упругой деформации, ε_1 , %	0,24	0,29	0,31	0,34	0,38	0,36	0,45
Деформация разрушения, ε_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
Мгновенный 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

В смесях параметры волокон приобретают промежуточные значения, при этом правило аддитивности соблюдается не всегда, а изменение некоторых свойств при введении ЦВВ в композицию бумажной массы происходит не по линейному закону. В данном случае в композиции бумажной массы смешиваются принципиально разные полуфабрикаты, при этом их общей особенностью является большое количество волокнистой мелочи. Мелкие волокна ЦВВ имеют меньшую ширину и имеют более прямолинейную форму. Волокнистая мелочь в макулатуре представлена большей частью обрывками волокон, образовавшихся, главным образом, на предыдущих циклах переработки. В итоге, взаимное смешивание мелочи разной морфологии в смеси вносит кумулятивный эффект в результаты измерений, что особенно проявляется для величины межволоконных сил связи. Отмеченные особенности фундаментальных свойств целлюлозы из ветвей, обеспечивают различия в деформационных свойствах, жесткости и прочности бумаги из их.

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/см³), большее сопротивление продавливанию (3,06 против 1,69 кПа·м²/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·м²/кг), что связано с пониженной длиной волокна. Таким образом, смешиваемые волокнистые полуфабрикаты резко отличаются не только по размерам волокон, но и по физико-механическим свойствам листов бумаги из них.

На рисунке 3.24 и 3.25 представлен график зависимости «нагрузка-удлинение» и «напряжение-деформация», полученные при испытании на растяжение с постоянной скоростью образцов из лабораторных отливок из смесей ЦВВ из ветвей и макулатуры при степени помола 30 °ШР, зависимости построены с применением программного обеспечения [38].

Введение в композицию бумаги мелких и тонких волокон из ветвей осины приводит к формированию более плотной структуры, плотность листов повышается, а толщина снижается при увеличении доли ЦВВ из ветвей, примерно по линейному закону при соблюдении правила аддитивности.

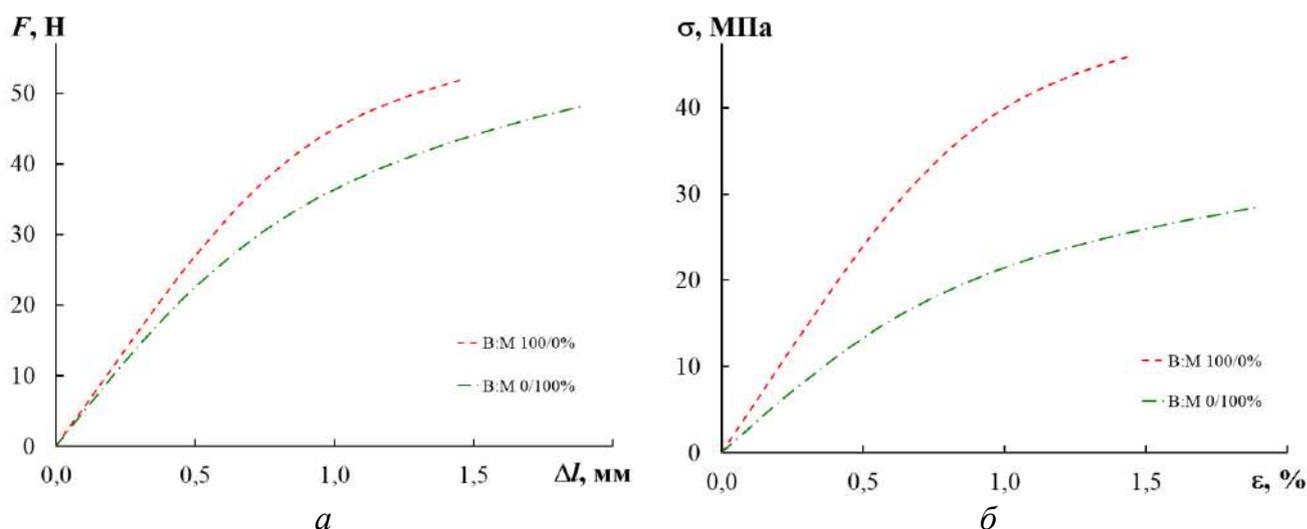


Рисунок 3.24 – Графики зависимости нагрузка-удлинение (*a*) и напряжение-деформация (*б*) для смешиваемых компонентов – целлюлозы из ветвей (В) и макулатуры (М)

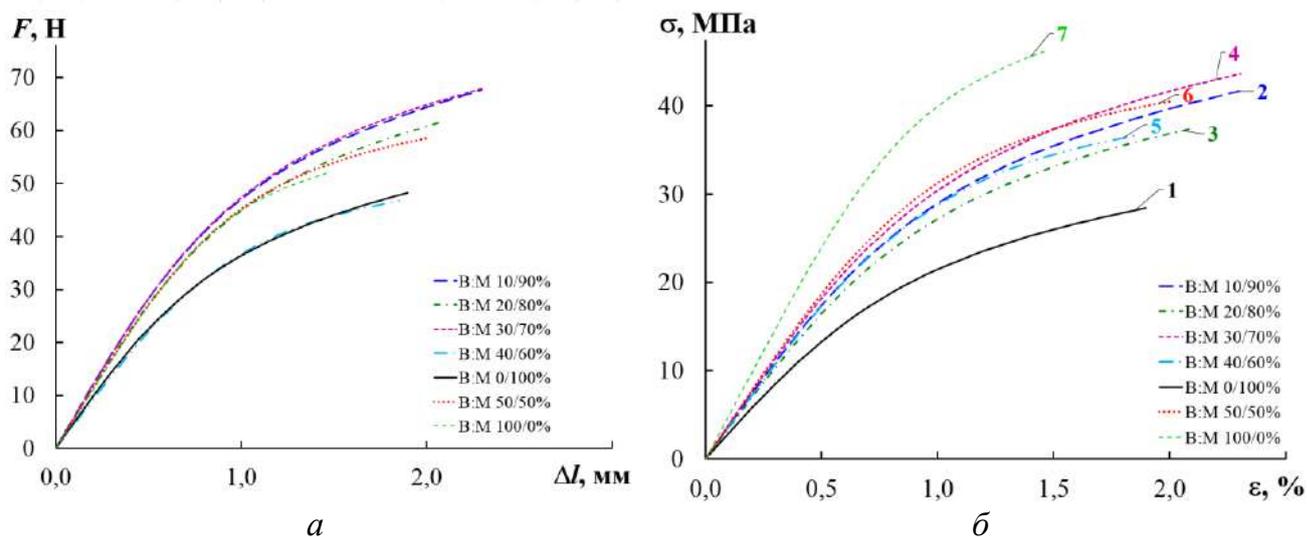


Рисунок. 3.25 – График зависимости «нагрузка-удлинение» (*a*) и «напряжение-деформация» (*б*) для отливок из смесей целлюлозы из ветвей (В) и макулатуры (М) в различных соотношениях

При формировании физико-механических свойств происходит введение лиственной ЦВВ приводит к резкому улучшению многих физико-механические свойств, уже при дозировке 10 %. Последующее увеличение доли ВЦЦ из ветвей не приводит к существенному изменению уровня свойств. Особенно это четко проявляется на ходе кривых нагружения при растяжении, рисунок 3.26: все кривые « σ - ϵ » для смесей проходят близко друг от друга, но в пространстве между кривыми для исходных смешиваемых компонентов. При этом деформационные свойства бумаги из смесей волокон увеличиваются, что особенно четко проявляется для деформации растяжения.

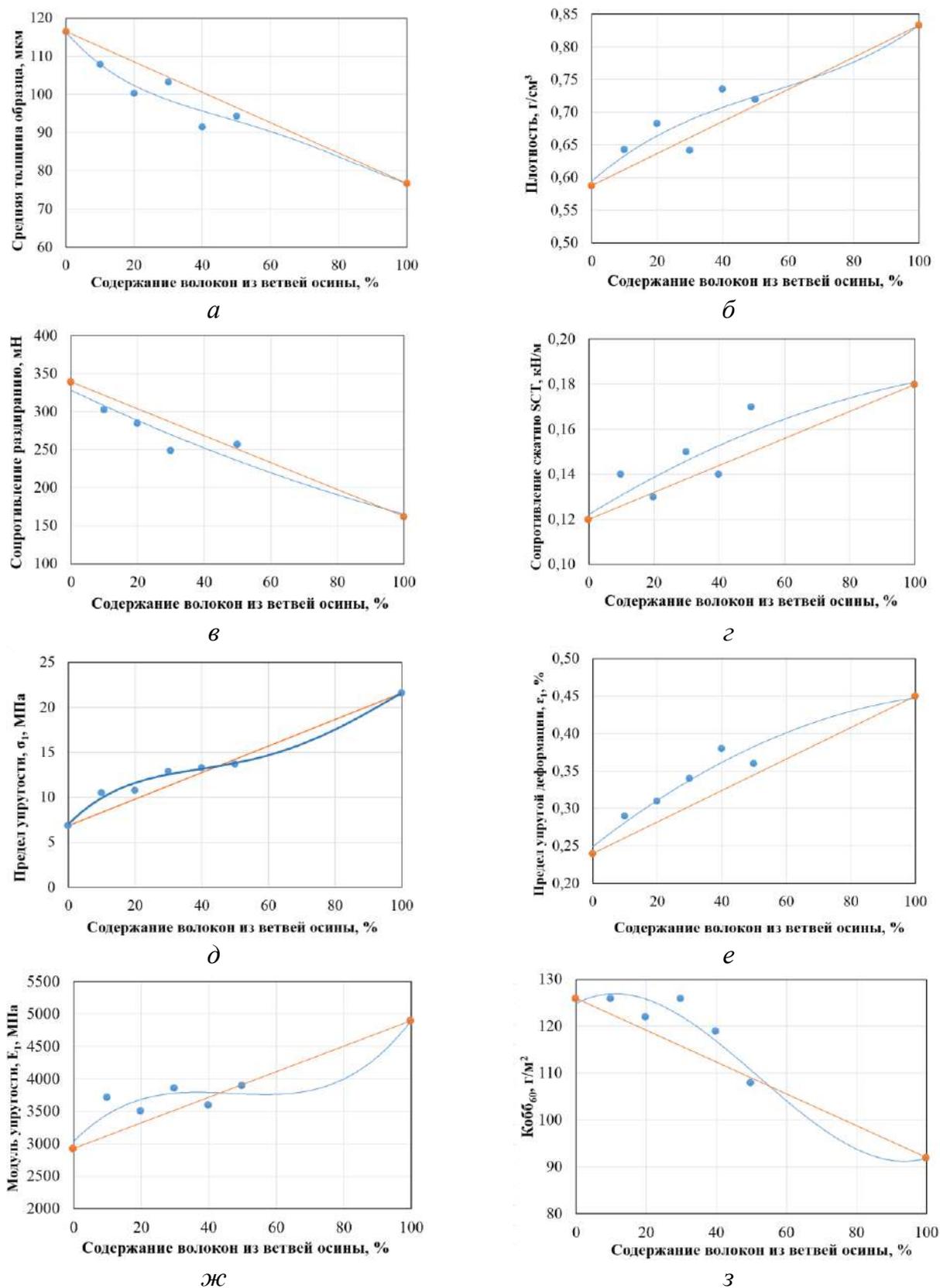


Рисунок 3.26 – Влияние содержания волокон ЦВВ из ветвей осины на физико-механические свойства бумаги: *a* – толщина образца, *б* – плотность, *в* – сопротивление раздиранию, *г* – сопротивление сжатию SCT, *д* – предел упругости, σ_1 , *е* – предел упругой деформации, ϵ_1 , *ж* – начальный модуль упругости E_1 , *з* – впитываемость, Кобб₆₀

Поскольку мелкие волокна ЦВВ из ветвей заполняют пространство в сетке более жестких и более длинных волокон макулатуры, то имеет место общий положительный эффект. При этом результат зависит от вида характеристик.

На рисунке 3.26 показано влияние содержания волокон ЦВВ из ветвей осины на физико-механические свойства бумаги.

В образцах бумаги, полученных из смесей волокон, параметры упругих свойств – модуль упругости E_1 , предел упругости σ_1 , предел упругой деформации ε_1 волокон приобретают промежуточные значения, при этом правило аддитивности в основном соблюдается. Это соответствует изменению толщины и плотности листов.

Изменение разрушающих характеристик (прочность при растяжении J_p , разрывная длина L , разрушающее напряжение σ_p , деформация разрушения ε_p , работа разрушения A_p) при введении ЦВВ в композицию бумажной массы происходит скачкообразно и не по линейному закону, но в соответствии с величиной межволоконных сил связи $F_{св}$.

Оптимальная дозировка ЦВВ из ветвей составляет 30 %, что позволяет улучшить прочность и жесткость бумаги из макулатуры на 20...35 %, и повысить уровень потребительских свойств оберточной бумаги при выполнении требований сокращения ресурсоемкости и экологии.

Выводы по результатам эксперимента:

Упаковочных виды бумаги, композиция которых состоит из смеси макулатуры МС 56Б и волокон сульфатной ЦВВ из ветвей осины, в полной мере соответствуют требованиям ресурсосбережения и экологии и парадигме полного использования биомассы дерева.

Введение в композицию упаковочной бумаги из макулатуры мелких и тонких волокон из ветвей осины при условии отдельного 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 бумага 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.

3.3.3 Применение теории смесей к волокнистым композициям из первичных и вторичных волокон

При создании бумаги и картона с целевым набором физико-механических свойств традиционно применяется использование в композиции бумажной массы двух или более различных волокнистых полуфабрикатов, различающихся по свойствам, морфологии и размерам волокон, прочности и когезионной способности. Такие волокнистые композиции позволяют улучшить свойства бумажного материала, по сравнению с бумагой из одного полуфабриката. Классическим примером является смешивание в композиции бумаги хвойной и лиственной целлюлозы, целлюлозы и механической массы, древесной целлюлозы и целлюлозы из недревесного сырья. Таким образом, при оптимальной организации технологии составления композиции бумаги, за счет использования преимуществ каждого полуфабриката, можно добиться улучшения целевых свойств (прочности, растяжимости, печатных свойств, гладкости, воздухопроницаемости и т.п.), а также экономических показателей производства.

В рамках анализа механического поведения лабораторных образцов из бумажной массы, полученной путём смешивания различных типов небелёных волокнистых полуфабрикатов, была использована линейная модель смешения, широко применяемая при исследовании композиционных и полимерных материалов. Данная модель основывается на предположении, что совокупные механические свойства композита могут быть представлены как взвешенное среднее значений компонентов с учётом их объемного содержания (V) и характера распределения. Так, для модуля упругости материала E_m из смеси компонентов армирующей (А) и матричной (М) фаз теоретически должно выполняться условие [39]:

$$\frac{1}{(V_A/E_A) + (V_M/E_M)} < E_m < (V_A E_A + V_M E_M) \quad (15)$$

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

Аналогично можно построить зависимости для предела прочности на разрыв σ_p и деформации разрушения при разрыве ε_p .

$$\frac{1}{(V_A/E_{1A}) + (V_M/E_{1M})} < E_1 < (V_A E_{1A} + V_M E_{1M}) \quad (16)$$

$$\frac{1}{(V_A/\sigma_A) + (V_M/\sigma_M)} < \sigma_p < (V_A \sigma_A + V_M \sigma_M) \quad (17)$$

$$\frac{1}{(V_A/\varepsilon_A) + (V_M/\varepsilon_M)} < \varepsilon_p < (V_A \varepsilon_A + V_M \varepsilon_M) \quad (18)$$

где E_1 – начальный модуль упругости композита;

σ_p – напряжение разрушения композита;

$E_A, \sigma_A, \varepsilon_{pA}$ – модуль упругости, напряжение разрушения и деформация разрушения армирующей фазы;

$E_M, \sigma_M, \varepsilon_{pM}$ – модуль упругости, напряжение разрушения и деформация разрушения матрицы;

V_A, V_M – объемное содержание армирующей фазы и матрицы соответственно.

Данная модель была использована в методологии, описанной в работе Комарова и Филиппова [42], где подчёркивается, что значительные различия в упругих свойствах фаз могут приводить к перенапряжениям на границе раздела, что ухудшает прочность материала. Использование модели в рамках данного исследования позволило оценить влияние состава смеси волокнистых полуфабрикатов на механические свойства конечного продукта. Эти соотношения задают диапазон, в котором, согласно теории, должны находиться экспериментальные значения для реального волокнистого композита. Это способствует лучшему пониманию взаимосвязи между микроструктурой, составом и макромеханическим поведением бумаги.

В нашей системе в качестве армирующей фазы приняты это волокна ЦВВ из ветвей осины, а в качестве матрицы макулатура МС-5Б, поскольку она обладает гораздо большей полидисперсностью по размерам волокон, составляющих макулатуру. В данном случае армирующая фаза попутно обладает и более высокой способностью к образованию межволоконных сил связи и, кроме этого, способствует повышению плотности и равномерности структуры листа.

Проверка применимости теории смесей проведена на трех характеристиках, оценивающих разные аспекты прочности и жесткости целлюлозно-бумажного материала: начальный модуль упругости E_1 , как характеристика упругих свойств; предел прочности на разрыв (разрушающее напряжение) σ_p , как характеристика прочности материала, и деформация разрушения при разрыве ε_p , как характеристика растяжимости материала.

В таблице 3.11 представлены результаты применения уравнений из формулы (16) для модуля упругости смесей ЦВВ из ветвей осины и макулатуры, где приведены экспериментальные и теоретические значения для начального модуля упругости E_1 . Графически полученные зависимости показаны на рисунке 3.27.

