

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ИНТРОДУЦИРОВАННОЙ СОСНЫ СКРУЧЕННОЙ ПРИ РАЗМОЛЕ

Я.В. Казаков✉, Н.А. Бабич, Н.А. Крушевская

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), Россия, 163002, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

j.kazakov@narfu.ru

Выявлены и проанализированы особенности изменения структурно-размерных свойств сульфатной небеленой целлюлозы из сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) в условиях лабораторного стандартизированного размола до 60 °ШР на мельнице Йокро. Охарактеризованы различия в свойствах волокон, измеренных на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester, в образцах целлюлозы с высоким (число Каппа 56 ед.) и низким (число Каппа 25 ед.) содержанием лигнина. Показано, что при уменьшении содержания лигнина в целлюлозе, снижаются средняя длина волокна с 2,1 до 1,9 мм, средняя ширина с 31,4 до 30,1 мкм, фактор формы 89,2 до 82,1 %, повышается число изломов на 1 мм с 0,28 до 0,81. Выявлено, что характер изменения фракционного состава по длине, ширине и фактору формы волокна, а также структурно-размерных свойств целлюлозы из сосны скрученной при размоле зависит коренным образом от содержания лигнина. Установлено, что волокна с низким содержанием лигнина легче разрушаются при размоле по местам дефектов, а оставшиеся фрагменты обладают повышенной прямизной. Показано изменение эффекта размола от преимущественной фибрилляции и незначительного увеличения мелочи для волокон целлюлозы с высоким содержанием лигнина, к преимущественной рубке волокон с низким содержанием лигнина. При уменьшении содержания лигнина увеличивается скорость снижения длины волокна при размоле, и меняется направление изменения структурно-размерных свойств.

Ключевые слова: сосна скрученная, интродукция, волокно, сульфатная целлюлоза, структурно-морфологические свойства, фракционный состав

Ссылка для цитирования: Казаков Я.В., Бабич Н.А., Крушевская Н.А. Изменение структурно-морфологических свойств сульфатной целлюлозы из древесины интродуцированной сосны скрученной при размоле // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 153–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-153-165

В современных условиях при поиске новых быстро возобновляемых источников сырьевых ресурсов для химической переработки растительного сырья актуальность приобретает искусственное выращивание лесов [1]. Интродукция перспективных пород деревьев как вариант искусственного лесовыращивания также активно используется в мировой практике [2–4]. Кроме того, интродукция способствует расширению ареала вида и обогащению видового состава лесных фитоценозов [5, 6]. Технология применяется для выращивания как лиственных, так и хвойных пород, и получила распространение благодаря своему большому потенциалу и повышению продуктивности пород за счет их быстрого роста, простоты выращивания, улучшению их характеристик, подходящих для деревоперерабатывающей промышленности в целом и для целлюлозно-бумажной в частности [5, 7, 8]. При этом механическая и химическая переработка древесины как ведущие отрасли лесопромышленного комплекса (ЛПК) часто развиваются совместно и при достойном лесосырьевом обеспечении функционируют совместно [9].

Около 15 % заготавливаемой древесины перерабатывается химическими методами в основном для целей целлюлозно-бумажной промышленности, т. е. получения технической целлюлозы, используемой главным образом для производства бумаги и картона [10]. Делигнификация древесного сырья в данном случае нацелена на извлечение целлюлозы, составляющей наряду с лигнином и гемицеллюлозами основу физической структуры древесины. Благодаря фибриллярной и линейной структурам полимерных молекул волокна технической целлюлозы обладают способностью к формированию структуры листовых материалов (бумаги, картона), а после химической переработки образуют биоразлагаемые нити, применяемые для тканых материалов и биополимерных пленок [10].

Плантационное выращивание лиственных пород, в частности эвкалипта, как сырья для производства товарной целлюлозы достаточно давно себя хорошо зарекомендовало, и используется в странах Южной Америки и Индокитая. Важное значение имеет обеспечение предприятий целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) древесиной хвойных пород. Поскольку продолжительность выращивания хвойных пород

существенно больше, чем лиственных, а потребность в длиноволокнистой хвойной целлюлозе сохраняется, то актуальность применения данной технологии не вызывает сомнений. Имеется положительный опыт интродукции лиственницы в европейскую часть России [11], которая крайне необходима как сырье для крупнейших предприятий ЦБП группы «Илим» Иркутской области [8]. Тем не менее из многих видов древесины хвойных пород ведущее место в отечественной ЦБП занимает сосна, а проблемы ее искусственного выращивания имеют первостепенное значение [3, 5, 12, 13].

Сосна скрученная широколистная (широкохвойная) (*Pinus contorta* Loud. var. *Latifolia* S. Wats) естественно произрастает в западной части Северной Америки: от штата Нью-Мексико на юге США до Территории Юкон в Северной Канаде. Исследования, проведенные в Швеции [2, 14], Ирландии, Великобритании и Латвии [7, 15], подтвердили, что сосна перспективна для ускоренного выращивания древесины, пригодной для ЦБП в странах с умеренным климатом.

Отечественный опыт работы по исследованию приживаемости и быстрому росту североамериканской сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) в Архангельской [16], Ленинградской [17], Вологодской [18] и Новгородской областях, республике Коми [19, 20] и Карелии показал [21–23], что она опережает местные породы по скорости роста, превосходит по выживаемости, высоте и объему ствола. К 40 годам сосна скрученная достигает возраста рубки на балансы и на 70 % имеет большую продуктивность, чем местные ель и сосна обыкновенная [21, 25–27].

Для характеристики бумагообразующих свойств волокон, извлеченных из древесины в целях получения товарной целлюлозы, бумаги или картона, чрезвычайно важна информация о структурно-размерных или, более широко, структурно-морфологических свойствах растительных волокон. Длина и ширина волокна, его жесткость и способность сохранять размеры и форму при воздействии гидромеханических нагрузок при размоле в процессе массоподготовки на фабриках ЦБП, имеют ключевое значение [28–30]. При этом размол волокнистых полуфабрикатов является необходимым и самым важным процессом всего производства бумаги [31–34].

В процессе размола происходит направленное изменение начального состояния волокна, т. е. его природных структурно-морфологических свойств [35–38]. Для контроля процесса в настоящее время применяются анализаторы волокна, позволяющие в автоматическом режиме провести измерения характеристик до 20 тыс. отдельных волокон [39]. Международными стандартами измерения длины

волокна с применением автоматических анализаторов являются стандарты ISO 16065-1 (используется поляризованный свет) и ISO 16065-2 (неполяризованный свет). Полученные результаты представляются в виде набора средних значений, гистограмм распределения характеристик длины, ширины и кривизны волокон, а также доли мелочи, нескольких значений размеров волокон, учитывающих взвешенную, объемную или массовую долю, и параметров, оценивающих степень повреждения волокна [28, 40].