Таблица 3.11 – Сравнение экспериментальных значений модуля упругости E_1 с теоретическими значениями, $E_A = 4900$ МПа; $E_M = 2930$ МПа

Содержание волокон ЦВВ из ветвей осины %	V_A	V_M	E_1 , МПа	$\frac{1}{V_A/E_A + V_M/E_M}$	$V_A E_A + V_M E_M$	ΔE , МПа	ΔE , %
0	0	1	2930	2930	2930	0	0,0
10	0,1	0,9	3720	3052	3127	593	15,9,
20	0,2	0,8	3510	3186	3324	186	5,3
30	0,3	0,7	3860	3332	3521	339	8,8
40	0,4	0,6	3600	3491	3718	-118	3,3
50	0,5	0,5	3900	3667	3915	-15	0,4
100	1	0	4900	4900	4900	0	0,0

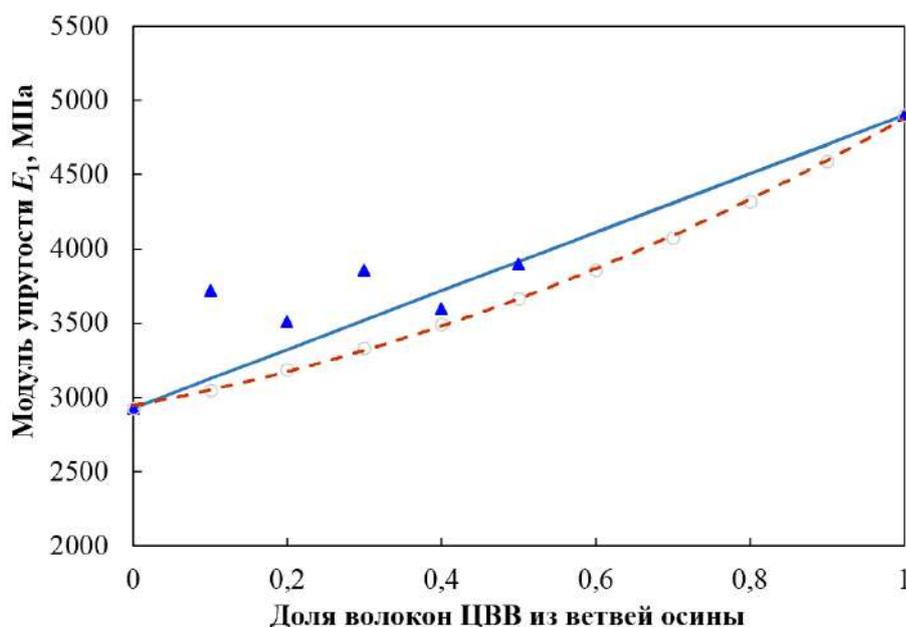


Рисунок 3.27 – Сопоставление теоретических и фактических значений модуля упругости в бумаге из смесей

Фактические значения модуля упругости оказались выше, чем теоретически рассчитанные по уравнениям (16), рисунок 3.27, более сильная разница проявилась для малых доз армирующего компонента, а затем разница не превышала допустимых значений. Это указывает на наличие других факторов, влияющих на модуль упругости,

среди которых ключевым моментом является повышенная величина межволоконных сил связи и повышенная гибкость волокон ЦВВ из ветвей осины.

При растяжении образца, в упругой области происходит деформирование волокон и межволоконных сил связи. Вследствие того, что внутриволоконные связи более прочные, за поведение материала в зоне упругости отвечают главным образом, межволоконные силы связи, в том числе, за счет того, что одновременно обеспечивается повышенная плотность материала. Поэтому именно межволоконные связи и плотность структуры определяют модуль упругости листа бумаги. Дополнительным фактором является уменьшение толщины листа при введении коротковолокнистого компонента с гибкими волокнами, а толщина входит в формулу для вычисления модуля упругости.

Как теоретические значения, так и фактические величины модуля упругости увеличиваются с увеличением содержания волокон осины, что отражает армирующий эффект волокон.

В таблице 3.12 представлены результаты применения уравнений из формулы (17) для разрушающего напряжения бумаги из смесей ЦВВ из ветвей осины и макулатуры, где приведены экспериментальные и теоретические значения для разрушающего напряжения σ_p . Графически полученные зависимости показаны на рисунке 3.28.

Таблица 3.12 – Сравнение полученных значений разрушающего напряжения σ_p с теоретическими значениями, $\sigma_A = 46,13$ МПа; $\sigma_M = 28,45$ МПа

Содержание волокон ЦВВ из ветвей осины %	V_A	V_M	σ_p , МПа	$\frac{1}{V_A/\sigma_A + V_M/\sigma_M}$	$V_A \sigma_A + V_M \sigma_M$	$\Delta\sigma$, МПа	$\Delta\sigma$, %
0	0	1	28,45	28,45	28,45	0,0	0,0
10	0,1	0,9	41,67	29,58	30,22	11,45	27,5
20	0,2	0,8	37,43	30,81	31,99	5,44	14,5
30	0,3	0,7	43,65	32,15	33,75	9,90	22,7
40	0,4	0,6	36,69	33,60	35,52	1,17	3,2
50	0,5	0,5	40,59	35,19	37,29	3,30	8,1
100	1	0	46,13	46,13	46,13	0,0	0,0

В отличие от модуля упругости E_1 , который характеризует деформационные свойства материала в упругой области деформирования, разрушающее напряжение σ_p – это характеристика прочности материала, определяемая в момент разрушения образца.

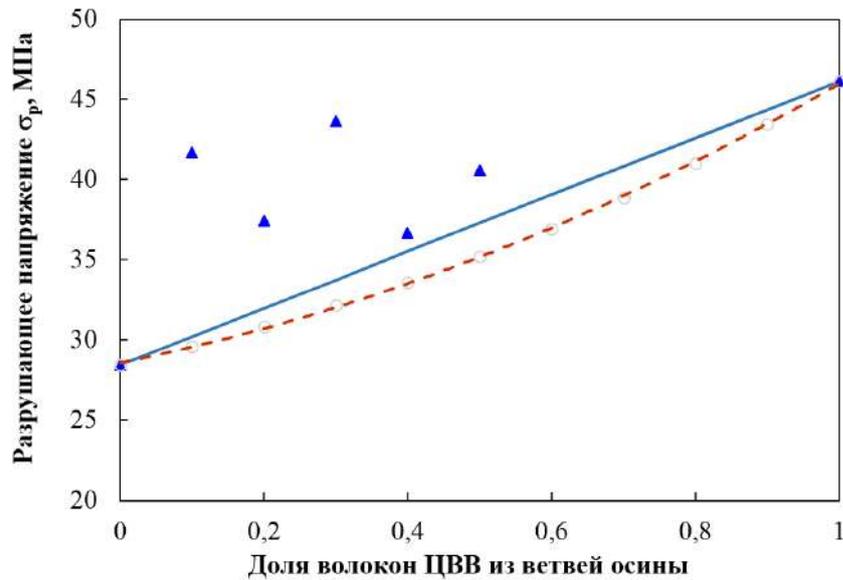


Рисунок 3.28 – Сопоставление теоретических и фактических значений разрушающего напряжения в бумаге из смесей

При нагружении материала до величины напряжения, вызывающей процессы разрушения структуры, развивается процесс деформирования волокон и значительное разрушение межволоконных связей. Развитие деформаций в этой области вызвано извлечением фрагментов волокон и концов неразорванных волокон из структур, в которых они были ранее зафиксированы межволоконными связями. Поэтому в данный момент ключевое значение приобретает прочность самих волокон.

Результаты анализа поведения смесей показывают, что фактические значения разрушающего напряжения в большинстве случаев выше теоретических, при этом разница достигает больших значений, 23-27 %. Это указывает, что при введении первичных волокон в композицию бумаги из макулатуры проявляется структурная синергия фаз: совместная работа волокон осины и макулатуры даёт лучший результат.

В таблице 3.13 представлены результаты применения уравнений из формулы (18) для деформации разрушения бумаги из смесей ЦВВ из ветвей осины и макулатуры, где приведены экспериментальные и теоретические значения для деформации при разрушении образца при растяжении ε_p . Графически полученные зависимости показаны на рисунке 3.29.

Таблица 3.13 – Сравнения полученных значений деформации разрушения ε_p с теоретическими значениями, $\varepsilon_{pA} = 1,46\%$; $\varepsilon_{pM} = 1,90\%$

Содержание волокон ЦВВ из ветвей осины %	V_A	V_M	$\varepsilon_p, \%$	$\frac{1}{V_A/\varepsilon_A + V_M/\varepsilon_M}$	$V_A \varepsilon_A + V_M \varepsilon_M$	$\Delta\varepsilon_p, \%$	$\Delta\varepsilon_p, \%$
0	0	1	1,900	1,900	1,900	0,0	0,0
10	0,1	0,9	2,300	1,844	1,856	0,456	19,3
20	0,2	0,8	2,090	1,792	1,812	0,298	13,3
30	0,3	0,7	2,310	1,742	1,768	0,568	23,5
40	0,4	0,6	1,860	1,696	1,724	0,164	7,3
50	0,5	0,5	2,020	1,651	1,680	0,369	16,5
100	1	0	1,460	1,460	1,460	0,0	0,0

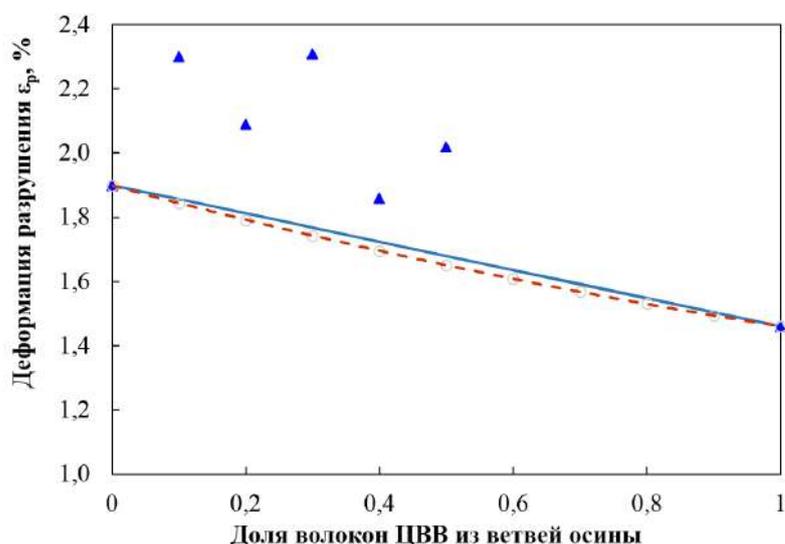


Рисунок 3.29 – Сопоставление теоретических и фактических значений деформации разрушения в бумаге из смесей

Деформация разрушения ε_p – это характеристика предельной способности материала к растяжению, определяемая в момент разрушения образца. Повышенная растяжимость бумаги обеспечивается за счет длины и прочности волокна, а также его гибкости при условии наличия определенного уровня межволоконных связей в структуре материала перед испытанием. Именно введение тонких и гибких волокон ЦВВ из ветвей обеспечивает условия для повышения растяжимости структуры образца: в диапазоне от 10 % до 50 % экспериментальные значения всегда выше теоретических. Это показывает, что добавление умеренного количества волокон осины (10–50%) приводит к улучшению деформации при разрушении, то есть материал становится более эластичным перед разрушением.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что 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. Эти результаты подчёркивают важность опоры на практические эксперименты для оценки характеристик композитных материалов, вместо полного полагания на теоретические модели, которые могут не учитывать тонкие структурные и физические взаимодействия между компонентами.

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 отдельной 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 сопротивлению 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 неволокнистых 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЦВВ – сульфатная целлюлоза, полученная из веток осины;

УПЩ – установка производства щепы;

V – выход целлюлозы, %;

t – температура, °С;

ρ – плотность, г/см³;

а.с.д. – абсолютно сухая древесина;

а.с.ц. – абсолютно сухая целлюлоза;

l_{ср} – средняя длина волокон, мм;

δ – средняя толщина образца, мкм;

b – средняя ширина волокон, мкм;

l_s – средняя длина одного сегмента, мм;

F – разрушающая нагрузка, Н;

f – средний фактор формы волокон, %;

u – средний угол излома, °;

n – среднее число всех изломов на одно волокно, шт;

m – доля мелочи, %;

Кобб₆₀ – впитываемость бумаги, г/м²;

F_{св} – межволоконные силы связи, МПа;

СВ – содержание сухих веществ, г\л;

СП – степень помола, °ШР;

L₀ – нулевая разрывная длина, км;

L – разрывная длина, км;

S_t – жесткость при растяжении, кН/м;

J_П – индекс продавливания, кПа·м²/г;

J_R – индекс раздиранья, мН·м²/г;

J_P – индекс прочности при растяжении, Н·м/г;

σ_p – разрушающее напряжение, МПа;

ε_p – деформация разрушения, %;

A_p – работа разрушения, мДж;

E₁ – начальный модуль упругости, МПа;

E_2 – модуль упругости в области предразрушения, МПа;

S_b – жесткость при изгибе, мН·м;

P – сопротивление продавливанию, кПа;

R – сопротивление раздиранию, мН;

E_A – модуль упругости разрушения волокна, МПа;

σ_A – напряжение разрушения волокна, МПа;

E_M – модуль упругости разрушения матрицы, МПа;

σ_M – напряжение в матрице, соответствующее разрушающей, МПа;

V_A – объемное содержание волокон в смеси, %;

V_M – объемное содержание матрицы в смеси, %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Азаров В.Л., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины синтетических полимеров: учебник для вузов. – СПб.: Лана. 2010. – 624 с.
2. Аким Э.Л., Романов В.А. Структура и релаксационные свойства бумаги как основы целлюлозных композиционных материалов // Химия древесины, 1986. – №4. – С. 12–17.
3. Андреев А.А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 10. – С. 148–155.
4. Антропова Е. Бумажные истории. – Архангельск: Карандаш, 2016. 76 с .
5. Аписит О.С., Клименко А.В. Бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов. – М.: Лесн. пром-сть, 1972. – 88 с.
6. Бабаханова Х.А., Галимова З.К., Абдуназаров М.М., Исмаилов И.И. Целлюлозная масса из коры веток тутовника для бумажной отрасли // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С.193–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-193-200
7. Байбардина Т.Н., Грищенко И.И. Проблемы реализации инновационных проектов по производству экологически безопасных упаковочных материалов // Прикладные науки. Экология. – 2006. – № 9. – С. 179–182.
8. Балаченкова А.П. История бумаги производства: учебное пособие и хрестоматия.. – СПб.: СПбГТУРП. 2011. – 52 с.
9. Белоглазов В.И., Комаров В.И., Дьякова Е.В., Гурьев А.В. Структурно-размерные свойства волокон полуфабрикатов как фактор, определяющий качество тарного картона. / В сб.: «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов». Матер. I Междун. научно-технич. конфер. (Архангельск, 13–17 сентября 2011 г.) // Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2011. С. 57–63.
10. Ванчаков М.В., Кулешов А.В., Александров А.В., Гаузе А.А., Технология и оборудование переработки макулатуры: учебное пособие. Часть I. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД., 2019. 107 с.
11. Ванчаков М.В., Кулешов А.В., Дубовой Е.В., Казаков Я.В., Дубовый В.К. Технология и оборудование переработки макулатуры. Изд., испр. и доп. – СПб. : Изд-во Политехн. Ун-та, 2017. – 322 с.

12. Вураско А.В., Агеев М.А., Агеев А.Я. Технологии получения, обработки и переработки бумаги и картона : учебное пособие ; изд. 2-е, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2021. – 276 с.

13. Гелес И.С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск: Институт леса Карельского научного центра РАН, 2007. – 499 с.

14. Гелес И.С., Коржицкая З.А. Биомасса дерева и ее использование. Петрозаводск: Карельский науч. Центр РАН, 1992, 230 с.

15. Глезман Е.А., Житнюк В.А., Ширинкина Е.С., Вайсман Я.И., Белкина Е.В. Повышение эффективности технологического процесса производства бумажной продукции из макулатуры путем применения систем удержания-обезвоживания волокна // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2014. – №7 – С. 62–68.

16. ГОСТ 10700-89. Макулатура бумажная и картонная технические условия. 1996. 11 с.

17. ГОСТ 10700-97. Макулатура бумажная и картонная. Технические условия 2003. 8с.

18. ГОСТ 12605-97, ИСО 535-91. Бумага и картон. Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба), 2001, р. 8.

19. Дубовый В.К. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона: Учебное пособие / В.К. Дубовый, А.В. Гурьев, Я.В. Казаков, В.И. Комаров; под ред. проф. проф. В.И. Комарова. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 230 с.

20. Дулькин Д.А. Свойства целлюлозных волокон и их влияние на физико-механические характеристики бумаги и картона / Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И., Блинова Л.А. // Под ред. В.И. Комарова. –Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2011. – 176 с.

21. Ерыхов Б.П., Фляте Д.М. О чувствительности физико-механических критериев оценки макроструктуры бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн., 1977. – №5. – С. 119–124.

22. Жвирблайт А.К., Вураско А.В., Минакова А.Р. Технология, переработка и рециклинг бумаги и картона. Рекомендации Методического комитета Инженерно-экологического колледжа. Протокол № 2 от 27 октября 2011 г. – 13 с.

23. Житнюк В.А., Белкина Е.В., Ширинкина Е.С., Вайсман Я.И. Исследование возможности рециркуляции скопа в технологическом процессе картонно-бумажного

производства //Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2015 – №4(20) – С. 138–149.

24.Зарубина А.Н., сердюкова Ю.В., Веревкин А.Н, кононов Г.Н. Технология производства бумаги и картона. Технология производства бумаги и картона. Учебно-методическое пособие. Издательство Московского государственного университета леса. 2016. с.41.

25.Иванов С.Н. Исследование показателя прочности бумаги – сопротивления раздиранию / Иванов С.Н., Лещенко И.Г. // Совершенствование процессов целлюлозно-бумажного производства: сб. науч. тр. ЛЛТА. – Л., 1969. – С. 110-122

26.Иванов С.Н. Силы сцепления волокон в бумаге // Бум. пром-сть – 1948. – №3. – С. 8–17.

27.Иванов С.Н. Технология бумаги. –М.: Лесн. пром-сть, 1970. – 696 с.

28.Иванов Ю.С., Никандров А.Б. Технология целлюлозы. Варочные растворы, варка и отбелка целлюлозы: учебно-практическое пособие. – СПб.: СПбГТУРП. 2014. – 41 с.

29.Игнатенко Р.В. Экология лишайника, *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. в растительных сообществах Карелии: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. –СПб., 2018. 26 с.

30.Казаков Я.В, Комаров В.И., Свид. № 2001610526 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (КОМПЛЕХ заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ), 2001, с. 1.

31. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растительного сырья. 2014. №1. С. 269–275.

32.Казаков Я.В. Характеристики деформативности как основополагающий критерий в оценке качества целлюлозно-бумажных материалов / Казаков Яков Владимирович. дисс. ... д-р техн. наук. 05.21.03. Архангельск, 2015. – 534 с.

33. Казаков Я.В., Корельская Е.А. Технология расширенной сравнительной характеристики структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов по данным автоматического анализатора волокна // 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.31–37.

34. Казаков Я.В., Манахова Т.Н. Бумагообразующий потенциал хвойной небеленой целлюлозы: современный взгляд через автоматический анализатор волокна / Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. №5. С.34–39.

35. Клёсов А.А. Древесно-полимерные композиты. – СПб: Изд-во Научные основы и технологии, 2010. – 736 с.

36. Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И., Богданович Н.И., Соколов О.М., Кутакова Н.А., Селянина Л.И. Комплексная химическая обработка древесины, Архангельск: АГТУ, 2003, 344с.

37. Комаров А.С. Анализ производства бумаги из вторичного сырья и анализ марок макулатуры // Известия ТулГУ. Технические науки, 2022. С. 482–487.

38. Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. – 440 с.

39. Комаров В.И., Гурьев А.В., Елькин В.П. Механика деформирования тароупаковочных материалов: учебное пособие. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2002. – 171 с.

40. Комаров В.И., Казаков Я.В. Влияние размола на корреляцию фундаментальных свойств (по Кларку) сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // Актуальные проблемы рационального использования природных и энергетических ресурсов Европейского Севера: сб. науч. тр. – Архангельск, 1993. – С. 85–90.

41. Комаров В.И., Казаков Я.В. Связь фундаментальных свойств (по Кларку) неразмолотой сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // Изв. вузов. Лесн. журн. – 1993. – № 2-3. – С. 112–116.

42. Комаров В.И., Филиппов И.Б. Смеси волокнистых полуфабрикатов и их влияние на свойства бумажной массы // Изв. вузов. Лесн. журн. – 1997. – №6. – С. 45–54.