Ранее были установлены различия в структурно-морфологических свойствах сульфатной целлюлозы, производимой из сосны обыкновенной и сосны скрученной, которые показали, что свойства волокон сосны скрученной изменяются в более сильной степени, а размол до одинаковой степени помола сглаживает различия во фракционном составе по длине волокна. Засвидетельствована меньшая прочность стенки волокна целлюлозы из сосны скрученной, что связано с ее ускоренным ростом [41].

Цель работы

Цель работы — исследование закономерностей формирования структурно-морфологических свойств целлюлозного волокна из интродуцированной сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm), выращенной в Приморском районе Архангельской области, а также комплексная оценка изменения свойств волокнистого полуфабриката с высоким и низким содержанием лигнина при гидромеханическом воздействии в условиях стандартизированного лабораторного размола на мельнице Йокро с применением автоматического анализатора волокна L&W Fiber Tester.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является целлюлозное волокно, полученное сульфатным способом из сосны скрученной, местом произрастания которой является Приморский район Архангельской области. Исследованный экземпляр сосны скрученной в возрасте 22 года имел высоту 5,5 м, диаметр ствола 15...17 см, что соответствует таким же параметрам сосны обыкновенной в возрасте 45 лет. Для получения целлюлозы ручным способом была изготовлена щепа размером $15 \pm 3 \times 25 \pm 2 \times 5 \pm 1$ мм. Сульфатная варка проведена на автоклавной системе CAS 420 в лаборатории волокнистых полуфабрикатов Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ. Были получены полуфабрикаты двух видов: с высоким содержанием лигнина для производства картона, и с низким — для последующего отбеливания и производства бумаги.

Для этого изменяли расход активной щелочи на варку, гидромодуль и продолжительность процесса. Полученная целлюлоза с выходом 47,5 % и числом Каппа = 56 ед., что соответствует содержанию лигнина 12,9 %, была определена как целлюлоза для производства картона, а целлюлоза с выходом 41,8 % и числом Каппа = 25 ед., что соответствует содержанию лигнина 1,8 %, как целлюлоза для производства бумаги [41].

Размол в лабораторных условиях выполнен на мельнице Йокро при концентрации массы 6 %. Отбор образцов целлюлозной массы для анализа проводился до размола (после роспуска в гидро-разбивателе) и через каждые 10...20 мин размола до итоговой степени помола 60...62 °ШР. У каждой пробы, взятой из размольного стакана, сразу определяли степень помола и отбирали образец, содержащий 0,1 г абсолютно сухого (а. с.) волокна для измерения структурно-размерных свойств.

Структурно-размерные свойства каждой пробы целлюлозы определяли на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester [39], который позволяет выполнить измерения по расширенному перечню характеристик в автоматическом режиме. При проведении измерений в поляризованном свете делаются цифровые снимки сильно разбавленной суспензии в виде тонкого плоского ламинарного потока по стандарту ISO 16065-1. Разрешение во время измерения составляет 0,2 мкм. По результатам анализа пробы формируется отчет на экране в виде таблиц и графиков, а также выполняется экспорт результатов в формате, позволяющем их загрузить в электронную таблицу Excel.

Для сравнительной обработки результатов измерений использована технология сравнительного анализа свойств волокон, реализованная в электронной таблице в MS Excel, которая позволяет выбрать образцы для анализа, представить данные в табличном виде и построить сравнительные диаграммы свойств и фракционного состава [40].

Результаты и обсуждение

Способность целлюлозных волокнистых полуфабрикатов к размолу характеризуется графиком изменения степени помола волокнистой суспензии при размоле на стандартном лабораторном размалывающем аппарате (мельнице Йокро при концентрации массы 6 %) в течение времени, в результате получается кривая размола. Оценка способности целлюлозы из сосны скрученной с высоким и низким содержанием лигнина к размолу была выполнена в сравнении с производственной товарной сульфатной небеленой хвойной целлюлозой марки НС-2.

В процессе размола в присутствии воды, попадая между ножами размалывающего барабана и

стенками размольного стакана, волокна подвергаются воздействию механических и гидродинамических сил, что вызывает комплекс механических, физико-химических и коллоидных процессов на поверхности волокон и в структуре их клеточной стенки. Скорость увеличения степени помола характеризует способность клеточной стенки противостоять этим воздействиям, а результат проявляется в изменении скорости водоотдачи и количественно выражается в градусах Шоппер — Риглера (°ШР).

Полученные кривые размола (рис. 1), являются типичными для большинства полуфабрикатов, что выражается в постепенном нарастании скорости роста степени помола.

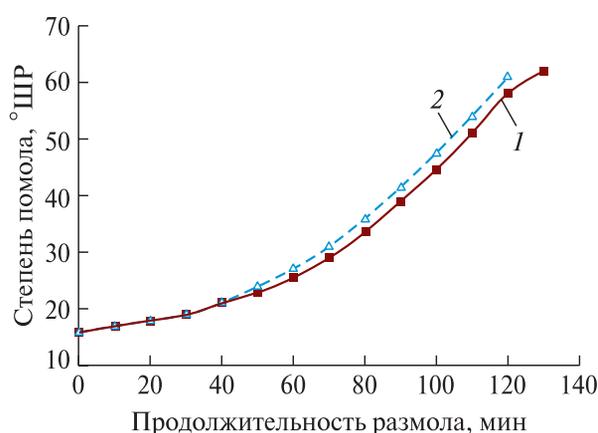


Рис. 1. Кривые размола хвойной небеленой сульфатной целлюлозы из сосны скрученной: 1 — число Каппа 56 ед.; 2 — число Каппа 25 ед.

Fig. 1. Refining curves of unbleached kraft softwood pulp from introduced Lodgepole pine: 1 — Kappa number 56; 2 — Kappa number 25

Кривые размола целлюлозы из сосны скрученной (см. рис. 1) показывают, что размол целлюлозы с низким содержанием лигнина идет быстрее. Однако на начальном этапе, до достижения 22 °ШР, скорость увеличения степени помола примерно одинаковая. На последующих этапах, когда начинает нарушаться сплошность клеточной стенки, наиболее быстро растет степень помола у целлюлозы с низким содержанием лигнина, что свидетельствует о меньшей прочности поверхности волокон и более быстрых процессах фибрилляции.

Сравнение этих результатов с ранее полученными данными [39, 40] показало, что исследованные образцы целлюлозы из сосны скрученной в лабораторных условиях требуют повышенного расхода энергии на размол, а наиболее трудно размалывается целлюлоза с высоким содержанием остаточного лигнина, который, обладая достаточной гидрофобностью, повышает прочность клеточной стенки волокон и блокирует

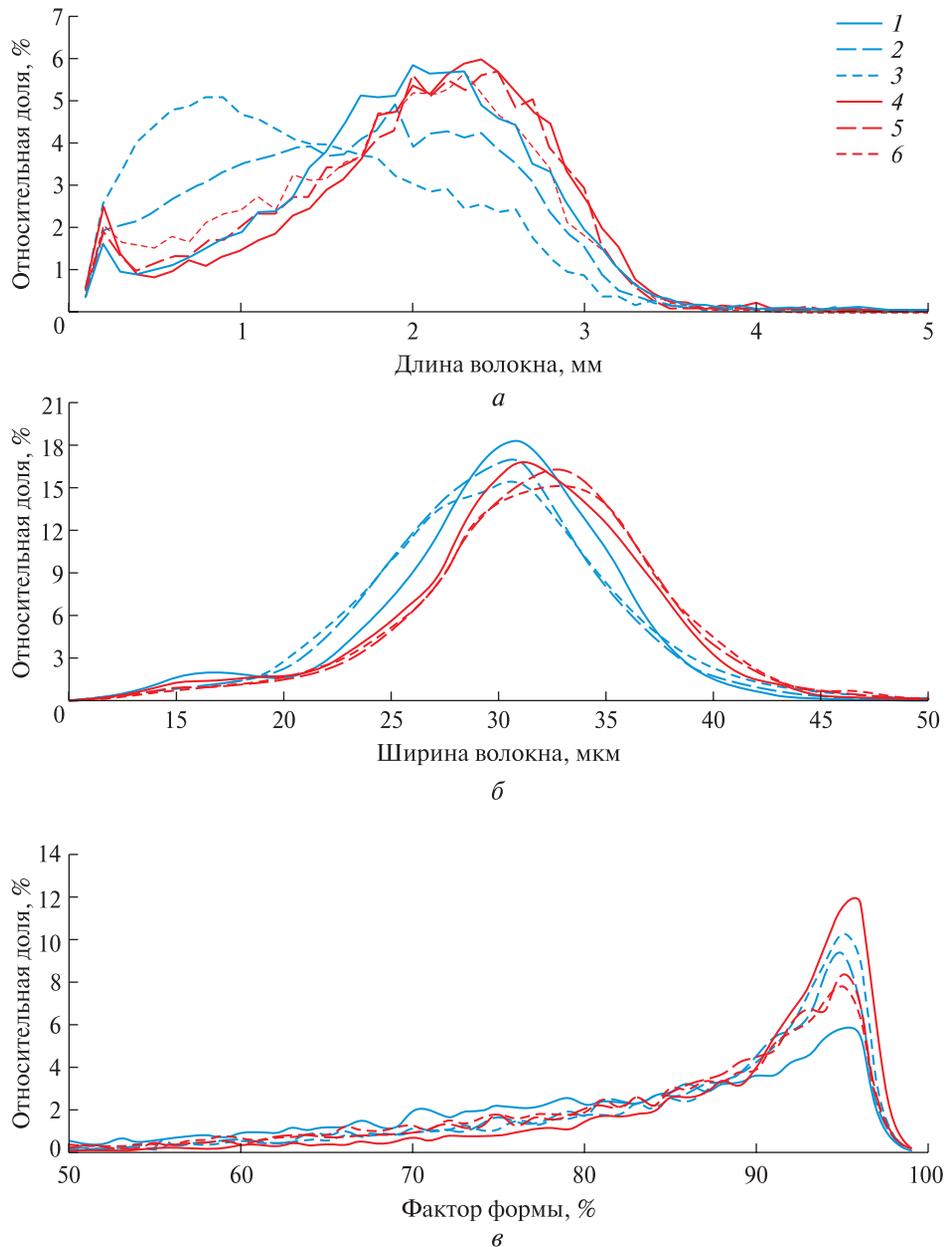


Рис. 2. Фракционный состав целлюлозы из сосны скрученной: *a* — по длине волокна; *б* — по ширине волокна; *в* — по фактору формы (прямызне) волокон; 1 — число Каппа 25 ед., 16 °ШР; 2 — число Каппа 25 ед., 27 °ШР; 3 — число Каппа 25 ед., 61 °ШР; 4 — число Каппа 56 ед., 16 °ШР; 5 — число Каппа 56 ед., 26 °ШР; 6 — число Каппа 56 ед., 62 °ШР

Fig. 2. Fractional composition of pulp from Lodgepole pine: *a* — by fibre length; *б* — by fibre width; *в* — by fibre shape factor (straightness); 1 — number of Kappa 25 units, 16 °SR; 2 — number of Kappa 25 units, 27 °SR; 3 — number of Kappa 25 units, 61 °SR; 4 — number of Kappa 56 units, 16 °SR; 5 — number of Kappa 56 units, 26 °SR; 6 — number of Kappa 56 units, 62 °SR

проникновение воды в клеточную стенку, препятствуя гидратации волокон. Таким образом, волокнистые полуфабрикаты из сосны скрученной оказывают высокое сопротивление размолу. Наличие лигнина замедляет разمول, поскольку имеет более высокую прочность клеточной стенки. В этих условиях наблюдается изменение структурно-размерных свойств их волокон при размоле.

Количественная оценка изменения в структурно-морфологических свойствах волокон при размоле получена с помощью анализатора волокна L&W FiberTester [39].

На рис. 2 представлено изменение фракционного состава по длине (размер класса 0,1 мм), ширине (размер класса 2 мкм) и фактору формы (размер класса 1 %) волокна при размоле целлюлозы из сосны скрученной с высоким (число

Каппа 56 ед.) и низким (число Каппа 24 ед.) содержанием лигнина. Взвешивание выполнялось по длине волокна. Силовое воздействие размалывающей гарнитуры на волокно вызывает направленные изменения содержания фракций по длине волокна (см. рис. 2, а), при этом происходит последовательное увеличение содержания коротковолокнистых фракций с длиной менее 1 мм, и снижение содержания фракций с длиной более 2,0 мм. Для образцов с низким содержанием лигнина изменение происходит резкое и перераспределение содержания фракций очень заметно. Соответственно, сдвигается в коротковолокнистую область положение максимума на кривой распределения по длине волокна от 2,1 мм для неразмолотой целлюлозы до 0,9 мм при 61 °ШР.

Изменение диаграмм фракционного состава по длине волокна для целлюлозы с высоким содержанием лигнина имеет принципиально другой характер. Диаграммы неразмолотой и размолотой до 62 °ШР отличаются незначительно, при этом наиболее заметно увеличение самой мелкой фракции (с длиной волокна 0,3...0,4 мм). Другими словами при размоле происходит образование мелочи, а не рубка волокон при определенном развитии поверхности. Положение максимума изменяется незначительно в сторону более низких значений длины волокон.