43. Коробов В.В., Рушнов Н.П. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). – М.: Экология, 1991. – 288 с.

44. Кузнецова А.А. Осина в Карелии. Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2003. – С. 62–63.

45. Миловидова Л.А., Комарова Г.В. Производство сульфатной целлюлозы : метод. указания к выполнению лабораторных работ. – Архангельск, Изд-во АГТУ, 2001. – 31 с.
46. Михайлов Л. Е. Осина. – М.: Агропромиздат, 1985. – 72 с.
47. Нигматуллина Л.И., Шайбакова Ю.А., Корниенко Н.Д. Анализ влияния качества исходного сырья на прочностные свойства бумаги и картона // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2014. – №12. – С. 39–40.
48. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины: учеб. для вузов. – М.: Лесн. пром-сть, 1985. – 264 с.
49. Новожилов Е.В., Попова Г.И., Грошев А.С. Выделение и определение компонентов древесины: метод. указания к выполнению лабораторных работ. – Архангельск, Изд-во АГТУ, 2008. – 58 с.
50. Пенкин А.А., Казаков Я.В. Изменение структурно-морфологических свойств вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С.157–172.
51. Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 2. Характеристика волокнистой мелочи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 169–179.
52. Полянин И.А., Макаров В.Е. Изготовление технологической щепы из некондиционной и пневой древесины с последующей ее переработкой // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 10. – С. 292–297.
53. Производство бамбуковой целлюлозы. [Electronic resource]. – Режим доступа: <https://www.cellulose.ru/applications/bamboo-pulp-making>
54. Соловьёв Я., История возникновения бумаги. Её прошлое и настоящее. Научный руководитель: Казакова У.В. МАОУ «Гимназия № 67», г. 2025. Нижний Новгород. 20 с.
55. Тарасова В.Н. Структура и динамика эпифитного моховолишайникового покрова в среднетаежных лесах Северо-запада европейской части России: автореф. дис. ... док. биол. наук: 03.02.08. СПб., 2017. 46 с.
56. Теплоухова М.В. Технология сульфатной целлюлозы: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2021. – 55 с.
57. Терентьев К.Ю., Вашукова К.С., Аксенов А.С. и др. Химия биополимеров растительного сырья и технических полуфабрикатов. Учеб. пособие. – Архангельск: Изд-во САФУ, 2023. – 98 с.

58. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3-х т. Справочные материалы. – СПб.: ЛТА, 2002. – 419 с.

59. Товароведение упаковочных материалов и тары для продовольственных товаров: учебное пособие/ Е.А. Стебенева, Н.А. Каширина, Н.В. Байлова, Е.И. Рыжков, И.М. Глинкина. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – 259 с.

60. Фляте Д.М. Свойства бумаги. Изд. 4-е, испр. и доп. СПб.: НПО «Мир и семья-95», ООО «Интерлайн», 1999. – 384 с.

61. Хакимова Ф.Х., Хакимов Р.Р., Носкова О.А. Молодая древесина ели и березы – полноценное сырье для целлюлозно-бумажной промышленности // Химия растительного сырья, 2018. – №3. – С. 261–270.

62. Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Шевелева С.А., Хакимов Р.Р. Утилизация отходов лесозаготовок с получением полуфабриката для картона. // Прикладная экология. Урбанистика. 2018. – № 2. – С. 60–73.

63. Хакимова Ф.Х., Синяев К.А., Хакимов Р.Р., Носкова О.А. Молодая тонкомерная древесина от рубок ухода за лесом – резерв сырья для производства целлюлозы и бумаги // Лесной вестник /Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. – С. 88–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-88-97.

64. Чавчавадзе Е.С. Атлас древесины и волокон для бумаги / Е.С. Чавчавадзе З.Е. Брянцева, Е.В. Гончарова и др. // – М.: Ключ, 1992. – 336 с.

65. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Чубинский М.А., Чаузов К.В. Физика древесины : Учеб. пособие по выполнению лабораторных работ. – СПб.: СПбГЛТУ. 2015, – 67 с.

66. Ширинкина Е.С., Житнюк В.А., Вайсман Я.И., Монченко С.В. Ресурсосберегающая технология обращения с отходами переработки макулатурной массы // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 19, – № 7. – С. 10–15.

67. Akim E. Short update on the Russia pulp and paper markets, Saint Petersburg state university of technologies and design, Forest Product & Development. 2007

68. Al-Anati O. Paper recycling: a topical application. Journal of Environment and Industry. 2019. Vol: 15, p:45–60.

69. Alen R. Basic chemistry of wood delignification. In Papermaking Science and Technology Series. P. Stenius, editor. Vol. 3. Fepet, Helsinki. Finland. 2000. Pp. 58–104.

70. Alkadi N. Forests and Paper Industry in Syria. Syrian Journal of Economic Research, Vol: 22, Issue 3, 2017. Pp. 51–59.

71. Al-Mallah Abdul-Razzaq Raouf Sulaiman, Al-Dawski, Aref. Study of some anatomical and mechanical characteristics of pressure wood in *Pinus brutia* Ten., University of Mosul, College of Agriculture and Forestry, *Al-Rafidain Agricultural Journal*, Volume: 37, Issue: 4, 2009. P.12.

72. Andreeva A.A. Resource Saving and Use of Wastes from the Harvesting and Processing of Wood Raw Materials: Fundamental and Applied Studies of the Problem and Results, 2014, no. 10, pp. 148–155.

73. Dutt D., Tyagi C.H. Comparison of various eucalyptus species for their morphological, chemical, pulp and paper making characteristics. *Indian Journal of Chemical Technology*, Vol: 18, 2011 pp: 145-151.

74. Ervasti I. and Miranda R. Paper recycling frame. *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol: 174. P: 35–44.

75. Fadi K., Paper Industry in the Middle East: A Case Study of Syria, *Economics and Industry Journal*, Issue 56, Vol: 8, pp. 47–89.

76. Gabriele B., Cerchiara T., Salerno G., Chidichimo G., Vetere M., Gassano A. A new physical-chemical process for the efficient production of cellulose fibers from Spanish broom. *Bioresource Technology*. 2010. P: 427–729.

77. Gardner K.H., Blackwell J. The structure of Native Cellulose, *Biopolymers*, Vol:13, N: 10, 1974, pp: 975–992.

78. Guan G., Phanthong P. Cellulose, its uses and composition. *Carbon Resources Conversion*. Vol: 1, 2018 Pp: 32–43.

79. Guang ping Han, Qinglin Wut, John Z.lut. Selected properties of wood strand and Oriented Strand Board from small-diameters Southern pine trees, *wood and fiber science, society of wood science and technology*, 2006, p. 621–632.

80. Haji Hassan Najjar, Latif. Investment of Forest Products. University of Mosul. College of Agriculture and Forestry. 1980, 192 p.

81. Hameed M. Science of timber and forest products. Damascus University Publications, Faculty of Agricultural Engineering. 2007, 504 p.

82. Hamid amin K. Paper industry in the Abbasid era. Yuzungobyl-One University, 2018. 285 p.

83. Hosni I., Recycling technology is a successful investment and a treatment for youth unemployment, *Economics Corner*, 2012. Issue 105, pp. 44–52.

84. Jan A., Rahman A.U., Khan F.U. and Shah J. Investigation of pine needles for pulp/paper industry. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research*, 49(6). 2006. – P. 407–409.
85. Karki T. Drying quality of European aspen (*Populus tremula*) timber. *Holz Roh-Werkstoff*. 2002, –p. 369–371.
86. Karlsson H., Rinnevuot T. *Fiber Guide: Fiber Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry*. Kista, AB Lorentzen & Wetter, 2006. 120 p.
87. Latha A., Arivukarasi M.C., Keerthana C.M., Subashri R., Priya V. Paper and pulp industry manufacturing and treatment processes. (*IJERT*). 2018.
88. Latha M.C. Arifokarasi C.M., Kirtana R., Subachri V. Paper and Pulp Industry Manufacturing and Processing Processes. 2018, *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*.
89. Lundeen C. Preserving paper materials: current and future research and developments in the paper industry, Graduate School of Library Science, University of Hawaii, 2015 pp. 73–88.
90. Mackes H., Lynch D.L. The Effect of Aspen Wood Characteristics and Properties on utilization. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research. 2001. P.: 429–440.
91. Miranda I., Pereirat H., The Variation of chemical composition and pulping yield with age and growth factors in young *Eucalyptus globules*. Lisboa Portugal. 2001. 144 p.
92. Munasinghe M. Environmental Economics and Sustainable Development, The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 1993, 122 p.
93. Mustafa S., Effect of heat treatments on the properties of cellulose fibers. Master's thesis, Department of Chemistry, Faculty of Science, Cairo University. 1990.
94. Nahal I., Pine Brut and its forests in Syria and the Eastern Mediterranean countries. Publications of the University of Aleppo, Faculty of Agriculture. 1982, 257 p.
95. Nguyen Hong Phuc. Lam giay tu cay tre (Making Paper from Bamboo) / Nguyen Hong Phuc. [Electronic resource]. – Режим доступа: <https://khoahocnet.com/2018/05/03/nguyen-hong-phuc-lam-giay-tu-cay-tre-making-paper-from-bamboo/>
96. Oluwafemi A.O. Wood properties and selection for Rotation Length in Caribbean Pine (*Pinus caribaea* Moret) Grown in Afaka, Nigeria. *American-Eurasian J. Agric Environ. Sci*, 2(4): 359–363.

- 97.Omar A., Muqalled H., Paper: Its History and Development. Egypt, Alexandria University, Faculty of Arts. 2016, 485 p.
- 98.Oriyomi O. M., Oloke D. A., Khatib J. A Review of Recycled Use of Post-consumer Waste Paper in Construction, First International Conference on Bio-based Building Materials, June 22nd-24th, 2015, Clermont-Ferrand, France, p. 711.
- 99.Pearce D., Barbier E., Markandeya A. Sustainable Development: Economics and Environment in the Third World, IIED Journal, 1990, p. 228.
- 100.Pen R.Z., Ryazanova T.V. Integrated Chemical Processing of Wood, Krasnoyarsk: Sib GTU, 2012, 158 p.
- 101.Pirralho M., Flores D., Sousa B.V., Quilho T., Knapic S. and Pereira H. Evaluation on paper making potential of nine Eucalyptus species based on wood anatomical features. Industrial Crops and Products. 2014. P: 327–334.
- 102.Pratima B. Biermann's handbook of pulp and paper: raw material and pulp making. Elsevier publications. 2018. 668 p.
- 103.Pratima B. Pulp and Paper Industry: Chemicals. Elsevier publications. 2015. 343 p.
- 104.Purahan K. Products of Pulp and Paper Industry. Journal of Energy Technology in Egypt. Issue 45. Vol: (7). 2015. Pp. 88–94.
- 105.Qanbari J., Nashawi A. Paper recycling. Damascus University, Faculty of Science, Department of Chemistry. 2015, Pp: 98.
- 106.Qasir W. Wood Industries. University of Mosul, Directorate of Dar Al-Kutub for Printing and Publishing. 1990 p. 344 .
- 107.Rahma A. Wood Science. Aleppo University Publications, faculty of Agriculture. 2012. P: 574.
- 108.Rauf Z., and Raza S., Properties and utilization of locally grown Chinar (*Platanus orientalis*) wood. The Pakistan Journal of Forestry. 2012.Vol: (62).
- 109.Review of pulping and papermaking properties of aspen Arbokem Inc. 1987 Canada-Alberta Forest Resource Development Agreement. 1 C.P. 187. Beaconsfield. Quebec H9W ST7, Project 1451-16. 92 p.
- 110.Riki J.T.B., Standa O.A. and Oluwadara A.O. Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and paper production. Journal of Research in forests, Wild life and the Environment, 2019. Vol:11 (3)

111. Rullifank K. F., Roefinal M. E., Kostanti M., Sartika L., & Evelyn. Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol: 845, 012005., 2020. Pp: 11.
112. Sable I., Jonsons A., Grinfeld U., Vikele L., Irbe I., and Treimanis A. Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*Pinus contorta*) and scots pine (*Pinus sylvestris*). Article in Bioresources. DOI: 10.2015.P: 1771–1783.
113. Sadhasivam S., Swaminathan K. and Savitha S., Deployment of *Trichoderma harzianum* WL1 laccase in pulp bleaching and paper industry effluent treatment. Journal of Cleaner Production 18. 2010. P: 799–806.
114. Samariha A., Rudi H., and Kiaei M., 2019. Production of NSSC Cellulosic fibers from *Eucalyptus camaldulensis*. Vocational University (TV4), Tehran, Iran. Vol: 2, Issue 5/5/2019.
115. Santo A., Amaral M., Gil N., Pereira H. and Simoes R., Impact on pulp yield and pulp properties of *Acacia melanoxylon* density wood. The Original Article First Online. 2010. P: 486–479.
116. Saravana V., Parthiban K.T., Kumar P., and Marimuthu P. Wood characterization studies on *Melia dubia* cav. for pulp and paper industry at different age gradation. Research Journal of Recent Sciences. Vol: 2. 2013. P: 183–188.
117. Sharma A.K. Anatomical, morphological, and chemical characterization of *Bambusa tulda*, *Dendrocalamus hamiltonii*, *Bambusa balcooa*, *Malocana baccifera*, *Bambusa arundinacea* and *Eucalyptus tereticornis* / Sharma A.K., Dutt D., Upadhyaya J.S., Roy T.K. // BioResources, 2011. 6(4). pp. 5062–5073.
118. Sigoillo C., Camarero S., Vidal T., Rocord E., Asther M. and Martinez T.A. Comparison of different fungal enzymes for bleaching high-quality paper pulps. Journal of Biotechnology. 2005. 115 (333-343).
119. Sjostrom E., Wood Chemistry. Fundamentals and Applications. Second edition, San Diego: 1993, Academic press. 292 p.
120. Sridach W. Pulping and paper properties of Palmyra palm fruit fibers. Songklanakarin J. Sci. Technol, Vol: 32(2). 2010. P: 201–205.
121. Syrian Ministry of Economy. Report on the import of paper and cardboard in Syria for the year 2022. Syrian Ministry of Economy 2023.

122. Syrian Ministry of Industry. Report on the industrial sector in Syria for the year 2020. Syrian Ministry of Industry 2021.
123. Taher M. Forest Management in Syria: Policies and Practices, Lattakia University Publications. Faculty of Agriculture, Department of Forestry. 2017. Pp. 269.
124. Tripathi P., Kumar V., Joshi G., Sat S., Panwar, S., Naithani, S., and Nautiyal, R. A Comparative Study on Physio-Chemical Properties of Pulp and Paper Mill Effluent. Journal of Engineering Research and Applications. Vol: 3. 2013. P: 811–818.
125. Tripathi S.K., Bhardwaj N.K. Pulping and papermaking of cornstalk. In Pulping and papermaking of nonwood plant fibers. Avantha Centre for Industrial Research & Development, Paper Mill Campus, Yamuna Nagar, Haryana, India. 2023. Pp. 63–99.
126. Tsoumis G. Wood as raw material. Pergamon Oxford. Descriptors Madera Arboles Maderables 1969. Pp: 276.
127. Vargarianno D., Yudyarty G., Hindaranto O. Improve recycled paper using xylan extracted from corn cob. Engineering Major Courses. Vol: 849. 2020. P: 71–76.
128. Viikari L., Suurn kki A., Granqvist S., Raska L., Roguskis A. Forest products: Biotechnology in pulp and paper processing. Encyclopedia of Microbiology. Available online 17 February 2009.
129. Wan J., Wang Y., and Xiao Q. Effects of hemicellulose removal on cellulose fibers structure and recycling characteristics of eucalyptus pulp. Bioresource Technology. 2010. P: 4577–4583.
130. Wang Y., Cellulose Fiber Dissolution in Sodium Hydroxide Solution at Low Temperature. Georgia Institute of Technology December. 2008.
131. World Bank Group, Environmental Health, and Safety Guidelines for Paper and Pulp Mills (EHS), 2007.
132. Zanon A., Cravalho A., Carneiro O., Damasio P., Valenzuela, P., Colonette J. A pulp made of wood from wind-blown Eucalyptus trees. CERN Journal. Vol: 22. 2016.
133. <https://www.nkj.ru/archive/articles> /9315/ (Наука и жизнь, обратная сторона упаковки) №03 март 2025

ПРИЛОЖЕНИЯ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
 «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
 (ФГАОУ ВО САФУ)

УТВЕРЖДАЮ



Научный руководитель
 ИОЦ Мирового уровня
 «Российская Арктика»
 доктор физ.-мат. наук,
 профессор

М.К. Есеев
 М.К. Есеев

МЕТОДИКА

представления результатов измерения структурно-размерных
 свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом
 анализаторе волокна
 МВИ 03-2025

СОГЛАСОВАНО

Директор ИТЦ «Современные
 технологии переработки
 биоресурсов Севера»

Ю.В. Севастьянова
 Ю.В. Севастьянова

РАЗРАБОТАНО

Профессор кафедры целлюлозно-
 бумажных и лесохимических
 производств

Я.В. Казаков
 Я.В. Казаков

Исполнитель

Ф. Албаррам
 Ф. Албаррам

Архангельск 2025

Настоящая методика выполнения измерений (далее МВИ) устанавливает методы комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна L&W FiberTester.

МВИ является методикой анализа структурно-размерных свойств волокна и распространяется на волокнистые полуфабрикаты целлюлозно-бумажного производства.

К определяемым характеристикам относятся:

- среднеарифметические, средневзвешенные по длине, средневзвешенные по массе величины длины, ширины и фактора формы;
- результаты статистической обработки полученных массивов данных по длине, ширине и фактору формы;
- данные для построения диаграмм фракционного состава (взвешивание по длине) по длине, ширине и фактору формы;
- данные для построения двумерных диаграмм длина-ширина волокон (взвешивание по длине)
- массив данных для экспорта в базу данных сравнительного анализа геометрических характеристик волокнистых полуфабрикатов (взвешивание по длине)

1 Требования к показателям точности измерения

1.1 Границы погрешности измерения величины геометрических характеристик волокон при применении МВИ составляет от 0,2 до 0,5 % от средней величины результатов измерения для волокон различного происхождения и назначения.

1.2 Границы погрешности установлены в ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» путем математической обработки экспериментальных данных, полученных при измерении величин геометрических характеристик волокон на автоматическом анализаторе волокна L&W FiberTester.

2 Требования к средствам измерений, испытательному и вспомогательному оборудованию, материалам

2.1 При выполнении комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester применяются средства измерения, испытательное и вспомогательное оборудование, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Порядковый номер, наименование средств измерений, испытательного и вспомогательного оборудования, нормативных документов	Метрологические и технические характеристики
1 Весы лабораторные электронные по ГОСТ 24104	Цена деления 1 мг
2. Автоматический анализатор волокна L&W FiberTester (Code 912)	- средняя длина (арифметическая, взвешенная по длине, взвешенная по массе) волокон, мм; - средняя ширина волокон, мкм; - средний фактор формы волокон – частное от деления проекции длины на фактическую длину, характеризует степень прямизны;

	<ul style="list-style-type: none"> - доля мелочи (по длине) в образце – взвешенный процент волокон короче 0,2 мм относительно числа волокон длиннее 0,2 мм; - грубость, то есть масса волокна на единицу длины, мкг/100 м; - средний угол излома, град.; - среднее число изломов на 1 мм длины волокна, шт.; - среднее число изломов на волокно, шт.; - средняя длина сегмента, мм. <p>Характеристика фракционного состава:</p> <ul style="list-style-type: none"> - доля волокон в классах длины (в мм), % – 75 классов через 0,1 мм; - доля волокон в классах ширины (в мкм), % – 50 классов через 2 мкм; - средняя ширина волокон в классах длины; мкм; - средний фактор формы волокон в классах длины, %
--	--

2.2 Допускается применение других средств измерений и испытательного оборудования с метрологическими и техническими характеристиками не ниже представленных в таблице 1.