Изменение при размоле диаграмм фракционного состава по ширине волокна (см. рис. 2, б) также отличается для целлюлозы с высоким и низким содержанием лигнина. При этом в целом имеет место увеличение полидисперсности волокон по ширине при росте степени помола. У целлюлозы с низким содержанием лигнина положение максимума сдвигается незначительно в сторону уменьшения, а его высота заметно сокращается, т. е. происходит перераспределение фракций с шириной волокна 20...25 мкм в сторону увеличения. Таким образом, изменение средней ширины волокна при размоле связано в основном не со сдвигом положения максимума, а за счет увеличения содержания фракций с шириной 20...25 мкм. Иначе говоря, изначально лентообразные волокна при механическом воздействии размалывающей гарнитуры подвергаются расщеплению, тем самым уменьшаясь в ширине.

У целлюлозы с высоким содержанием лигнина изменение диаграмм иное. Изначально жесткие волокна трубчатой формы в результате размола сплющиваются, и наблюдается увеличение их ширины. Соответственно, максимум диаграмм смещается в сторону больших значений и увеличивается содержание фракций шириной волокна более 35 мкм.

Диаграммы фракционного состава по фактору формы волокна сосны скрученной с высоким и

низким содержанием лигнина также имеют отличия (см. рис. 2, в), однако главным образом в области практически прямых волокон с фактором формы выше 92 %. У неразмолотой целлюлозы сосны скрученной с высоким содержанием лигнина наблюдается наибольший максимум, т. е. в ней очень много жестких и прямых волокон.

При размоле целлюлозы из сосны скрученной с низким содержанием лигнина повышается содержание практически прямых волокон с фактором формы выше 95 %, что доказывает влияние размола на волокно, при котором длинные волокна с дефектами в виде перегибов и перекручиваний вследствие гидромеханических нагрузок подвергаются рубке по местам дефектов, а оставшиеся фрагменты волокон являются относительно прямыми.

При размоле жестких волокон с высоким содержанием лигнина, благодаря которому стенка волокна прочнее, обрывков волокон образуется меньше, а размолотые волокна получают некоторую извитость, и доля волокон, форма которых близка к прямолинейной, снижается.

Данные о структурно-размерных свойствах волокон из целлюлозы сосны скрученной с низким содержанием лигнина, изменяющихся при размоле, представлено в табл. 1, из которой следует, что средняя длина волокна закономерно снижается с 1,94 до 1,38 мм за счет рубки, значения ширины сохраняются около 30 мкм. Фактор формы, характеризующий степень прямизны волокон, увеличивается с 82,1 до 87,1 % за счет того, что изогнутые фрагменты волокон обрываются при размоле, происходит накопление мелочи в массе с 2,0 до 3,2 %.

Характер изменения характеристик волокон при размоле целлюлозы из сосны скрученной с высоким содержанием лигнина несколько иной (табл. 2). Средняя длина волокна при размоле уменьшается с 2,06 до 1,86 мм, а ширина возрастает с 31,4 до 32,2 мкм, фактор формы снижается с 89,2 до 84,7, т. е. в результате размола такой целлюлозы волокна искривляются, сохраняя свою длину.

Различия в размерных свойствах данных полуфабрикатов проявляются, если рассмотреть коэффициент вытянутости волокон (отношение длины волокон к ширине), который является важным показателем, характеризующим потенциал структурообразования бумажного листа при отливе. У волокон с высоким содержанием лигнина коэффициент вытянутости волокон снижается от 64,4 у неразмолотой до 46,1 при размоле до 61 °ШР (изменение составляет 18,3). У целлюлозы с высоким содержанием лигнина он варьируется при размоле от 65,5 до 57,8, т. е. изменение составляет всего 7,7.

Т а б л и ц а 1

**Изменение структурно-морфологических свойств волокон
небеленой сульфатной целлюлозы сосны скрученной с числом Каппа 25 при размоле**
Changes in the structural and morphological properties of Lodgepole pine (Kappa number 25) fibers during refining

Параметр	Продолжительность размола, мин							
	0	20	40	60	80	90	110	120
Степень помола, °ШП	16	18	21	27	36	41	54	61
Средняя длина волокна l_{cp} , мм	1,94	1,90	1,81	1,67	1,59	1,54	1,43	1,38
Средняя ширина волокна b , мкм	30,1	29,7	29,6	29,7	29,9	29,9	29,9	30,0
Коэффициент вытянутости l_{cp}/b	64,4	63,9	61,1	56,3	53,2	51,6	47,7	46,1
Средний фактор формы f , %	82,1	84,7	85,3	85,9	86,4	86,5	87,1	87,1
Содержание мелочи (<0,2 мм) m , %	2,0	2,3	2,4	2,4	2,5	2,7	3,0	3,2
Грубость G , дг	183	157	148	153	145	156	126	141
Средний угол излома u , град.	60,5°	61,4°	62,4°	63,3°	63,0°	61,8°	60,7°	60,6°
Число изломов на 1 мм n_1	0,811	0,510	0,468	0,461	0,473	0,464	0,461	0,462
Число больших изломов на 1 мм n_{1b}	0,345	0,212	0,205	0,208	0,210	0,196	0,189	0,196
Число изломов на волокно, n	1,348	0,824	0,716	0,628	0,595	0,575	0,530	0,511
Число больших изломов на волокно n_b	0,573	0,343	0,314	0,284	0,273	0,242	0,217	0,217
Средний индекс излома I	2,222	1,420	1,317	1,306	1,337	1,295	1,275	1,274
Средняя длина сегмента l_s , мм	1,236	1,346	1,334	1,250	1,188	1,170	1,108	1,075

Т а б л и ц а 2

**Изменение структурно-морфологических свойств волокон небеленой
сульфатной целлюлозы сосны скрученной с числом Каппа 56 при размоле**
Changes in the structural and morphological of Lodgepole pine properties (Kappa number 56) fibers during refining

Параметр	Продолжительность размола, мин							
	0	20	40	60	80	90	110	130
Степень помола, °ШП	16	18	21	26	34	39	51	62
Средняя длина волокна l_{cp} , мм	2,06	2,00	1,99	1,97	1,96	1,95	1,92	1,86
Средняя ширина волокна b , мкм	31,4	31,3	31,7	32,1	32,1	32,1	32,2	32,2
Коэффициент вытянутости l_{cp}/b	65,5	63,9	62,6	61,4	61,2	60,8	59,7	57,8
Средний фактор формы f , %	89,2	85,7	85,2	85,1	85,0	85,0	85,0	84,7
Содержание мелочи (<0,2 мм) m , %	2,9	2,9	2,9	2,7	2,6	2,5	2,5	2,7
Грубость G , дг	211	169	159	168	182	165	156	161
Средний угол излома u , град.	54,8°	63,6°	65,5°	65,2°	67,2°	65,6°	66,7°	66,0°
Число изломов на 1 мм n_1	0,281	0,404	0,366	0,379	0,396	0,407	0,400	0,432
Число больших изломов на 1 мм n_{1b}	0,094	0,181	0,176	0,182	0,201	0,192	0,202	0,213
Число изломов на волокно, n	0,495	0,576	0,614	0,633	0,663	0,675	0,670	0,673
Число больших изломов на волокно n_b	0,165	0,258	0,295	0,303	0,336	0,318	0,328	0,332
Средний индекс излома I	0,735	1,147	1,063	1,095	1,165	1,179	1,169	1,256
Средняя длина сегмента l_s , мм	1,692	1,547	1,519	1,491	1,475	1,461	1,437	1,371

Наблюдается направленное изменение структурно-размерных свойств, которое не является уникальным [42] и характерно для многих волокнистых полуфабрикатов из хвойных и лиственных пород древесины. Сравнимые волокнистые полуфабрикаты изначально незначительно различаются по длине, ширине и коэффициенту вытянутости, а их изменение при размоле определяется наличием лигнина в стенке волокна.

В связи с изложенными особенностями изменения структурно-размерных свойств целлюлозы

в процессе размола удобнее анализировать, если вычислить относительное их изменение, приняв за 100 % величины после роспуска. Графики, отражающие эти закономерности, представлены на рис. 3. В качестве образца сравнения при оценке скорости размола принят производственный образец товарной сульфатной небеленой хвойной целлюлозы марки НС-2, у которого число Каппа 26 ед., исходная средняя длина 2,34 мм, средняя ширина 28,8 мкм, средний фактор формы 85,0 [28].

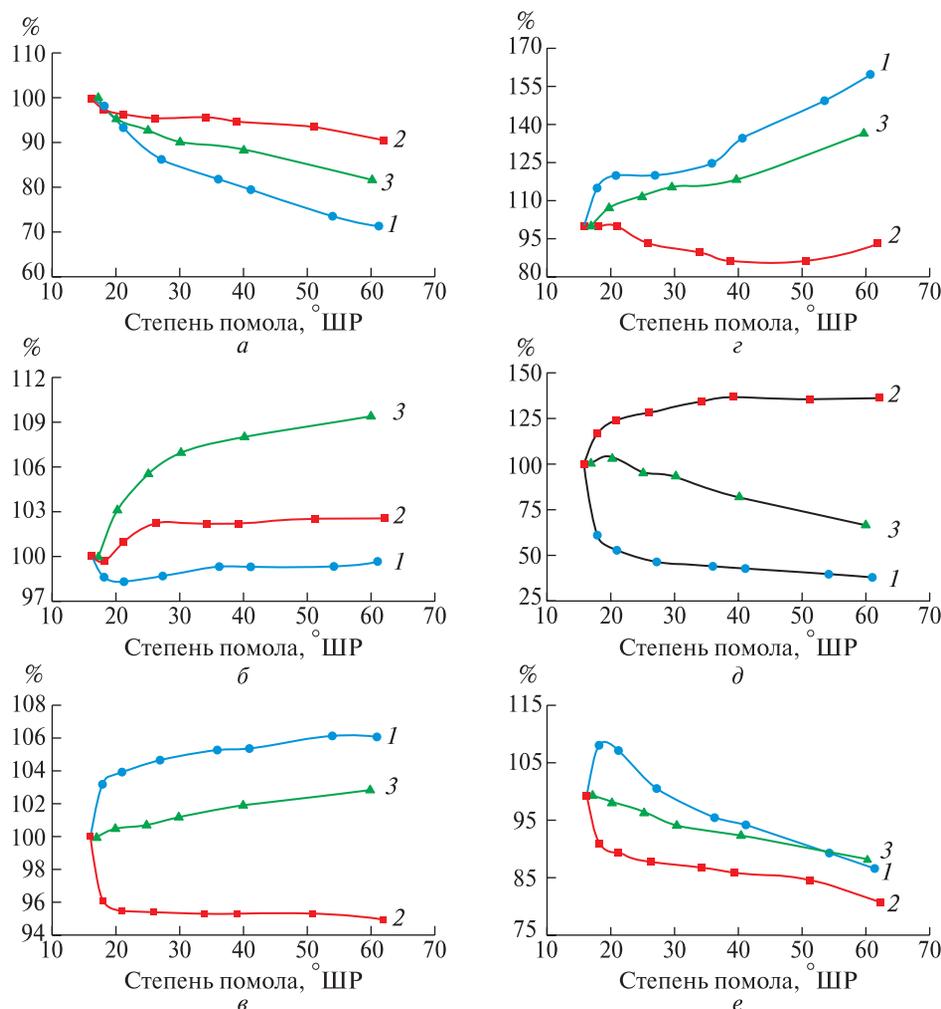


Рис. 3. Относительное изменение структурно-размерных свойств сульфатной небеленой целлюлозы в процессе размола. За 100 % приняты величины после роспуска: 1 — из сосны скрученной, число Каппа 25 ед.; 2 — из сосны скрученной, число Каппа 56 ед.; 3 — производственная НС-2 [28]; а — средняя длина волокна; б — средняя ширина волокна; в — средний фактор формы; г — содержание мелочи (<0,2 мм); д — среднее число изломов на волокно; е — средняя длина сегмента

Fig. 3. Relative change in the structural and dimensional properties of the kraft unbleached softwood pulp in the refining; for 100 % the values after dispergation are taken: 1 — lodgepole pine pulp, kappa number 25; 2 — lodgepole pine pulp, kappa number 56; 3 — industrial pulp USKP-2 [28]; а — the average fiber length; б — average fiber width; в — the mean shape factor; г — fines content; д — the average number of kinks per fiber; е — average segment length

При последовательном увеличении степени помола целлюлозы от исходной до 61...62 °ШР у них всех наблюдается снижение средней длины волокна, однако наибольшее снижение зафиксировано у целлюлозы из сосны скрученной с низким содержанием лигнина — на 28,6 %, в отличие от целлюлозы с высоким содержанием лигнина — на 9,5 % (см. рис. 3, а). У производственной целлюлозы НС-2 снижение на 18,4 %, что соответствует среднему значению.

При размоле происходят два одновременно протекающих процесса. С одной стороны, в результате размола повышается гибкость волокон за счет нарушения сплошности клеточной стен-

ки — внутренней фибрилляции, а также гидратации. С другой — в результате механического воздействия имеет место рубка волокон, которая проходит в основном по ослабленным изломами участкам клеточной стенки. Таким образом, изогнутые ранее концевые участки волокон отрываются.