2.3 При выполнении комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester применяется программное обеспечение, представленное в таблице 2.

Таблица 2

Порядковый номер, наименование программного обеспечения	Сведения о ПО
1 Программное обеспечение анализатора волокна L&W Fiber Tester	Программное обеспечение управления процедурой измерения и генерирования отчётов о структурно-морфологических свойствах волокнистых полуфабрикатов, используемых в производстве бумаги и картона
2 Электронная таблица MS Excel для комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов	Собственная разработка, используется электронная таблица MS Excel, лицензионный пакет Standard Enrollment 91666614 (MS Windows, MS Office и др.) Правообладатель ФГАОУ ВО САФУ.
3 Электронная таблица MS Excel для сравнительного анализа структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов по данным автоматического анализатора волокна	Собственная разработка, используется электронная таблица MS Excel, лицензионный пакет Standard Enrollment 91666614 (MS Windows, MS Office и др.) Правообладатель ФГАОУ ВО САФУ.

3 Метод измерения

Комплексное представление результатов производят путем импорта результатов измерений длины, ширина и фактора формы примерно 20000 волокон из текстового файла в формате ANSI, формируемого программным обеспечением L&W FiberTester, в электронную таблицу Excel и вычисления набора статистических характеристик, массивов данных для построения диаграмм фракционного состава, и массива данных для экспорта в систему сравнительного анализа.

4 Требования безопасности и охраны окружающей среды

4.1 Работы необходимо проводить в специальном помещении, в котором поддерживаются заданные температура и относительная влажность воздуха.

4.2 Персонал, занятый выполнением измерений, должен быть обеспечен спецодеждой.

4.3 Искусственное освещение в лабораториях должно соответствовать СНиП 23–05–95: освещенность на лабораторных столах должна составлять 500 лк, коэффициент естественной освещенности – 3,5 %.

4.4 При проведении измерений и компьютерной обработке их результатов рабочее место исследователя должно соответствовать требованиям СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03.

5 Требования к квалификации оператора

К выполнению измерений и обработке их результатов допускаются специалисты, имеющие высшее (неполное высшее) образование по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология», имеющие опыт проведения измерений структурно-морфологических свойств волокон, и обладающие компетенциями в области использования персонального компьютера.

6 Требования к условиям измерений

При выполнении комплексного представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна L&W FiberTester соблюдают следующие условия

6.1 Навеска образцов технической целлюлозы для анализа

Образец технической целлюлозы в количестве, соответствующем примерно 2 г сухих волокон, взвешенный на аналитических весах с точностью до 1 мг, должен быть диспергирован в 2000 мл воды с получением сильно разбавленной волокнистой суспензии, рассчитать концентрацию полученной суспензии.

6.2 Навеска образцов для выполнения измерений:

В стакан, объемом 150 мл (из комплекта прибора), перенести объем суспензии, соответствующий 0,15 г сухих волокон.

7 Подготовка к выполнению измерений

Порядок подготовки средств измерения, испытательного и вспомогательного оборудования, применяемого для выполнения измерений по данной методике, указан в эксплуатационной документации на соответствующие средства измерений, испытательного и вспомогательного оборудования.

8 Порядок проведения измерений

При получении и расширенной обработке результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов выполняют следующие операции:

8.1 Выполняют анализ пробы технической целлюлозы на автоматическом анализаторе волокна L&W FiberTester согласно инструкции по эксплуатации прибора и методике проведения анализа, используемого в ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»

8.2 Экспорт результатов измерений на автоматическом анализаторе волокна L&W FiberTester в текстовый файл ANSI

8.2.1 Перейти на вкладку ПО FiberTester «Report» (Отчеты), подвкладка «Standard Report» (Стандартный отчет), рисунок 1. В списке исследованных образцов (правая часть окна) выбрать образец, результаты которого выбраны для экспорта.

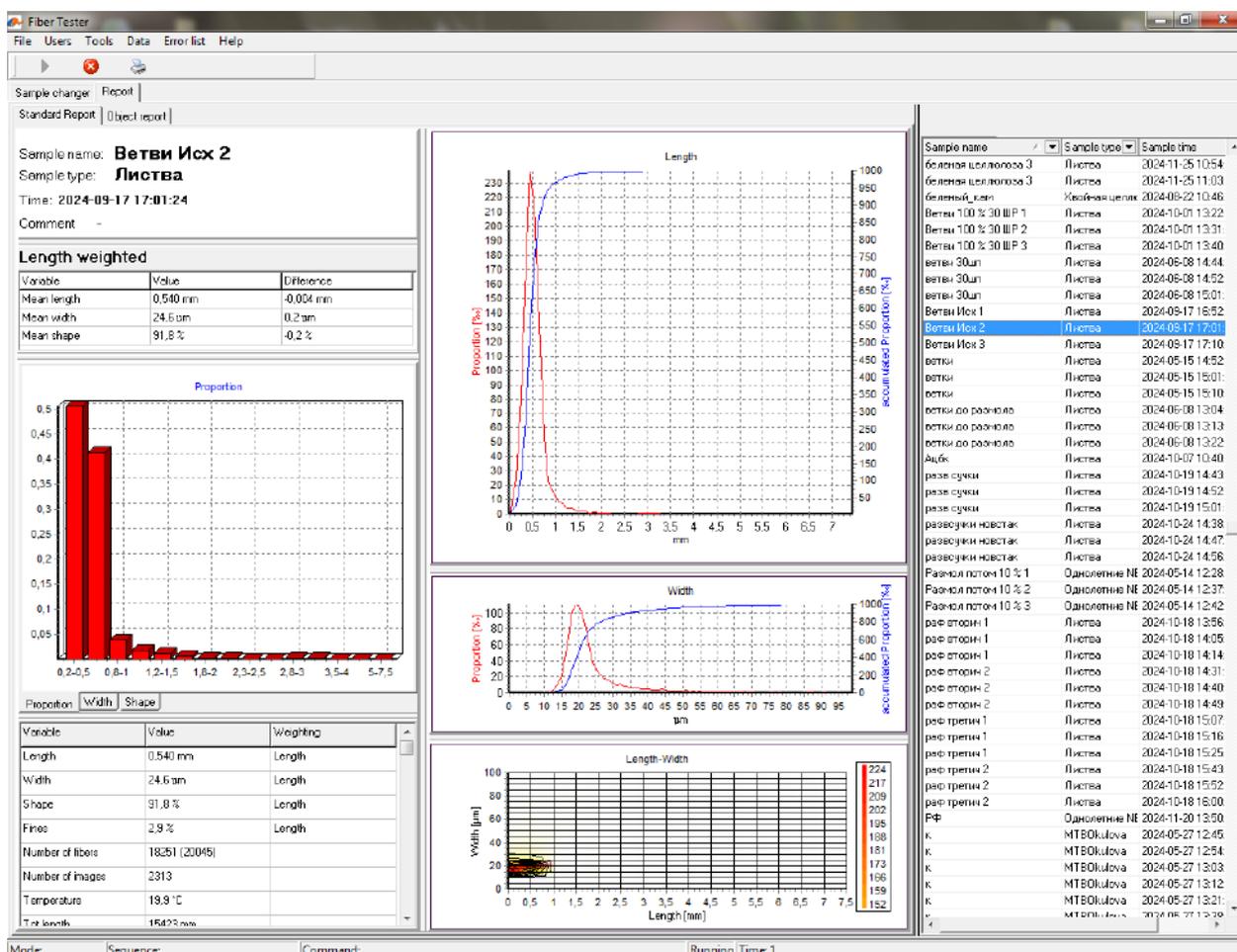


Рисунок 1 – Выбор образца для экспорта результатов измерений в окне ПО L&W Fiber Tester

8.2.2 Щелкнуть правой кнопкой манипулятора мышь на выбранном образце, и в появившемся контекстном меню, выбрать пункт «Raw data» → «fiber», рисунок 2, а. Появится окно с исходными результатами измерений длины (мкм), ширины (мкм) и фактора формы (%) порядка 20 тысяч волокон, пронумерованными в левом столбце, рисунок 2, б. Данные в каждой строке разделены знаком табуляции.

В первой строке – сведения об образце:

- наименование образца, которое присвоил пользователь (Ветви исх);

- шаблон обработки результатов в ПО Fiber Tester (Листва);
- дата и время проведения анализа в формате ГГГГ-ММ-ДД

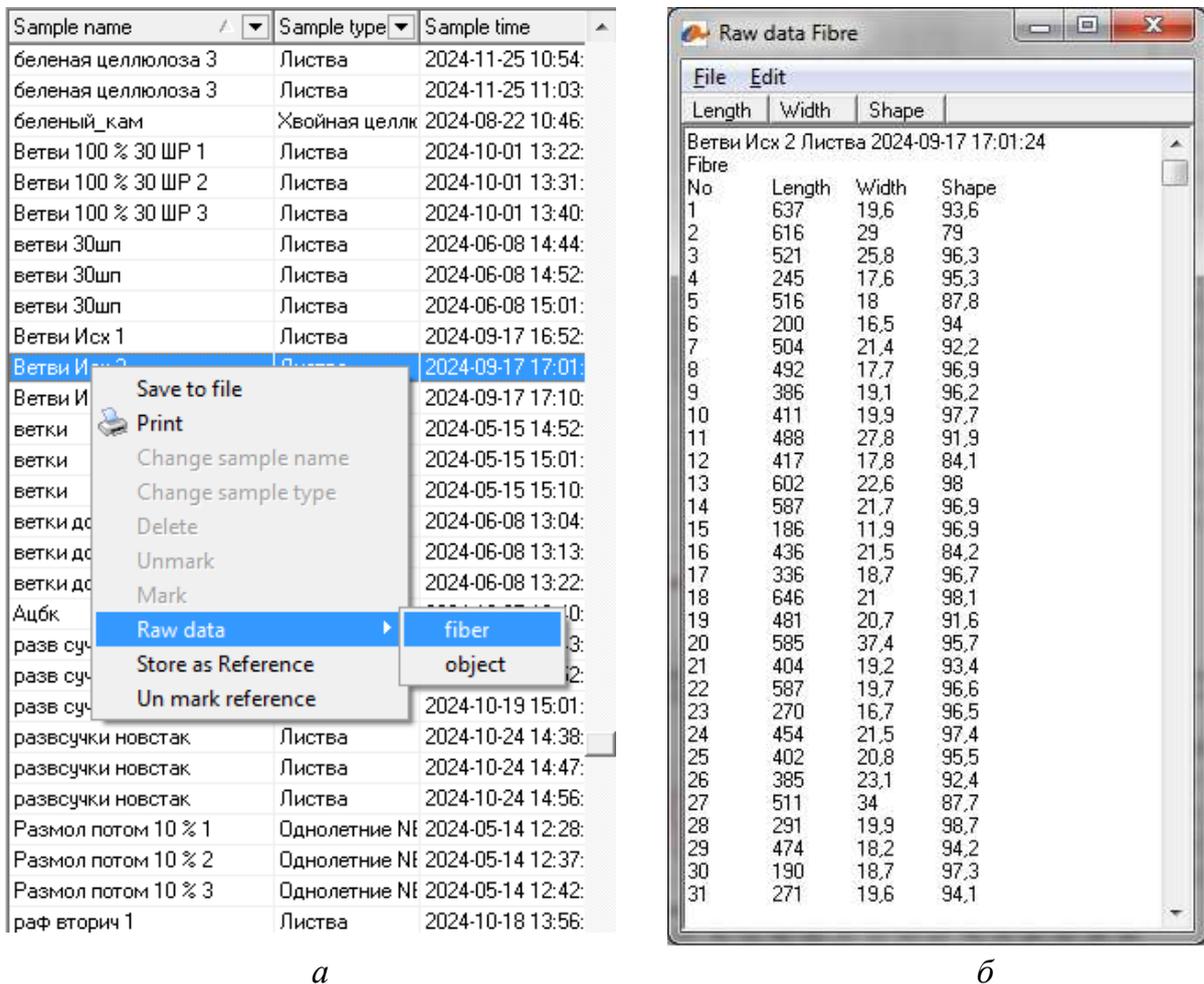


Рисунок 2 – Экспорт результатов измерений характеристик волокон в текстовый файл

8.2.3 Сохранить результаты в текстовый файл «*.txt», рисунок 3. Папку для записи и имя файла можно задать самостоятельно.

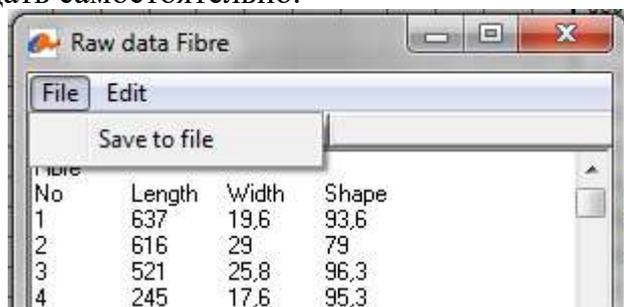


Рисунок 3 – Сохранение результатов измерений в текстовый файл

8.2.4 Результаты можно экспортировать в любой момент времени после проведения измерений. Результаты испытания сохраняются в базе данных и доступны из стандартного списка отчетов в течении 3-х месяцев. После этого они автоматически переносятся в базу данных истории (Historical Data), к которой можно получить доступ, выбрав соответствующий пункт из меню «Data», рисунок 1.

8.3. Импорт результатов измерений характеристик волокон в электронную таблицу MS Excel

8.3.1 Для импорта данных из текстового файла «*.txt» в электронную таблицу MS Excel, используйте пункт меню «Файл» → «Открыть». Выбрать необходимую папку, определить тип открываемого файла – текстовые файлы (*.prn; *.txt; *.csv), выбрать нужный файл, рисунок 4.

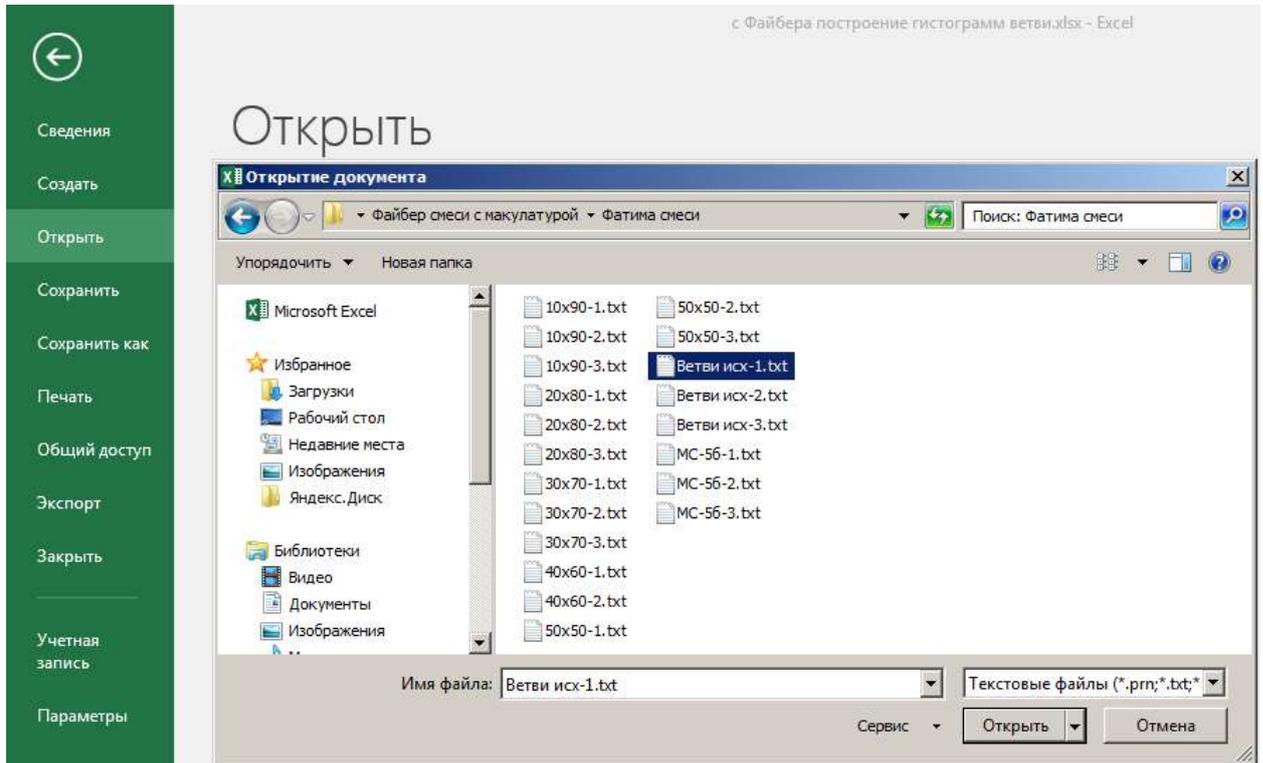
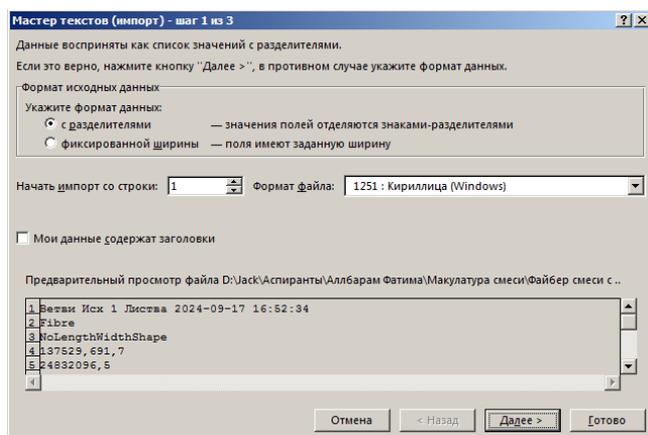


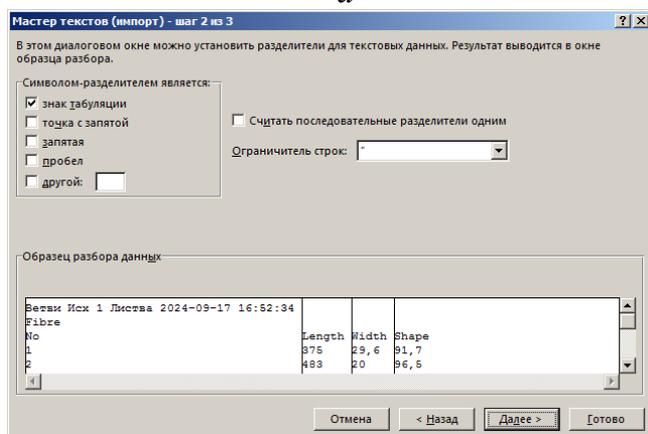
Рисунок 4 – Выбор образца для экспорта результатов измерений в окне ПО L&W Fiber Tester

8.3.2 Задать параметры импорта данных в мастере импорта текстов, рисунок 5. На первом шаге работы мастера убедиться, что формат исходных данных выбран «с разделителями», рисунок 5, а, и нажать кнопку **Далее >**. На втором шаге работы мастера убедиться, что символом-разделителем является знак табуляции, рисунок 5, б. Убедиться, что в нижней части окна мастера данные правильно распределились по столбцам и нажать кнопку **Готово**. Данные будут загружены в новое окно электронной таблицы, рисунок 5, в, лист с данными получит имя импортируемого текстового файла.