При этом происходит накопление мелочи в массе (волокна длиной <0,2 мм, см. рис. 3, г), которое для мягкой целлюлозы максимально. Увеличение размола до 61 °ШР составляет 60 относительных процента (с 2,0 до 3,2 %). При размоле жесткой целлюлозы с числом Каппа 56 ед. увеличения мелочи не зафиксировано, что, видимо,

связано с дополнительным измельчением обрывков волокон, которые теряют вытянутую форму и программным обеспечением прибора не воспринимаются как волокна.

Фактор формы волокна оценивает степень прямизны (или кривизны) волокон и вычисляется как отношение длины хорды, соединяющей концы волокна, к длине волокна, при этом влияет на формирование структуры бумажного листа. Измерения проводятся в условиях свободного движения волокон в ламинарном потоке сильно разбавленной водной суспензии. Отклонение формы волокна от прямолинейной определяется гибкостью волокон и наличием на них локальных повреждений — изломов. Чем прямее волокно, тем ближе значение фактора формы к 100 %.

Содержание лигнина в целлюлозе определяет жесткость и прочность клеточной стенки волокна, поэтому для целлюлоз с высоким и низким содержанием лигнина тенденции изменения фактора формы противоположны (см. рис. 3, в). Изначально волокна целлюлозы с высоким содержанием лигнина более прямые и при размоле становятся более гибкими, фактор формы снижается. Волокна с низким содержанием лигнина легче разрушаются по местам дефектов, а оставшиеся фрагменты — более прямые.

При выделении целлюлозных волокон из растительного сырья в процессах диспергирования, перемешивания, сгущения и транспортировки волокнистой суспензии волокна действием механических нагрузок, часто при повышенной температуре и pH, получают повреждения, степень которых оценивается с помощью количества и угла изломов, а также размеров прямолинейных сегментов на волокне. Именно поврежденность клеточной стенки является важным фактором при выяснении отклонений в бумагообразующих и физико-механических характеристиках полуфабрикатов и готовой продукции в виде бумаги и картона. Проявляются дефекты в виде перегибов, скручивания, складок, микросжатий клеточной стенки волокна, возникающих в процессе получения полуфабрикатов и их последующей обработки в технологических объектах. При этом воздействие на слабые участки волокна приводит к необратимым изменениям — их изломам и обрывам [31, 42].

Дефекты клеточной стенки фиксируются анализатором волокна Fiber Tester как изломы волокна (при условии, что угол составляет свыше 30°). Количество изломов и их интенсивность зависят от прочности стенки волокна и по-разному могут влиять на формирование структуры бумаги, с одной стороны, и прочности — с другой. Более деформированные волокна улучшают равномерность формования и плотность листа,

но одновременно снижают прочность бумаги за счет снижения собственной прочности волокон. Кроме того, в условиях интенсивных нагрузок на волокно при размоле изломы способствуют укорочению волокна.

Средний угол излома целлюлозы с низким содержанием лигнина изменяется незначительно — в пределах $60,5 \dots 63,3^\circ$. Для жесткой целлюлозы средний угол излома в результате размола после начального резкого роста примерно на 10° , далее увеличивается незначительно составляя 66° при 62°ШР . Это соответствует изменению фактора формы. Количество изломов на волокно также изменяется при размоле, и, как следствие, средняя длина сегментов (неповрежденных жестких участков клеточной стенки) существенно изменяется, и мягкой целлюлозы это происходит активнее, чем у жесткой.

Выводы

По результатам проведенного эксперимента установлены особенности изменения структурно-размерных свойств сульфатной небеленой целлюлозы из сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) в условиях лабораторного стандартизированного размола.

Волокнистые полуфабрикаты из сосны скрученной оказывают высокое сопротивление размолу, требуя повышенного расхода энергии на размол. Труднее поддается размальванию целлюлоза с высоким содержанием остаточного лигнина.

Волокна целлюлозы для производства картона (число Каппа 56 ед.) по сравнению с целлюлозой для последующего отбеливания и производства бумаги (число Каппа 25 ед.) более длинные (2,1 мм против 1,9 мм), более широкие (31,4 мкм против 30,1 мкм) и менее изогнутые (фактор формы 89,2 против 82,1) и имеют меньше число изломов на 1 мм (0,28 против 0,81).

Изменение фракционного состава по длине, ширине и фактору формы волокна, а также структурно-размерных свойств целлюлозы из сосны скрученной зависит коренным образом от содержания лигнина. Более глубокая делигнификация волокон древесины сосны скрученной приводит не только к изменению содержания лигнина, но и к снижению прочности и жесткости отдельных волокон. Волокна с низким содержанием лигнина легче разрушаются по местам дефектов, а оставшиеся фрагменты обладают повышенной прямизной. В результате изменяется эффект размола от преимущественной фибрилляции и незначительного увеличения мелочи для волокон целлюлозы для картона к преимущественной рубке волокон, которая проходит в основном по ослабленным изломами участкам клеточной стенки. В результате изогнутые ранее концевые участки волокон

отрываются. При этом увеличивается скорость снижения длины волокна, изменяется направление изменения структурно-размерных свойств при размоле, разнонаправленно изменяется содержание мелочи, число изломов на волокно и средняя длина сегмента.