В клетке A1 размещены сведения об образце; в блоке клеток, начиная с клетки B4, расположены данные, которые надо выделить и скопировать в буфер обмена Windows.



а



б

	A	B	C	D	E
1	Ветви Исх 1 Листва 2024-09-17 16:52:34				
2	Fibre				
3	No	Length	Width	Shape	
4	1	375	29,6	91,7	
5	2	483	20	96,5	
6	3	525	25,6	91,3	
7	4	246	22,5	96,8	
8	5	498	18,2	95,4	
9	6	917	21,5	83	
10	7	305	17,8	90,6	
11	8	345	18,4	96,3	
12	9	287	18	97,1	
13	10	523	18,8	95,8	
14	11	394	21,4	94,5	
15	12	350	19,2	95,5	
16	13	1569	66,2	69,2	
17	14	414	25,5	88,9	
18	15	411	16,9	95,2	
19	16	577	23,2	97,5	
20	17	207	24,1	95,2	
21	18	564	23,1	92,9	
22	19	338	16,7	94,5	
23	20	341	16,8	95,4	

в

Рисунок 5 – Импорт результатов измерений характеристик волокон из текстового файла в электронную таблицу

8.4 Обработка данных в электронной таблице

8.4.1 Комплексное представление результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester выполняется в электронной таблице «Обработка данных Файбера.xlsx», рисунок 6.

8.4.2 Ввод данных для обработки:

8.4.2.1 В клетку B1 (желтый фон) – ввести наименование образца. Это наименование будет использовано на всех графиках как заглавие диаграммы.

8.4.2.2 Блок клеток B22:D20122 предназначен для ввода исходных данных для обработки. Общее количество строк данных может составлять от 5000 до 20100. Данные, скопированные в буфер обмена *Windows* в п. 8.3.2, вставить, начиная с клетки B22. Обратить внимание на количество выделенных строк в блоке. После вставки проверить, чтобы старые данные, были полностью перекрыты новыми. В случае, если старых данных было больше, удалить лишнее. Если данных больше, чем 20100, также можно удалить лишнее, поскольку обработка производится только для максимум 20100 строк.

8.4.3 Анализ введенных данных.

8.4.3.1 Для всего массива данных выполняется первичная статистическая обработка, блок клеток A4:D10, рисунок 6. Следует обратить внимание на минимальные и максимальные значения, и количество измерений (n). Поскольку данные в эти массивы

заносятся автоматически после их обработки ПО L&W Fiber Tester, то возможно появление значений, не соответствующих реальности.

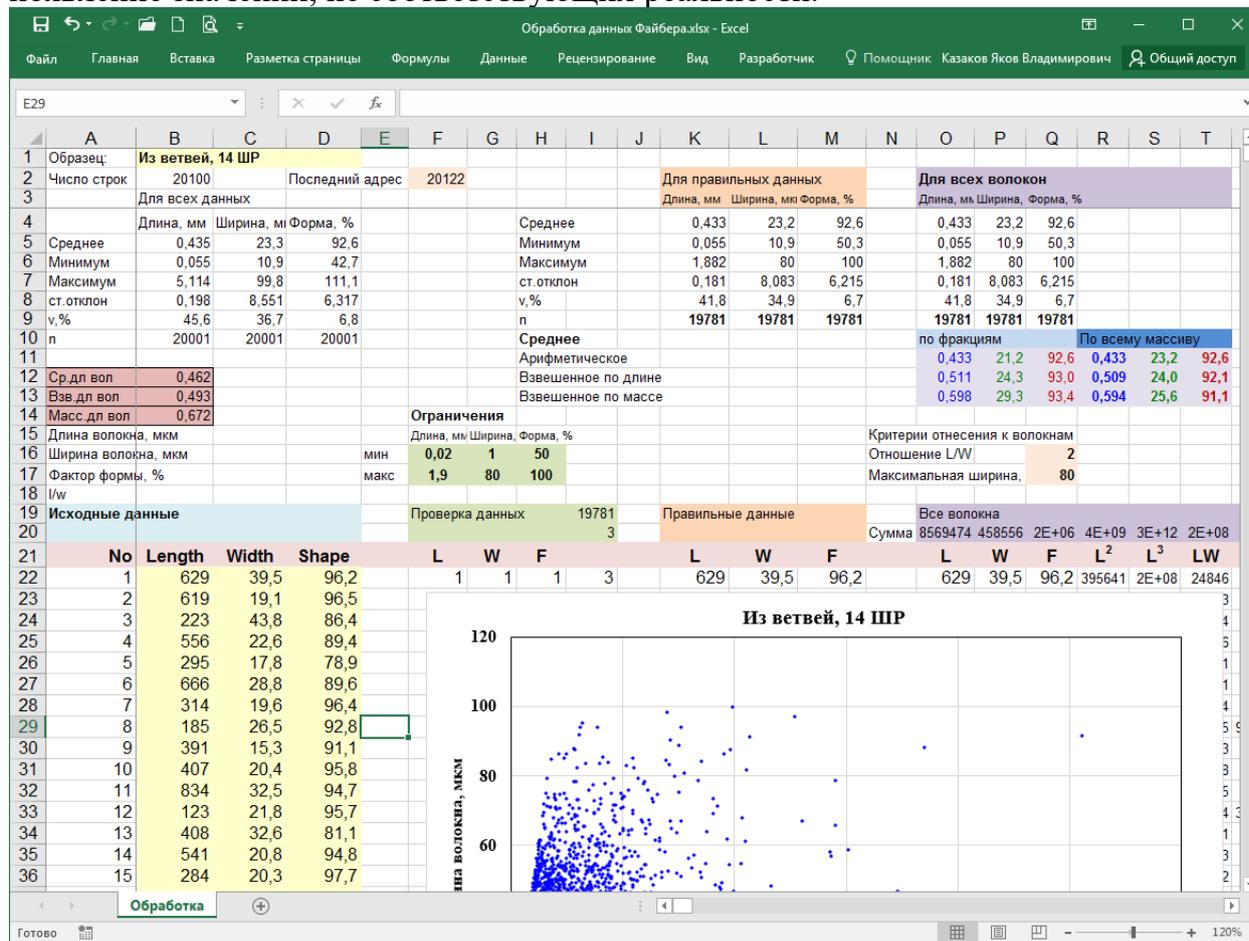


Рисунок 6 – Электронная таблица «Обработка данных Файбера.xlsx»

8.4.3.2 Визуальное представление о первичных массивах данных дают 3 графика, расположенные вертикально один под другим (столбцы от F до T): зависимость ширины от длины волокна, рисунок 7, а, зависимость фактора формы от длины волокна, рисунок 7, б, зависимость фактора формы от ширины волокна, рисунок 7, в.

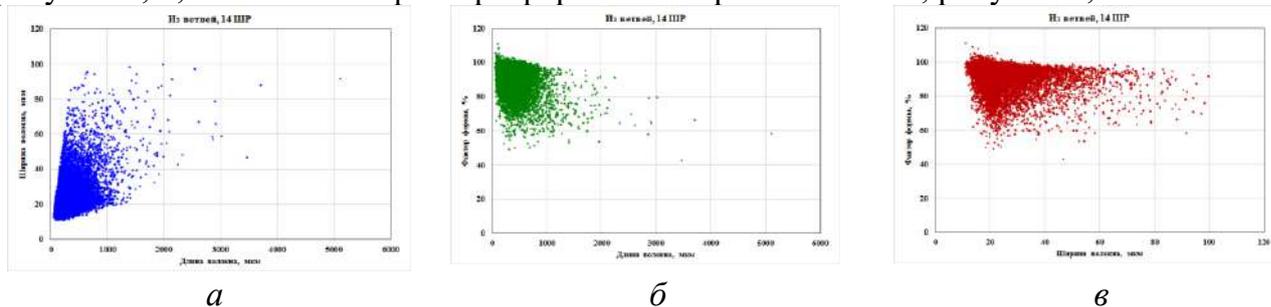


Рисунок 7 – Зависимости между длиной, шириной и фактором формы волокон в первичном импортированном массиве

8.4.4 Установка фильтров исходных данных для отбора корректных значений.

8.4.4.1 Блок клеток E14:H17, рисунок 6, предназначен для задания ограничений на размеры объектов в целях исключения некорректных значений (для исключения неволокнистых включений, артефактов и шумов, не соответствующих параметрам

волокна). Ограничения устанавливаются на основании априорной информации о виде целлюлозы, породе древесины и т.п. Например, величина фактора формы по определению не может быть выше 100 %, а нахождение в лиственной целлюлозе волокон с длиной выше 5 мм не является достоверным.

8.4.4.2 Данные, определенные как корректные, размещаются в столбцах **K, L, M**, начиная с клетки **K22**. Результаты их статистической обработки выведены в блоке клеток **N2:M9**, рисунок 6.

8.4.4.3 Блок клеток **N15:Q17**, рисунок 6, предназначен для разделения объектов на волокна и неволокнистые. Критерием отнесения к волокнам является отношение длины (мкм) к ширине (мкм) волокон (L/W), клетка **Q17**, и максимальная ширина (мкм) клетка **Q18**, что позволяет исключить из расчета частицы и обрывки сосудов, грязь, смоляные частицы и т.д.

8.4.4.4 Данные, определенные как волокна, размещаются в столбцах **O, P, Q**, начиная с клетки **O22**. Результаты их статистической обработки выведены в блоке клеток **O2:Q9**, рисунок 6.

8.4.4.5 Визуальное представление о корректных данных, определенных как волокна, дают 4 графика, которые в электронной таблице размещены вертикально во втором столбце графиков (столбцы с **U** до **AI**): зависимость ширины от длины волокна, рисунок 8, *а*, зависимость фактора формы от длины волокна, рисунок 8, *б*, зависимость фактора формы от ширины волокна, рисунок 8, *в*, зависимость отношения длины к ширине (L/W) от длины волокна, рисунок 8, *г*.

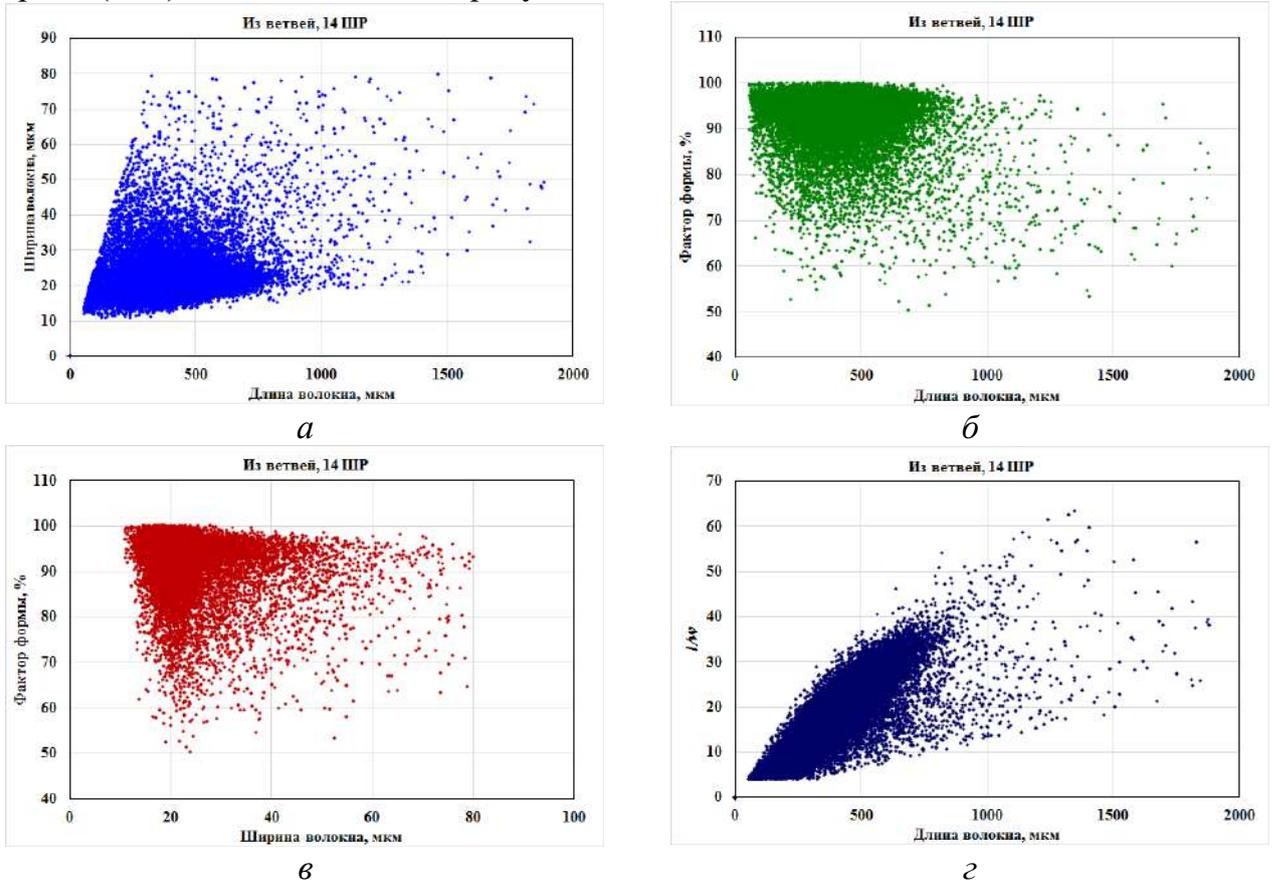


Рисунок 8 – Зависимости между длиной, шириной, фактором формы волокон и отношением L/W в массиве данных, определенных как корректные волокна

8.4.5 Разделение выборки данных на волокна и мелочь.

8.4.5.1 Блок клеток **Y15:AA16**, рисунок 9, предназначен для разделения объектов на волокна и мелочь. Критерием отнесения к мелочи является длина волокна менее значения, указанного в клетке **Z16**. При проведении анализа пробы волокнистой массы на анализаторе L&W Fiber Tester принято, что мелочь – это объекты с длиной менее 0,2 мм (200 мкм), и вычисление средних размеров и величин структурно-морфологических свойств производится для волокон без мелочи. Для образцов волокнистых полуфабрикатов этот предел может быть различным, например, для целлюлозы из недревесного сырья (травянистого), этот пределе может быть уменьшен, а для образцов с крупными или длинными волокнами – увеличен.

	A	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	
1	Образец:																
2	Число строк		Волокна без мелочи									Мелочь					
3			Длина, мм Ширина, Форма, %									Длина, м Ширина, Форма, %					
4		сред	0,459	23,3	92,5							сред	0,141	21,3	93,1		
5	Среднее	мин	0,201	11	50,3							мин	0,055	10,9	59		
6	Минимум	макс	1,882	80	100							макс	0,2	49,3	100		
7	Максимум	ско	0,165	8,194	6,270							ско	0,040	6,397	5,530		
8	ст.отклон	v,%	36,0	35,1	6,8							v,%	28,0	30,1	5,9		
9	v,%	n	18179	18179	18179							n	1602	1602	1602		
10	n		по фракциям			По всему массиву						По всему массиву					
11			0,460	21,4	92,6	0,459	23,3	92,5				0,141	21,3	93,1			
12	Ср.дл вол		0,521	24,5	93,0	0,518	24,1	92,1				0,152	21,9	92,8			
13	Взв.дл вол		0,601	29,7	93,4	0,598	25,6	91,1				0,161	22,3	92,7			
14	Масс.дл вол																
15	Длина волокон		Критерий отнесения к мелочи														
16	Ширина волокон		менее						0,2	мм							
17	Фактор формы																
18	l/w																
19	Исходные данные		Волокна без мелочи						Мелочь								
20			8343032	424458	1682090	4E+09	3E+12	2E+08	1E+11	8E+08	4E+11		226442	34098,5	149131	3,5E+07	
21	№	L	W	F	L ²	L ³	LW	L ² W	LF	L ² F		L	W	F	L ²		
22	1	3	629	39,5	96,2	395641	2E+08	24846	2E+07	60510	4E+07	0					

Рисунок 9 – Разделение массива данных на волокна и мелочь

8.4.5.2 Данные, определенные как волокна, размещаются в столбцах **Y, Z, AA**, начиная с клетки **Y22**. Результаты их статистической обработки выведены в блоке клеток **X2:AA9**, рисунок 9.

8.4.5.3 Данные, определенные как мелочь, размещаются в столбцах **AI, AJ, AK**, начиная с клетки **AI22**. Результаты их статистической обработки выведены в блоке клеток **AH2:AK9**, рисунок 9.

8.4.5.4 Визуальное представление о корректных данных, определенных как мелочь, дают 3 графика, которые в электронной таблице размещены вертикально в третьем столбце графиков (столбцы с **AK** до **AU**): зависимость ширины от длины, рисунок 10, а, зависимость фактора формы от длины, рисунок 10, б, зависимость фактора формы от ширины, рисунок 10, в.