Список литературы

- [1] Мелехов И.С. Интродукция хвойных в лесном хозяйстве // Лесоведение, 1984. № 6. С. 72–78.
- [2] Bäcklund S. The Introduction of *Pinus contorta* in Sweden. Implications for forest diversity: Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala / Sofia Bäcklund // SLU Service/Repro, Uppsala, 2016, 56 p.
- [3] Дроздов И.И., Александрова М.С., Румянцев Д.Е. Влияние климатических факторов на радиальный прирост сосны кедровой сибирской (*Pinus Sibirica* Du Tour.) в условиях Главного ботанического сада РАН // Бюллетень Главного ботанического сада, 2008. № 194. С. 56–60.
- [4] Jansons A., Sisenis L., Neimane U., Rieksts-Riekstins J. Biomass production of young lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia*) stands in Latvia // iForest — Biogeosciences and Forestry, 2013, v. 6, iss. 1, pp 10–14. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer0637-006>
- [5] Полубояринов О.И. Федоров Р.Б. Обоснование выбора древесных пород при выращивании древесины как сырья для целлюлозно-бумажной промышленности // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Л.: Изд-во ЛТА, 1990. С. 63–67.
- [6] Knight D. H., Baker W. L., Engelmark O., Nilsson C. A landscape perspective on the establishment of exotic tree plantations: Lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Sweden // Forest Ecology and Management 2001, v. 141(1–2), pp. 131–142.
- [7] Sable I., Grinfelds U., Jansons A., Vikele L., Irbe I., Verovkins A., Treimanis A. Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*Pinus contorta*) and scots pine (*Pinus sylvestris*) // Pine wood and fibers. BioResources, 2012, v. 7(2), pp. 1771–1783.
- [8] Bäcklund S., Jönsson M.T., Strengbom J., Göran T. Tree and stand structure of the non-native *Pinus contorta* in relation to native *Pinus sylvestris* and *Picea abies* in managed forests in boreal Sweden // Scandinavian J. of Forest Research, 2018, v. 33, iss. 3, pp. 245–254. DOI: 10.1080/02827581.2017.1364785
- [9] Пинягина Н.Б. Обзор и анализ статистической информации о деятельности целлюлозно-бумажной промышленности за 3 квартала 2021 года // Packaging R&D, 2022. № 1(45). С. 4.
- [10] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Жукова В.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть II // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 2. С. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84
- [11] Брынцев В.А., Лавренов М.А. Оценка результатов интродукции видов рода *Larix Mill.* в центр европейской части России // Хвойные бореальной зоны, 2019. Т. XXXVII. № 6. С. 385–395.
- [12] Братилова Н.П., Коновалова Д.А., Нечаева Д.А., Алексеевич Е.Г. Биологическая продуктивность боковых побегов деревьев сосны кедровой сибирской разных форм // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений, 2018. Т. 21. С. 46–48.
- [13] Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) reaction to climate change in the provenance tests in the north of the Russian plain // Folia Forestalia Polonica, Series A, 2021, t. 63, no. 2, pp. 138–149.
- [14] Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden — a review // Forest Ecology and Management, 2001, no. 141, pp. 15–29.
- [15] Dāble I., Grinfelds U., Jansons Ā., Vīele L., Irbe I., Verovkins A., Bāders E., Treimanis A. Suitability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and lodgepole pine (*Pinus contorta*) wood for paper production: Comparative analysis // Mežzinātne, 2012, no. 26(59), pp. 155–166 (in Latvian with English abstract).
- [16] Стафеев Б.Л. Североамериканская сосна скрученная — перспективная порода для интродукционного испытания в Архангельской области // Вопросы интродукции хозяйственно ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск: Изд-во АИЛиЛХ, 1989. С. 35–43.
- [17] Алексеев В.М., Жигунов А.В., Бондаренко А.С., Бурцев Д.С. Интродукция сосны скрученной в условиях Ленинградской области // ИзВУЗ Лесной журнал, 2014. № 3. С. 24–33.
- [18] Корчагов С.А., Грибов С.Е., Смирнов А.В., Хамитов Р.С., Щекалев Р.В. Влияние типа условий местопроизрастания и географического положения популяций на степень интрогрессивной гибридизации ели в Вологодской области // Лесохозяйственная информация, 2020. № 4. С. 94–104.
- [19] Гутый Л.Н., Федорков А.Л. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве республики Коми // ИзВУЗ Лесной журнал, 2016. № 1. С. 48–54.
- [20] Федорков А.Л., Туркин А.А. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Республике Коми // Лесоведение, 2010. № 1. С. 70–74.
- [21] Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Демиденко С.А., Быков Ю.С., Парамонов А.А. Рост и развитие сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) в условиях северной тайги // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2016. № 2. С. 45–59.
- [22] Раевский Б.В., Мордась А.А. Ход роста культур сосны скрученной в подзоне средней тайги // ИзВУЗ Лесной журнал, 2005. № 1–2. С. 23–33.
- [23] Фекистов П.А., Бирюков С.Ю., Федяев А.Л. Сравнительные эколого-биологические особенности сосны скрученной и обыкновенной в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: Изд-во Архангельского ГТУ, 2008. 118 с.
- [24] Бабич Н.А., Хамитов Р.С., Андропова М.М. Ступенчатая интродукция древесных растений на севере Русской равнины. Архангельск: Изд-во САФУ, 2021. 412 с.
- [25] Нилов В.Н., Павлова М.А., Стафеев Б.Л. О качестве древесины североамериканской сосны скрученной на Европейском Севере // ИзВУЗ Лесной журнал, 1987. № 3. С. 56–60.
- [26] Heiðarsson L., Pukkala T., Snorrason A. Individual-tree growth models for lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Iceland // Icelandic Agricultural Sciences, 2023, no. 36, pp. 81–93.
- [27] Zhu J.Y., Vahey D.W., Scott C.T., Myers G.C. Effect of tree-growth rate on papermaking fiber properties // Appita Journal, 2008, v. 61, no. 2, pp. 141–155.
- [28] Лебедев И.В., Казаков Я.В. Характеристика структурно-размерных свойств волокон хвойной сульфатной целлюлозы с применением статистического моделирования // Хвойные бореальной зоны, 2016. Т. XXXVII. № 5–6. С. 333–337.

- [29] Zeng X., Retulainen E., Heinemann S., Fu S. Fibre deformations induced by different mechanical treatments and their effect on zero-span strength // *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2012, v. 27(2), pp. 335–342.
- [30] Kang K.-Y., Zhang S.Y., Mansfield S.D. The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (*Pinus Banksiana* Lamb.) // *Holzforschung*, 2004, v. 58, pp. 455–463.
- [31] Алашкевич Ю.Д., Севергин В.А., Решетова Н.С., Воронин И.А. Современные направления в области исследования процесса размола волокнистых материалов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Красноярск: Изд-во СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2021. С. 246–248.
- [32] Gharekhani S., Sadeghinezhad E., Kazi S.N., Yarmand H., Badarudin A., Safaei M.R., Zubir M.N.M. Basic effects of pulp refining on fiber properties – A review // *Carbohydrate Polymers*, 2015, v. 115, pp. 785–803. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>
- [33] Chen T., Xie Y., Wei Q., Wang X. (Alice), Hagman O., Karlsson O., Liu J. Effect of Refining on Physical Properties and Paper Strength of *Pinus massoniana* and China Fir Cellulose Fibers // *BioResources*, 2016, v. 11(3). DOI:10.15376/biores.11.3.7839-7848
- [34] Sable I., Grinfelds U., Vikele L., Rozenberga L., Zeps M., Neimane U., Jansons A. Effect of Refining on the Properties of Fibres from Young Scots (*Pinus Sylvestris*) and Lodgepole Pines (*Pinus Contorta*) // *Baltic Forestry*, 2017, v. 23(2), pp. 529–533.
- [35] Ушаков А.В., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А., Ковалев В.И. Современное состояние и перспективы совершенствования процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации (обзор) // *Химия растительного сырья*, 2020. № 4. С. 315–329. DOI 10.14258/jcprm.2020048251
- [36] Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д., Каплев Е.В., Васильева Д.Ю., Слизикова Е.А. Анализ движения потока волокнистой суспензии в размалывающей установке при получении мелкодисперсной целлюлозы // *Химия растительного сырья*, 2023. № 3. С. 317–327. DOI: 10.14258/jcprm.20230312008.
- [37] Robertsen L., Joutsimo O. The effect of mechanical treatment on kraft pulps produced from different softwood raw materials // *Paperi ja Puu/Paper and Timber*, 2005, v. 87(2), pp. 111–115.
- [38] Joutsimo O., Robertsen L. The effect of mechanical treatment on kraft pulp fibers. Pulp and fiber properties // *Paperi ja Puu/Paper and Timber*, 2004, v. 86(5), pp. 359–364.
- [39] Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester // *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, v. 50, pp. 12572–12578. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie201631q>
- [40] Казаков Я.В., Корельская Е.А. Технология расширенной сравнительной характеристики структурно-размерных свойств волокнистых полуфабрикатов по данным автоматического анализатора волокна // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы 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: Изд-во САФУ, 2023. С.31–37.
- [41] Крушевская Н.А., Казаков Я.В., Окулова Е.О., Бабич Н.А. Свойства сульфатной целлюлозы из древесины интродуцированной сосны, выращенной в условиях европейского севера // *Физикохимия растительных полимеров: Материалы X Междунар. конф.*, 26–29 июня 2023 г., Архангельск. Архангельск: Изд-во САФУ, 2023. С.121–124.
- [42] Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps — ranking of pulps may shift // *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 2018, v. 33, no. 3, pp. 468–481. DOI: 10.1515/npprj-2018-3058