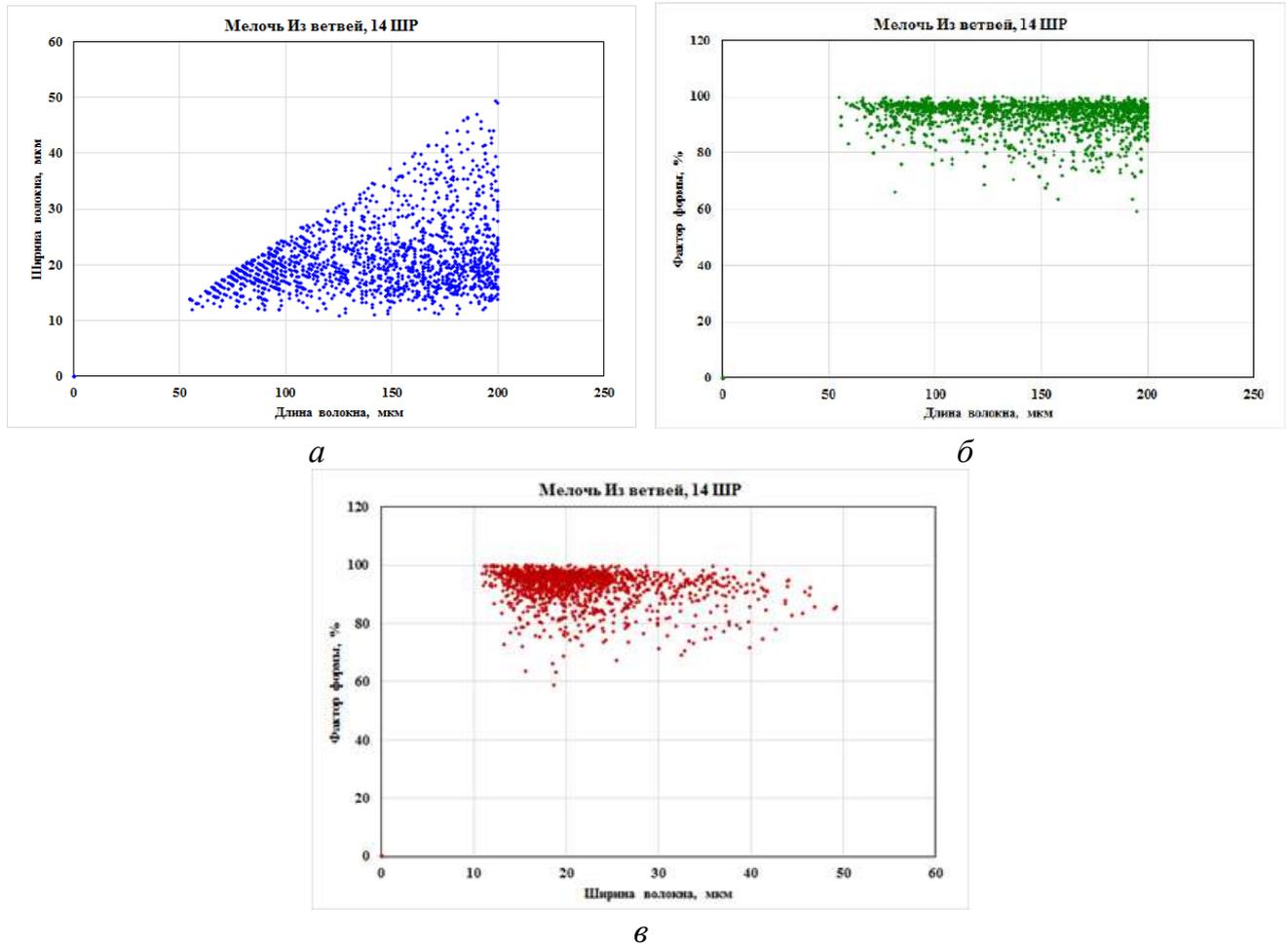


Рисунок 10 – Зависимости между длиной, шириной и фактором формы волокон в массиве данных, определенных как мелочь

9 Алгоритм расчета характеристик волокон

При вычислении средних характеристик массивов полидисперсных массивов параметров волокон применяется технология расчета взвешенных значений.

9.1 Средняя длина волокна определяется несколькими величинами.

Среднеарифметическая длина волокна l_{cp} определяется как простое среднее арифметическое длин l_i распознанных волокон в количестве n штук:

$$l_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \quad (1)$$

На величину среднеарифметической длины волокна очень сильное влияние оказывает мелочь и обрывки волокон: их большое количество увеличивает n , но почти не сказывается на $\sum l_i$. А поскольку массовая доля мелочи также не велика, то величина среднеарифметической длины волокна даёт не очень надёжный результат.

Средневзвешенная длина волокна по длине $l_{срв}$ определяется при допущении, что грубость волокна пропорциональна длине. При известном распределении волокон по фракциям длины, применяется формула:

$$l_{срв} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i l_i^2}{\sum_{i=1}^m n_i l_i} \quad (2)$$

где l_i – средняя длина i -й фракции волокон; n_i – число волокон с длиной l_i ; m – количество классов (фракций) волокон.

Средневзвешенная длина волокна по массе $l_{срм}$ в наибольшей степени учитывает массовую долю волокон и определяется:

$$l_{срм} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i l_i^3}{\sum_{i=1}^m n_i l_i^2} \quad (3)$$

9.2 Процедура взвешивания применяется при расчете среднего значения длины, ширины и фактора формы волокон

9.3 В данной методике применяется взвешивание по длине.

9.3.1 В общем случае применяются следующие расчетные формулы для вычисления среднего значения:

Среднеарифметическая величина свойства:

$$X_{сра} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n 1 \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n 1} \quad (4)$$

где X_i – измеренный параметр каждого волокна (длина, ширина или фактор формы).

9.3.2 Средняя величина свойства, взвешенная по длине волокна:

$$X_{срв} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (5)$$

где l_i – длина каждого волокна.

Средняя длина волокна $l_{срв}$, взвешенная по длине:

$$l_{срв} = \frac{\sum l_i^2}{\sum l_i} \quad (6)$$

Средняя ширина волокна $w_{срв}$, взвешенная по длине:

$$w_{срв} = \frac{\sum w_i l_i}{\sum l_i} \quad (7)$$

где l_i – длина каждого волокна, w_i – ширина этого же волокна

Средний фактор формы волокна $f_{срв}$, взвешенный по длине:

$$f_{срв} = \frac{\sum f_i l_i}{\sum l_i} \quad (8)$$

где l_i – длина каждого волокна, f_i – фактор формы этого же волокна.

9.3.3 Средняя величина свойства, взвешенная по массе (длине-длине):

$$X_{срм} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i l_i^2}{\sum_{i=1}^n l_i^2} \quad (9)$$

Средняя длина волокна $l_{срм}$, взвешенная по массе:

$$l_{\text{срм}} = \frac{\sum l_i^3}{\sum l_i^2} \quad (10)$$

Средняя ширина волокна $w_{\text{срм}}$, взвешенная по массе:

$$w_{\text{срм}} = \frac{\sum w_i l_i^2}{\sum l_i^2} \quad (11)$$

Средний фактор формы волокна $f_{\text{срм}}$, взвешенный по массе:

$$f_{\text{срм}} = \frac{\sum f_i l_i^2}{\sum l_i^2} \quad (12)$$

10 Представление результатов измерений:

10.1 Результаты расчетов представляются в числовом и графическом виде.

10.2 Фракционный состав волокнистого полуфабриката

10.2.1 Подробный фракционный состав

При расчете относительного содержания волокон во фракциях используется взвешивание по длине волокна.

Для длины волокна – по 75 классам длины волокна, размер класса – 0,1 мм, диапазон от 0 до 7,5 мм. Данные для построения графика вычисляются в клетках **СВ19:FA19** и **СВ20:FA20**. Значения для горизонтальной оси вычислены в клетках **СВ6:FA6**, клетки выделены желтым фоном.

Для ширины волокна – по 50 классам ширины, размер класса – 2 мкм, диапазон – от 1 до 99 мкм. Данные для построения графика вычисляются в клетках **FB19:GY19** и **FB20:GY20**. Значения для горизонтальной оси вычислены в клетках **FB6:GY6**, клетки выделены зеленым фоном.

Для фактора формы волокна – по 50 классам, размер класса – 1 %, диапазон – от 50 до 99 %. Данные для построения графика вычисляются в клетках **GZ19:IW19** и **GZ20:IW20**. Значения для горизонтальной оси вычислены в клетках **GZ6:IW6**. клетки выделены светло-коричневым фоном.

Расчет выполняется по двум вариантам, рисунок 11:

– учетом мелочи, числовые значения в клетках **СВ19:FA19**, **FB19:GY19**, **GZ19:IW19**, цвет шрифта – синий;

– без учета мелочи, числовые значения в клетках **СВ20:FA20**, **FB20:GY20**, **GZ20:IW20**, цвет шрифта – красный.

В графическом виде представляются:

- диаграммы фракционного состава по длине волокна: арифметические, взвешенные по длине, взвешенные по массе; с учетом мелочи и без учета мелочи, рисунок 12.

- диаграммы фракционного состава по ширине волокна: арифметические, взвешенные по длине, взвешенные по массе; с учетом мелочи и без учета мелочи, рисунок 13.

- диаграммы фракционного состава по фактору формы волокна: арифметические, взвешенные по длине, взвешенные по массе; с учетом мелочи и без учета мелочи, рисунок 14.

	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
2	4301	4302	4303	4304	4305	4306	4307	4308	4309	4310	4311	4312	4313	4314	4315	4316	4317	4318	4319	4320	4321	4322	4323	4324	4325
3	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19	L20	L21	L22	L23	L24	L25
4																									
5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
7	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
8	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450	1550	1650	1750	1850	1950	2050	2150	2250	2350	2450
9	мелочи																								
10	0	0	2732	4378	4698	3572	1707	578	204	101	74	49	26	19	11	10	7	4	9	0	0	0	0	0	
11																									
12	0	0	683	1532,3	2114,1	1964,6	1109,55	433,5	173,4	95,95	77,7	56,35	32,5	25,65	15,95	15,5	11,55	7	16,65	0	0	0	0	0	
13	0	0	170,75	536,305	951,345	1080,53	721,208	325,125	147,39	91,1525	81,585	64,8025	40,625	34,6275	23,1275	24,025	19,0575	12,25	30,8025	0	0	0	0	0	
14	0	0	42,6875	187,707	428,105	594,292	468,785	243,844	125,282	86,5949	85,6643	74,5229	50,7813	46,7471	33,5349	37,2388	31,4449	21,4375	56,9846	0	0	0	0	0	
15																									
16	0	0	0,08165	0,18317	0,25272	0,23485	0,13264	0,05182	0,02073	0,01147	0,00929	0,00674	0,00389	0,00307	0,00191	0,00185	0,00138	0,00084	0,00199	0	0	0	0	0	
17	0	0	0,03921	0,12316	0,21846	0,24813	0,16562	0,07466	0,03395	0,02093	0,01873	0,01488	0,00933	0,00795	0,00531	0,00552	0,00438	0,00281	0,00707	0	0	0	0	0	
18	0	0	0,01632	0,07176	0,16367	0,22721	0,17922	0,09322	0,0479	0,03311	0,03275	0,02849	0,01941	0,01787	0,01282	0,01424	0,01202	0,0082	0,02179	0	0	0	0	0	
19	0,191	6,383	39,268	122,305	216,956	246,417	164,473	74,145	33,613	20,787	18,606	14,778	9,265	7,897	5,274	5,479	4,346	2,794	7,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
20	0,000	0,000	39,210	123,155	218,464	248,129	165,616	74,661	33,846	20,932	18,735	14,881	9,329	7,952	5,311	5,517	4,376	2,813	7,073	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
21																									

a

	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ	GA
1	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101
2	4401	4403	4405	4407	4409	4411	4413	4415	4417	4419	4421	4423	4425	4427	4429	4431	4433	4435	4437	4439	4441	4443	4445	4447	4449	4451
3	W1	W3	W5	W7	W9	W11	W13	W15	W17	W19	W21	W23	W25	W27	W29	W31	W33	W35	W37	W39	W41	W43	W45	W47	W49	W51
4																										
5																										
6	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51
7	0,5	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
8	0	0	0	0	0	37	330	1357	3088	4116	3244	1759	996	628	492	387	305	225	222	151	119	112	104	89	73	65
9																										
10	0	0	0	0	0	370	3960	18998	49408	74088	64880	38698	23904	16328	13776	11610	9760	7650	7992	5738	4760	4704	4576	4094	3504	3250
11	0	0	0	0	0	3700	47520	265972	790528	1333584	1297600	851356	573696	424528	385728	348300	312320	260100	287712	218044	190400	197568	201344	188324	168192	162500
12	0	0	0	0	0	37000	570240	3723608	1,3E+07	2,4E+07	2,6E+07	1,9E+07	1,4E+07	1,1E+07	1,1E+07	1,1E+07	9994240	8843400	1E+07	8285672	7616000	8297856	8859136	8662904	8073216	8125000
13																										
14	0	0	0	0	0	0,00095	0,010181	0,04884	0,12702	0,19048	0,1668	0,09949	0,06146	0,04198	0,03542	0,02985	0,02509	0,01967	0,02055	0,01475	0,01224	0,01209	0,01176	0,01053	0,00901	0,00836
15																										
16	0	0	0	0	0	0,00039	0,004978	0,02786	0,08281	0,1397	0,13953	0,08918	0,0601	0,04447	0,04041	0,03649	0,03272	0,02725	0,03014	0,02284	0,01995	0,0207	0,02109	0,01973	0,01762	0,01762
17	0	0	0	0	0	0,00013	0,002012	0,01314	0,04463	0,0847	0,09157	0,06095	0,04958	0,03895	0,03811	0,03687	0,03527	0,0312	0,03655	0,02924	0,02687	0,02928	0,03126	0,03057	0,02849	0,02867
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,023	0,827	8,656	41,043	117,197	185,736	165,490	100,884	58,679	40,419	33,869	30,539	23,279	21,245	20,830	15,190	13,364	13,485	13,437	12,153	10,876	10,791
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,380	4,978	27,862	82,811	139,698	135,929	89,183	60,097	44,471	40,407	36,486	32,717	27,247	30,139	22,841	19,945	20,696	21,092	19,728	17,619	17,023
20																										
21																										

б

	GZ	HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ
1	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152
2	4550	4551	4552	4553	4554	4555	4556	4557	4558	4559	4560	4561	4562	4563	4564	4565	4566	4567	4568	4569	4570	4571	4572	4573	4574	4575	4576
3	S50	S51	S52	S53	S54	S55	S56	S57	S58	S59	S60	S61	S62	S63	S64	S65	S66	S67	S68	S69	S70	S71	S72	S73	S74	S75	S76
4																											
5	100																										
6	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
7																											
8	50,5	51,5	52,5	53,5	54,5	55,5	56,5	57,5	58,5	59,5	60,5	61,5	62,5	63,5	64,5	65,5	66,5	67,5	68,5	69,5	70,5	71,5	72,5	73,5	74,5	75,5	76,5
9																											
10	1	1	2	2	2	0	4	8	6	13	9	11	11	18	20	19	20	24	34	45	37	55	52	62	75	88	85
11																											
12	50,5	51,5	105	107	109	0	226	460	351	773,5	544,5	676,5	687,5	1143	1290	1244,5	1330	1620	2329	3127,5	2608,5	3932,5	3770	4557	5587,5	6644	6502,5
13	2550,25	2652,25	5512,5	5724,5	5940,5	0	12769	26450	20533,5	46023,3	32942,3	41604,8	42968,8	72980,5	83205	81514,8	88445	109350	159637	217361	183899	281174	273325	334940	416269	501622	497441
14	128788	136591	289406	306261	323757	0	721449	1520875	1201210	2738383	1993006	2558692	2685447	4608862	5366723	5339216	5881593	7381125	1,1E+07	1,5E+07	1,3E+07	2E+07	2E+07	2,5E+07	3,1E+07	3,8E+07	3,8E+07
15																											
16	3E-05	3,1E-05	6,2E-05	6,4E-05	6,5E-05	0	0,00013																				

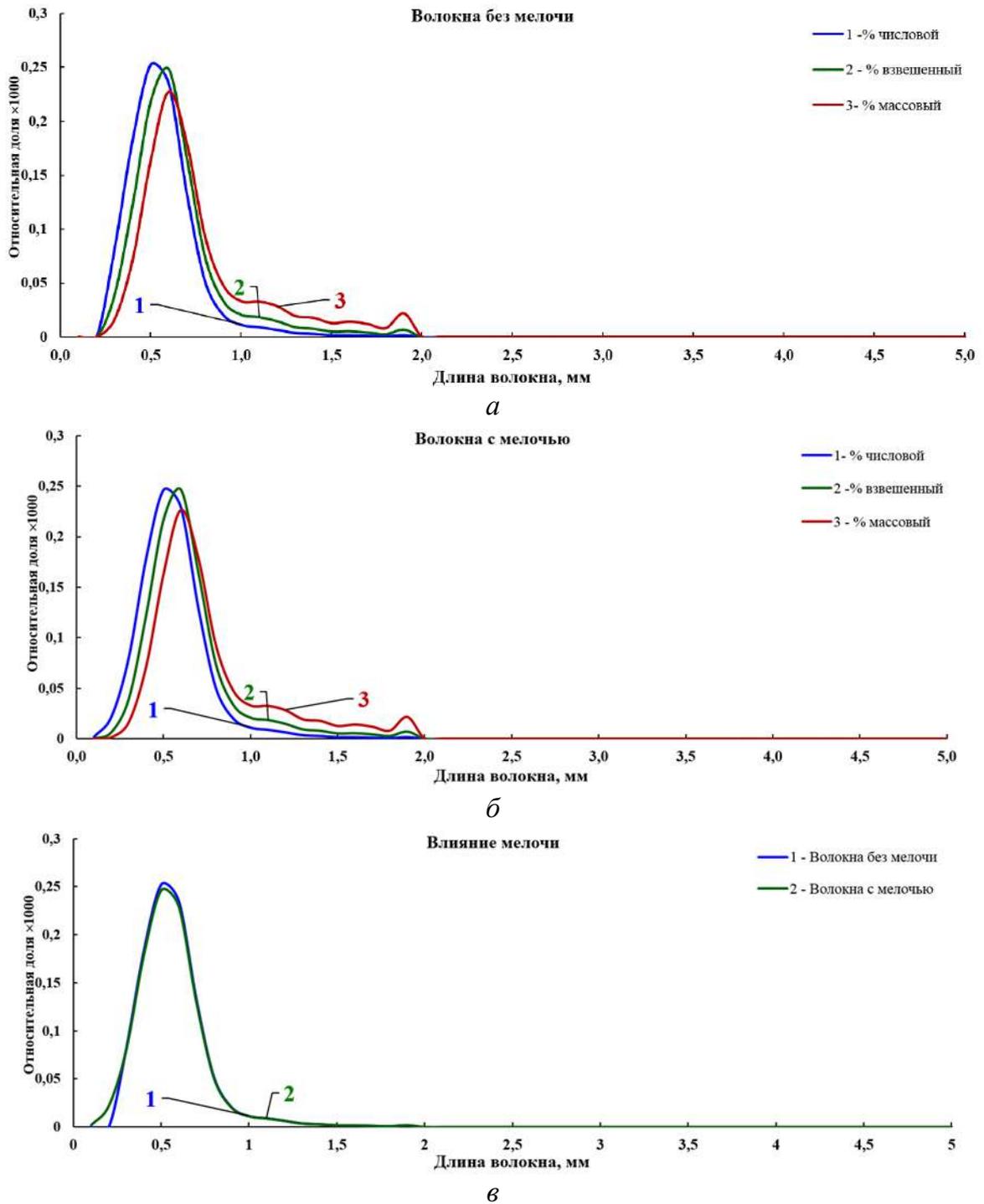


Рисунок 12 – Диаграммы подробного фракционного состава по длине волокна:
а – без мелочи; *б* – с мелочью; *в* – влияние мелочи

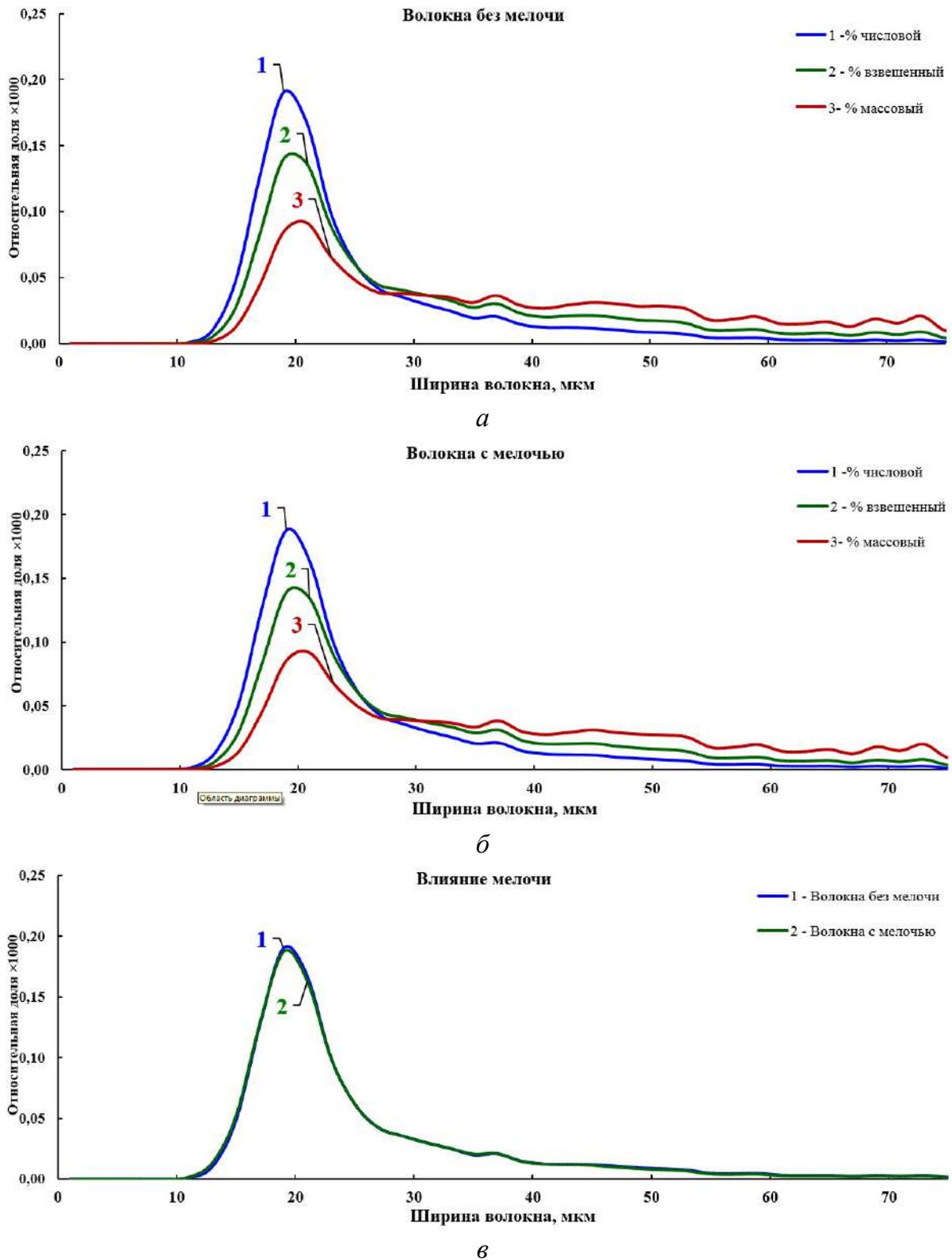


Рисунок 13 – Диаграммы подробного фракционного состава по ширине волокна:
а – без мелочи; б – с мелочью; в – влияние мелочи

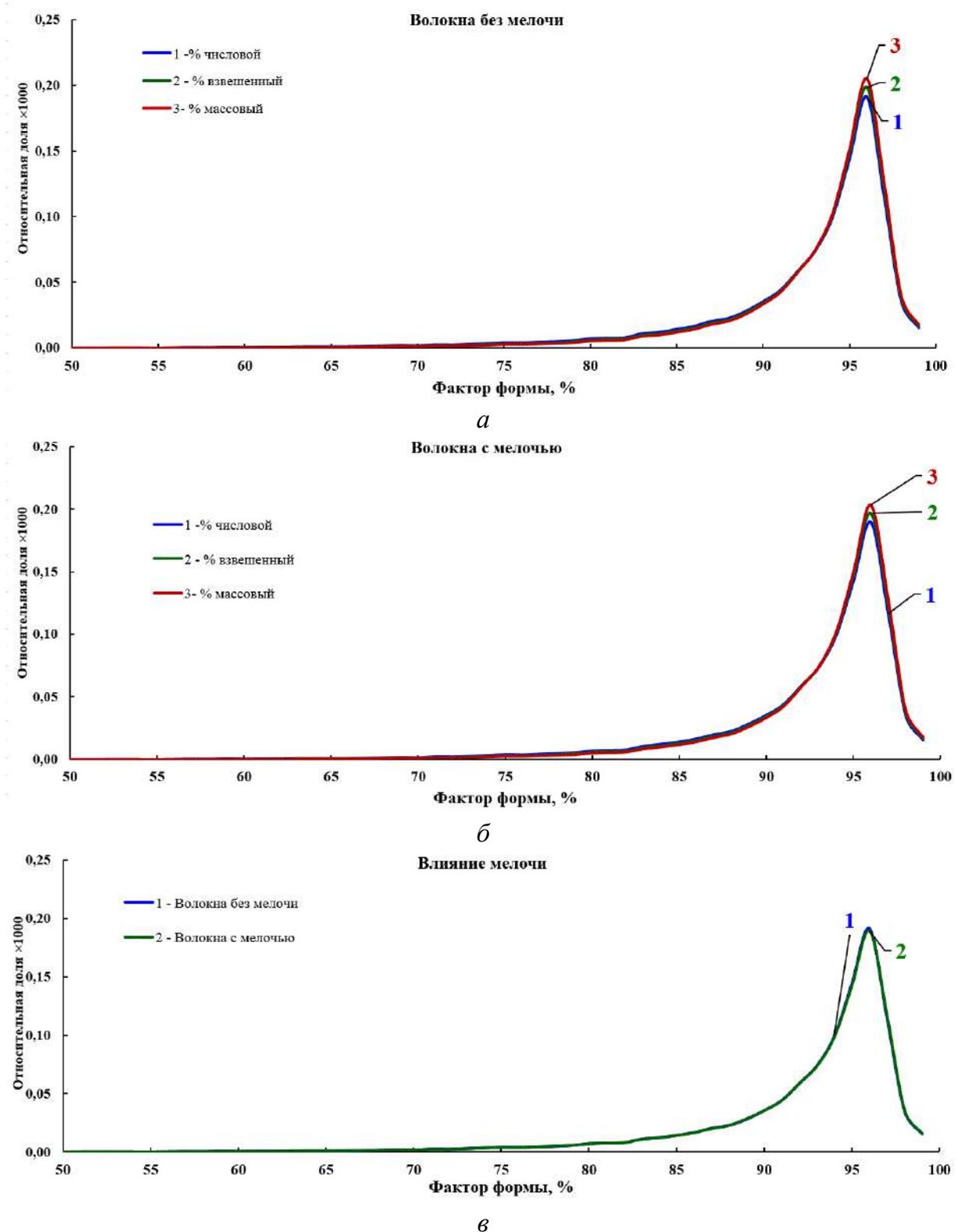


Рисунок 14 – Диаграммы подробного фракционного состава по фактору формы волокна:
a – без мелочи; *б* – с мелочью; *в* – влияние мелочи

10.2.2 Фракционный состав по длине волокна при заданном размере классов

При расчете относительного содержания волокон во фракциях используется три способа: арифметическая доля; взвешивание по длине волокна, взвешивание по массе.

Расчет выполняется в блоке клеток **ВВ1:ВW21**, рисунок 15.

В клетке **ВС4** задается размер класса, мкм (выделено желтым фоном). Значение выбирается в зависимости от вида волокнистого полуфабриката, средней и максимальной величины измеренной длины волокна. Для хвойной целлюлозы значение выбирается выше, для лиственной целлюлозы и целлюлозы из недревесного сырья – меньше.

При построении гистограмм число классов ограничиваем числом 15. В последнем классе суммируются данные для классов с **16 до 21**.

Данные для построения гистограмм собираются в блоке клеток **ВВ14:ВQ16**.

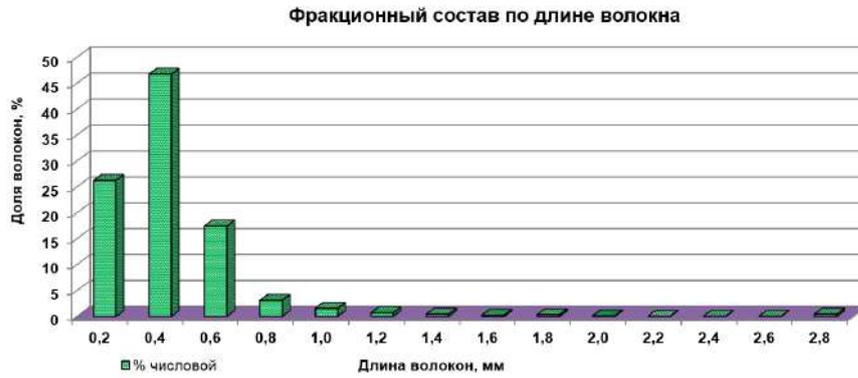
Значения для подписей по горизонтальной оси рассчитаны в блоке клеток **ВС21:ВQ21**.

	ВВ	ВС	ВD	ВE	ВF	ВG	ВH	ВI	ВJ	ВK	ВL	ВM	ВN	ВO	ВP	ВQ	ВR	ВS	ВT	ВU	ВV	ВW
1	n ¹	235	2282	4063	1516	268	137	61	39	20	30	10	5	3	3	12	3	0	3	4	0	5
2	n ¹ l	33	720	1995	1011	234	149	79	58	34	57	22	10	6	7	33	9	0	12	14	0	26
3	n ¹ l ¹	5	227	979	674	205	162	102	86	58	108	46	24	16	18	96	28	0	41	51	0	134
4	Шаг класса, мкм	200																				
5		0,141	0,316	0,491	0,667	0,875	1,087	1,296	1,490	1,694	1,889	2,094	2,285	2,539	2,610	2,885	3,019	0,000	3,462	3,702	0,000	5,114
6	Средняя в классе	141	316	491	667	875	1087	1296	1490	1694	1889	2094	2285	2539	2610	2885	3019	0	3462	3702	0	5114
7	Кол-во в классе	1673	7228	8277	2273	306	126	47	26	12	16	5	2	1	1	4	1	0	1	1	0	1
8																						
9		0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
10	% числовой	2,70	26,23	46,72	17,42	3,08	1,57	0,70	0,45	0,23	0,35	0,12	0,05	0,03	0,03	0,13	0,03	0,00	0,04	0,04	0,00	0,06
11	% взвешенный	0,73	15,97	44,23	22,41	5,20	3,30	1,75	1,28	0,76	1,27	0,49	0,23	0,14	0,15	0,74	0,20	0,00	0,27	0,30	0,00	0,58
12	% массовый	0,15	7,43	32,01	22,02	6,70	5,28	3,34	2,81	1,91	3,52	1,50	0,78	0,53	0,58	3,14	0,90	0,00	1,36	1,66	0,00	4,37
13																						
14	% числовой	2,70	26,23	46,72	17,42	3,08	1,57	0,70	0,45	0,23	0,35	0,12	0,05	0,03	0,03	0,44						
15	% взвешенный	0,73	15,97	44,23	22,41	5,20	3,30	1,75	1,28	0,76	1,27	0,49	0,23	0,14	0,15	2,83						
16	% массовый	0,15	7,43	32,01	22,02	6,70	5,28	3,34	2,81	1,91	3,52	1,50	0,78	0,53	0,58	14,56						
17																						
18	Класс мин, мм	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4
19	Класс ср	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,0
20		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
21	Класс	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000

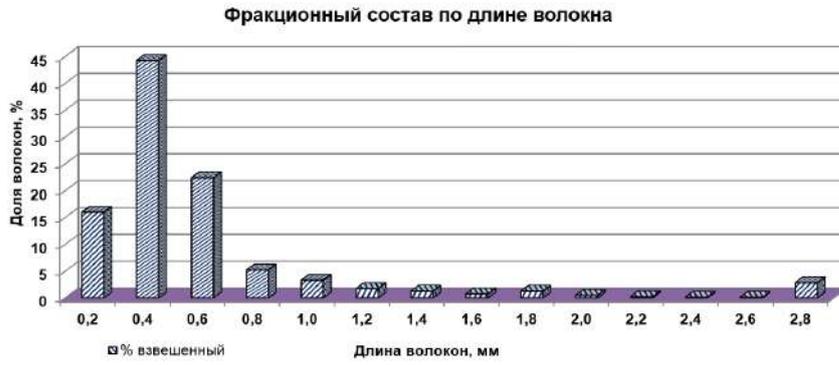
Рисунок 15 – Числовые данные для построения гистограмм фракционного состава по длине волокна при задаваемом размере класса

В графическом виде представляются гистограммы фракционного состава по длине волокна, рисунок 16.

- по числовой доле (арифметические);
- взвешенные по длине;
- взвешенные по массе;
- все гистограммы на одном графике.



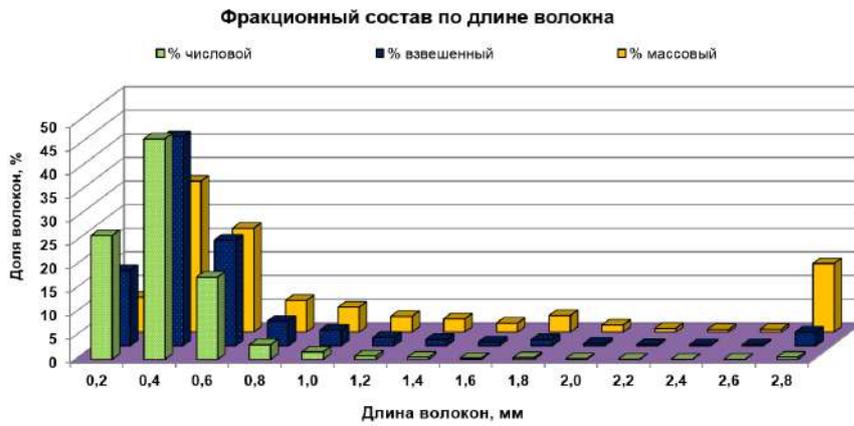
a



б



в



г

Рисунок 16 – Гистограммы фракционного состава по длине волокна:
a – по числовой доле; *б* – взвешенные по длине; *в* – взвешенные по массе; *г* – все на одном графике

10.3 Двумерное распределение фракционного состава волокнистого полуфабриката по длине-ширине волокна

Построение двумерных диаграмм длина-ширина выполняется по данным, распределенным по 20 классам длины (0...7,5 мм) и 15 классам ширины (1...99 мкм).

При расчете доли волокон с заданными длиной и шириной выполняется взвешивание по длине.

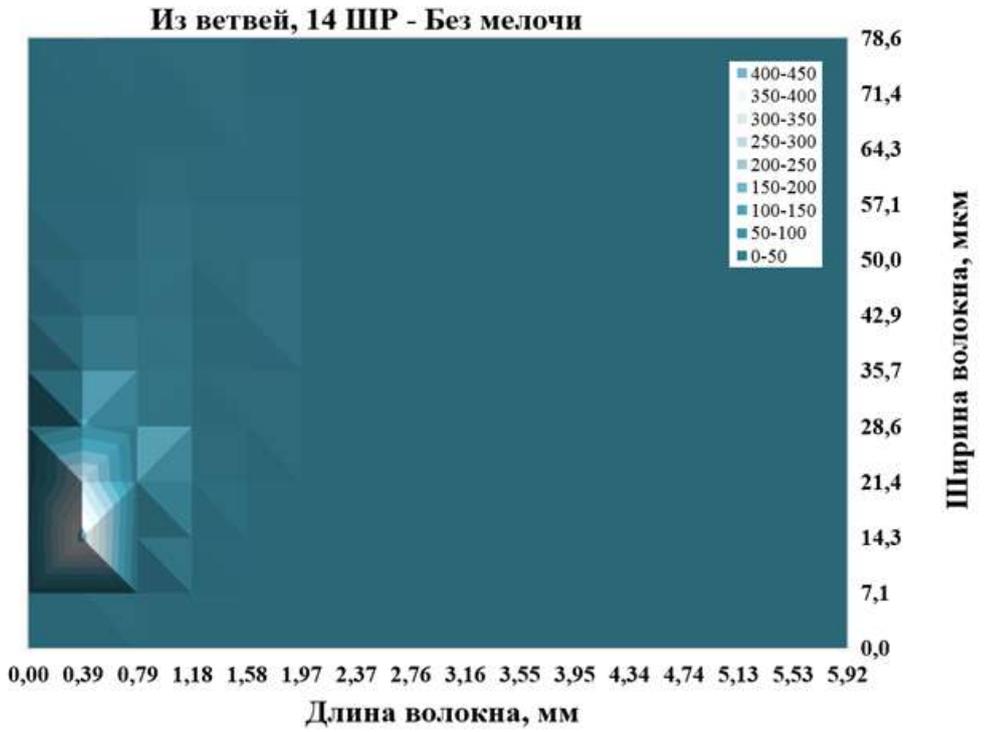
Расчет выполняется по двум вариантам, рисунок 17, по горизонтали – классы длины, по вертикали – классы ширины:

- без учета мелочи, числовые значения в клетках **JS34:KN53**, цвет фона – желтый;
- учетом мелочи, числовые значения в клетках **JS61:KN78**, цвет фона – голубой.

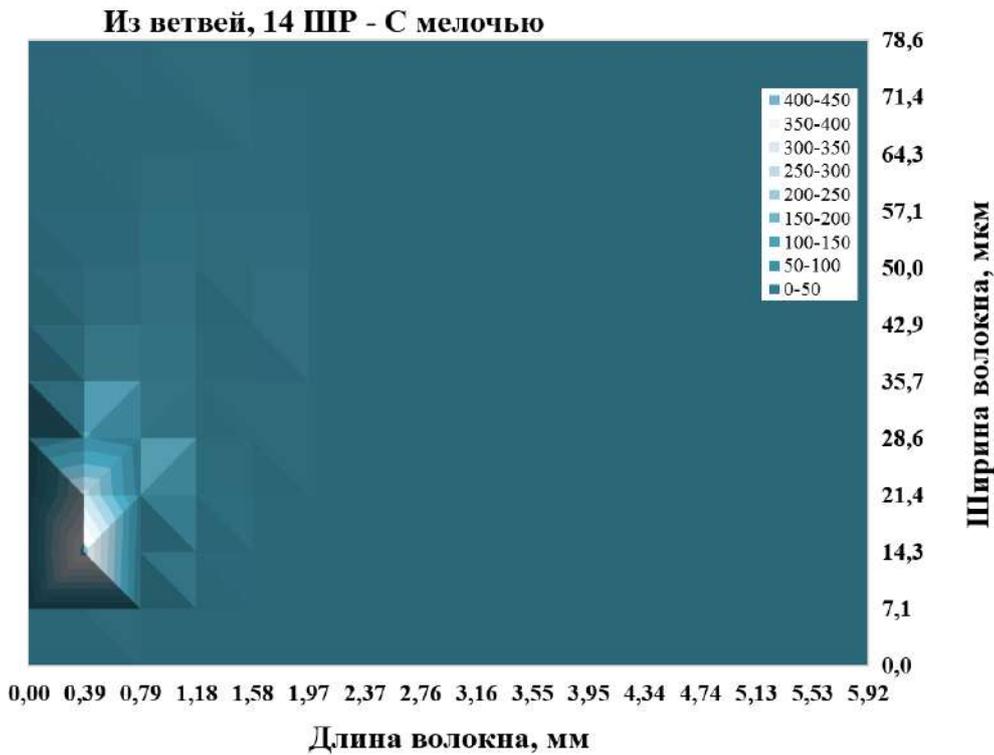
	JS	JT	JU	JV	JW	JX	JY	JZ	KA	KB	KC	KD	KE	KF	KG	KH	KI	KJ	KK	KL	KM	KN
34	Без мелочи																					
35	Взвешенное по длине число волокон с заданной длиной и шириной																					
36	Для копирования $n_i \cdot l_i \cdot w_i / \sum n_i l_i w_i$																					
37		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
38		0	395	789	1184	1579	1974	2368	2763	3158	3553	3947	4342	4737	5132	5526	5921	6316	6711	7105	7500	
39	1	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	2	7,1	1,3	2,16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	3	14,3	32,2	430	12,4	1,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	4	21,4	14,0	276	29,6	4,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	5	28,6	4,8	54,9	13,3	3,25	2,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	6	35,7	2,3	21,1	10,8	4,47	2,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	7	42,9	1,2	10,4	9,95	3,25	4,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	8	50,0	0,6	5,59	7,25	4,06	3,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	9	57,1	0,2	2,24	4,14	2,84	1,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	10	64,3	0,1	2,09	3,11	2,44	1,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	11	71,4	0,0	0,9	2,28	2,84	0,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	12	78,6	0,0	0	0,41	0,41	0,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	13	85,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	14	92,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	15	100,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54																						
61	С мелочью $n_i \cdot l_i \cdot w_i / \sum n_i l_i w_i$																					
62		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
63		0	395	789	1184	1579	1974	2368	2763	3158	3553	3947	4342	4737	5132	5526	5921	6316	6711	7105	7500	
64	1	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	2	7,1	2,18	2,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	3	14,3	39	424	12,3	1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	4	21,4	17,2	272	29,2	4,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	5	28,6	5,74	54,2	13,1	3,21	1,99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	6	35,7	2,76	20,8	10,6	4,41	1,99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	7	42,9	1,28	10,2	9,82	3,21	4,64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	8	50,0	0,56	5,52	7,16	4,01	3,31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72	9	57,1	0,22	2,21	4,09	2,81	1,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73	10	64,3	0,07	2,06	3,07	2,4	1,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74	11	71,4	0,04	0,88	2,25	2,81	0,66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	12	78,6	0,01	0	0,41	0,4	0,66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	13	85,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77	14	92,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	15	100,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 17 – Числовые данные для построения двумерного распределения по длине-ширине волокна

В графическом виде представляются диаграммы фракционного состава по длине-ширине (взвешивание по длине), с учетом мелочи и без учета мелочи, рисунок 18.



a



б

Рисунок 18 – Двумерные диаграммы фракционного состава по длине-ширине волокна:
а – без мелочи; б – с мелочью

10.4 Подготовка массива данных для экспорта в систему сравнительного анализа структурно-морфологических свойств волокнистых полуфабрикатов [7]

Данные для копирования в систему сравнительного анализа собираются в строках **19** и **20**, начиная со столбца **СВ**, рисунок 19.

Порядок данных полностью соответствует порядку данных, экспортируемых из ПО L&W FiberTester, что позволяет объединять массивы данных, полученные разными методами, для последующего сравнительного анализа.

Порядок данных:

- в клетках **СЕ19:FA19** фракции по длине волокна через 0,1 мм, 75 значений;
- в клетках **FB19:GY19** фракции по ширине волокна через 2 мкм, 50 значений;
- в клетках **FZ19:IW19** фракции по фактору формы волокна через 1 %, 50 значений;
- в клетках **IX:UK19** – фракции двумерного распределения по длине-ширине волокна.

	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	
1					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
2					4301	4302	4303	4304	4305	4306	4307	4308	4309	4310	4311	4312	4313	4314	4315	4316	4317	4318	4319	
3					L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19	
6					0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	
7					0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	
8					50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450	1550	1650	1750		
9					Волокна без мелочи																			
10	Длина	Ширина	Форма																					
11	18179	18179	18179		0	0	2732	4378	4898	3572	1707	578	204	101	74	49	26	19	11	10	7	4	9	
12	8395,3	388964	1682963,5		0	0	683	1532,3	2114,1	1964,8	1109,6	433,5	173,4	95,95	77,7	56,35	32,5	25,65	15,95	15,5	11,55	7	16,65	
13	4354,7	9548160	156520681		0	0	170,75	536,31	951,35	1080,5	721,21	325,13	147,39	91,153	81,585	64,803	40,625	34,628	23,128	24,025	19,058	12,25	30,803	
14	2815,7	263397360	1,461E+10		0	0	42,688	187,71	428,11	594,28	468,78	243,84	125,28	88,595	85,664	74,523	50,781	46,747	33,535	37,239	31,445	21,438	56,985	
15																								
16	1	1	1		0	0	0,0816	0,1832	0,2527	0,2349	0,1326	0,0518	0,0207	0,0115	0,0093	0,0067	0,0039	0,0031	0,0019	0,0019	0,0014	0,0008	0,002	
17	1	1	1		0	0	0,0392	0,1232	0,2185	0,2481	0,1656	0,0747	0,0338	0,0209	0,0187	0,0149	0,0093	0,008	0,0053	0,0055	0,0044	0,0028	0,0071	
18	1	1	1		0	0	0,0163	0,0718	0,1637	0,2272	0,1792	0,0932	0,0479	0,0331	0,0328	0,0285	0,0194	0,0179	0,0128	0,0142	0,012	0,0082	0,0218	
19					С мелочью	Копируем	6,191	6,383	39,268	122,305	216,956	248,417	164,473	74,145	33,613	20,787	18,606	14,778	9,285	7,897	5,274	5,479	4,346	2,794
20					Без мелочи		0,000	0,000	39,219	123,156	218,464	248,129	165,616	74,561	33,846	20,932	18,736	14,881	9,329	7,962	5,311	6,517	4,376	2,813
21																								

Рисунок 19 – Числовые данные (фрагмент) для экспорта результатов расчетов систему сравнительного анализа

10.5 Для экспорта числовых результатов надо выделить блок клеток **СЕ19:UK19** (синий шрифт), рисунок 19, и скопировать в буфер обмена Windows.

11 Оформление результатов измерений

11.1 При оформлении результатов анализа, величина средней длины волокна (мм) округляется до 3-х десятичных знаков; величина средней ширины волокна (мкм) округляется до 1-го десятичного знака, величина среднего фактора формы (%) округляется до 1-го десятичного знака

11.2 При представлении результатов по настоящей методике, в сводке результатов указывается наименование и обозначение методики, точность результатов измерений.

12 Контроль точности результатов измерений

Для обеспечения точности результатов обработки данных при измерении величины структурно-морфологических свойств волокон:

12.1 средства измерения и испытательное оборудование должны быть метрологически обеспечены в соответствии с утвержденными графиками поверки (калибровки) и аттестации;

12.2 наличие параллельных проб при выполнении измерений с установленным расхождением между собой, является контролем точности результатов измерений при каждом испытании.

(справочное А)

Перечень нормативных документов, на которые даны ссылки
в настоящей методике выполнения измерений

ГОСТ 8047-2001 Бумага и картон. Правила приемки. Отбор проб для определения среднего качества

ГОСТ 24104-2001 Весы лабораторные. Общие технические требования

ГОСТ Р 50068-92 Волокнистые полуфабрикаты. Ускоренный метод определения концентрации массы

ISO 16065-1:2001 Pulps. Determination of fiber length by automated optical analysis. Part 1. Polarized light method (Целлюлоза. Определение длины волокна с помощью автоматизированного оптического анализа. Часть 1. Метод определения в поляризованном свете).

ISO 16065-2:2007 Pulps. Determination of fibre length by automated optical analysis – Part 2: Unpolarized light method (Целлюлоза. Определение длины волокна методом автоматизированного оптического анализа. Часть 2. Метод с использованием неполяризованного света)

(справочное Б)

Перечень литературных источников, на которые даны ссылки
в настоящей методике выполнения измерений

1. Karlsson H., Rinnevuoto T. Fiber Guide: Fiber Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry. Kista, AB Lorentzen & Wetter, 2006. 120 p.

2. Белоглазов В.И., Комаров В.И., Дьякова Е.В., Гурьев А.В. Структурно-размерные свойства волокон полуфабрикатов как фактор, определяющий качество тарного картона. / В сб.: «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов». Матер. I Междун. научно-технич. конфер. (Архангельск, 13–17 сентября 2011 г.) // Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2011. С. 57–63.

3. Казаков Я.В., Манахова Т.Н. Бумагообразующий потенциал хвойной небеленой целлюлозы: современный взгляд через автоматический анализатор волокна / Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. №5. С.34–39.

4. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растительного сырья. 2014. №1. С. 269–275.

5. Пенкин А.А., Казаков Я.В. Изменение структурно-морфологических свойств вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С.157–172.

6. Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 2. Характеристика волокнистой мелочи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 169–179.

7. Казаков Я.В., Корельская Е.А. Технология расширенной сравнительной характеристики структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов по данным автоматического анализатора волокна // 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.31–37.

УТВЕРЖДАЮ



Научный руководитель
ИОИ Мирового уровня
«Российская Арктика»
доктор физ.-мат. наук, профессор

М.К. Есеев

«15» 04 2025 г.

АКТ

Внедрения методики представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна

Настоящий акт подтверждает, что в Инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» внедрена методика представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна, разработанная профессором Я.В. Казаковым и аспирантом Фатимой Албаррам.

Методика разработана на кафедре целлюлозно-бумажных и лесохимических производств, основана на импорте массива результатов измерений длины, ширины и фактора формы, формируемых программным обеспечением анализатора волокна L&W FiberTester, в электронную таблицу Excel и вычисления набора статистических характеристик, массивов данных для построения диаграмм фракционного состава, и массива данных для экспорта в систему сравнительного анализа.

При выполнении расчетов используется собственная разработка в виде электронной таблицы MS Excel выполняющая комплексное представление результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов, которые были получены при проведении исследовательских работ в 2022...2025 гг. в ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера».

Использование данной методики открывает возможности для полной количественной и визуальной характеристики структурно-размерных свойств широкого спектра образцов технической целлюлозы.

АКТ составлен и подписан

От разработчиков

Профессор

Я.В. Казаков

Аспирант

Ф. Албаррам

От ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»

Директор

Ю.В. Севастьянова

Начальник Управления инновационного развития САФУ

А.В. Ладесов



ПОДТВЕРЖДАЮ»

Проректор САФУ

по образовательной деятельности

А.М. Тамицкий

17 » *Июль* 2025 г.

СПРАВКА

Об использовании в учебном процессе результатов научно-исследовательской работы, выполненной аспирантом Албаррам Фатымой

Подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы, включающие свойства образцов древесины из ветвей деревьев сосны и эвкалипта, произрастающих в Сирийской Арабской Республике, и образцы сульфатной небеленой целлюлозы, полученные из ветвей осины, которые определены при выполнении диссертационного исследования, а также информация о структурно-морфологических, бумагообразующих, прочностных и деформационных свойствах волокнистых полуфабрикатов из ветвей деревьев, и разработанная методика представления результатов измерения структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов на автоматическом анализаторе волокна МВИ 03-2025 применяются в учебном процессе:

- при подготовке бакалавров по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология» при изучении дисциплин «Технология целлюлозы» (3 курс); «Технология бумаги и картона» (4 курс);

- при подготовке магистров по направлению подготовки 18.04.01 «Химическая технология» при изучении дисциплин «Технология волокнистых полуфабрикатов» (2 курс); «Современные технологии производства бумаги и картона» (2 курс);

- при подготовке аспирантов по направлению подготовки 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины» и 2.6.11 «Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов» при изучении дисциплины «Технология целлюлозы, бумаги и картона» (2 курс).

Заведующий кафедрой
целлюлозно-бумажных
и лесохимических производств
доцент, канд. техн. наук

Щербак Н.В.

Директор Высшей школы
естественных наук и технологий
доцент, канд. пед. наук

Лукина С.Ф.

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
по стратегическому развитию и науке
ФГАОУ ВО «Северный
(Арктический) федеральный
университет имени М.В. Ломоносова»
доктор технических наук, доцент
_____ П.А. Марьяндышев
«16» _____ 2025 г.

АКТ

Оценки результатов опытных варок сульфатной целлюлозы из древесины ветвей осины на соответствие полученного полуфабриката требованиям к ЦВВ для применения в композиции упаковочной бумаги

В Инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ проведены опытные варки целлюлозы высокого выхода из щепы, полученной из ветвей осины и проведена оценка свойств целлюлозы на соответствие полученного полуфабриката требованиям к ЦВВ для применения в композиции упаковочной бумаги. Режим варки разработан аспирантом кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Албаррам Фатимой и профессором Казаковым Я.В.

Цель испытаний:

Оценка свойств целлюлозы высокого выхода, полученной сульфатным способом при варке щепы из ветвей осины.

Характеристика древесины из ветвей осины, принятой в качестве сырья

В качестве сырья использованы образцы древесины из ствола и ветвей деревьев осины (*Populus Tremula L.*), заготовленной в Приморском районе Архангельской области. Ветви осины были взяты от того же дерева, что и ствол, что позволило исключить другие факторы. Свойства древесины ветвей и ствола осины представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства древесины ветвей и ствола осины

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

Методика проведения работ

Проведение сульфатной варки

Щепа размерами $15 \pm 3 \times 25 \pm 2 \times 5 \pm 1$ мм из ствола и ветвей получена ручным способом из шайб высотой 2,5 см. Хранение щепы осуществлялось в помещении лаборатории при комнатной температуре.

На варку использован производственный белый щелок с параметрами: общая щелочь 120,9 г/л ед. Na_2O ; активная щелочь 100,8 г/л ед. Na_2O ; сульфидность 21,5 %.

Варка сульфатной целлюлозы проводилась в лабораторной автоклавной системе CAS-420. Варка проводилась в автоклавах из нержавеющей стали объемом 1 л. Для создания требуемого гидромодуля использовалась дистиллированная вода. Навеска щепы составляла 40 г в расчете на а.с. древесины. Условия варки представлены в таблице 3. Режим варки определен по результатам предварительных экспериментов.

Таблица 2. Условия проведения сульфатной варки щепы из ветвей и ствола осины

Параметр	Величина
Расход активной щелочи на варку, в ед. Na_2O , к а.с. древесине	14,5
Гидромодуль	4
Режим варки:	
подъем температуры до 170 °С, мин	80
стоянка при температуре 170 °С, мин	55
Общая продолжительность варки, мин	135

По окончании варки ЦВВ от черного щелока отделяли на сите, а полуфабрикат промывали на лабораторной ссече водопроводной водой и отделяли непровар. Полученную целлюлозу обезвоживали до сухости 18 % и хранили в полиэтиленовых пакетах в холодильнике.

Изготовление лабораторных образцов бумаги

Подготовка проб целлюлозы к физико-механическим испытаниям выполнена по ГОСТ 14363.4-89.

Для определения физико-механических свойств были изготовлены лабораторные отливки массой 75 г/м², на листоотливном аппарате Estant BBS-2 системы Rapid-Ketten, после размола на мельнице Йокро при концентрации 6 % до степени помола 30 °ШР.

Перед проведением испытаний отливки кондиционировали по ГОСТ 13523-78. Физико-механические свойства волокнистых материалов (толщина, плотность, разрывная длина, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию, SCT) определяли по стандартным методикам.

Основные результаты

Полученный при отдельной варке сульфатным способом по разработанному режиму волокнистый полуфабрикат из ветвей осины (*Populus Tremula L.*), по сравнению с целлюлозой из ствола, имеет схожие характеристики по выходу (60,2 и

61,8 %) и числу каппа (52 и 54 ед.), Таблица 3. Разница в составе отработанного черного щелока соответствует разнице в выходе сортированной целлюлозы.

Таблица 3 – Результаты сульфатной варки щепы из ветвей и ствола осины

Параметр	Вид сырья	
	Ветви	Ствол
Выход сортированной целлюлозы, %	56,7	59,3
Количество непровара, %	3,5	2,5
Общий выход, %	60,2	61,8
Число Каппа	52	54
Содержание сухих веществ в черном щелоке, г/л	105	98
Содержание активной щелочи в черном щелоке, г/л Na ₂ O	5,0	6,1

Физико-механические свойства отливок целлюлозы из ветвей и ствола осины представлены в таблице 4.

Целлюлоза из ветвей осины, по сравнению с образцом целлюлозы из ствола, имеет более низкие значения по большинству исследованных свойств. Целлюлоза в ветвях осины имеет на 7 % меньшую плотность, на 15 % меньшую разрывную длину и на 14 % меньшую работу разрушения, прочность на растяжение на 11 %, разрушающее напряжение на 17 %.

Но при этом имеет сопоставимый уровень сопротивления продавливанию и сжатию (98 %), что объясняется повышенными межволоконными связями.

Таблица 4 – Физико-механические свойства отливок из ветвей и ствола осины

Характеристика	Метод измерения	Образец из ветвей	Образец из ствола	Ветви, % от ствола
Средняя толщина образца, мкм	ГОСТ 27015-86	88,4	81,6	108
Плотность, г/см ³	ГОСТ 27015-86	0,805	0,865	93
Сопротивление продавливанию, кПа	ГОСТ 13525.8-86	357	364	98
Сопротивление раздиранию, мН	ГОСТ 13525.3-97	299	394	76
Сопротивление сжатию SCT, кН/м	ИСО 9895-2013	2,57	2,62	98
Разрывная длина, м	ISO 1924-3:2005(ru)	8300	9800	85
Разрушающее напряжение, МПа		70,5	85	83
Жесткость при растяжении, кН/м		410	460	89
Деформация разрушения, ϵ_r , %		3,48	3,65	95
Работа разрушения, A_p , мДж		220	256	86

Таким образом, полученный небеленый волокнистый полуфабрикат – целлюлоза высокого выхода из ветвей осины, имеет перспективу и может рассматриваться для использования в композиции упаковочных видов бумаги.

Заключение

Подтверждаем, что приведенные данные получены при выполнении диссертационной работы аспиранта Албаррам Фатымы на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 4.3.4 Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины

Результаты, полученные в диссертации Албаррам Фатымы, планируется использовать при принятии решений о композиции и технологии упаковочной бумаги в целях соответствия требованиям ресурсосбережения, экологичности и парадигме полного использования биомассы дерева.

От разработчиков

Профессор



Я.В. Казаков

Аспирант



Ф. Албаррам

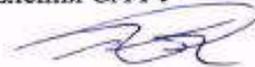
От ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»

Директор



Ю.В. Севастьянова

Начальник научно-исследовательского управления САФУ



С.В. Рябченко