Сведения об авторах

Казаков Яков Владимирович  — д-р техн. наук, проф. кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), j.kazakov@narfu.ru

Бабич Николай Алексеевич — д-р с.-х. наук, проф. кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), n.babich@narfu.ru

Крушевская Наталья Андреевна — магистрант кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), n.krushevskaya@narfu.ru

Поступила в редакцию 07.03.2024.

Одобрено после рецензирования 27.06.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

KRAFT PULP STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTY CHANGES PRODUCED FROM REFINED INTRODUCED LODGEPOLE PINE WOOD

Ya.V. Kazakov✉, N.A. Babich, N.A. Krushevskaya

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberzhnaya Severnoy Dviny st., 163002, Arkhangelsk, Russia

j.kazakov@narfu.ru

Modification features in the structural and dimensional properties of kraft unbleached pulp obtained from Lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) were identified and analyzed under laboratory standardized refining conditions of up to 60 SR at the Yokro mill. Measurements were carried out using an automatic fiber analyzer L&W Fiber Tester. Pulp fibers for board production (Kappa number 56), compared to pulp for subsequent bleaching and papermaking (Kappa number 25), are longer (2,1 mm versus 1,9 mm), wider (31,4 μ m versus 30,1 μ m), less curved (shape factor 89,2 versus 82,1) and have fewer fractures per 1 mm (0,28 versus 0,81). Lodgepole pine pulp has high resistance to refining and requires increased energy consumption for refining. The nature of changes in the fractional composition along the length, width and fiber shape factor, as well as the structural and dimensional properties of lodgepole pine cellulose depends fundamentally on the lignin content. Fibers with a low lignin content are more easily destroyed at defect sites, and the remaining fragments have increased straightness. As a result, the refining effect changes from predominant fibrillation and a slight increase in fines for cellulose fibers for cardboard, to predominant chopping of fibers, which passes mainly along the sections of the cell wall weakened by fractures, and the previously bent end sections of the fibers are torn off. At the same time, the rate of decrease in fiber length increases, and the direction of change in the structural and dimensional properties during refining changes, the content of fines, the number of breaks per fiber and the average length of the segment change in different directions. The differences in fiber properties measured on the automatic fiber analyzer L&W Fiber Tester are characterized in pulp samples with high (Kappa number 56) and low (Kappa number 25) lignin content. It has been shown that with a decrease in the lignin content in pulp, the average fiber length decreases from 2,1 to 1,9 mm, the average width from 31,4 to 30,1 μ m, the form factor from 89,2 to 82,1 %, and the number of kinks per 1 mm increases from 0,28 to 0,81. It was revealed that the nature of the change in the fractional composition by length, width and fiber shape factor, as well as the structural and dimensional properties of pulp from lodgepole pine during refining depends fundamentally on the lignin content. It has been established that fibers with a low lignin content are more easily destroyed when refined at defect sites, and the remaining fragments have increased straightness. The change in the milling effect is shown from predominant fibrillation and a slight increase in fines for fibers with a high lignin content to predominant chopping of fibers with a low lignin content. With a decrease in lignin content, the rate of decrease in fiber length during refining increases, and the direction of change in structural and dimensional properties changes.

Keywords: Lodgepole pine, introduction, fibers, kraft pulp, structural and morphological properties, fractional composition

Suggested citation: Kazakov Ya.V., Babich N.A., Krushevskaya N.A. *Izmenenie strukturno-morfologicheskikh svoystv sul'fatnoy tsellyulozy iz drevesiny introdutsirovannoy sosny skruchennoy pri razmole* [Kraft pulp structural and morphological property changes produced from refined introduced Lodgepole pine wood]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 153–165. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-153-165

References

- [1] Melekhov I.S. *Introduktsiya khvoynykh v lesnom khozyaystve* [Introduction of conifers in forestry]. *Russian J. of Forest Science* [Lesovedenie], 1984, no. 6, pp. 72–78.
- [2] Bäcklund S. The Introduction of *Pinus contorta* in Sweden. Implications for forest diversity: Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala / Sofia Bäcklund. SLU Service/Repro, Uppsala, 2016, 56 p.
- [3] Drozdov I.I., Aleksandrova M.S., Rumyantsev D.E. *Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na radial'nyy prirost sosny kedrovoy sibirskoy (Pinus Sibirica Du Tour): v usloviyakh Glavnogo botanicheskogo sada RAN* [Influence of climatic factors on the radial growth of Siberian stone pine (*Pinus Sibirica* Du Tour.) in the conditions of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences]. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Main Botanical Garden], 2008, no. 194, pp. 56–60.
- [4] Jansons A., Sisenis L., Neimane U., Rieksts-Riekstins J. Biomass production of young lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia*) stands in Latvia. *iForest — Biogeosciences and Forestry*, 2013, v. 6, iss. 1, pp 10–14. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer0637-006>
- [5] Poluboyarinov O.I. Fedorov R.B. *Obosnovaniye vybora drevesnykh porod pri vyrashchivaniy drevesiny kak syr'ya dlya tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Justification of the choice of tree species when growing wood as raw material for the pulp and paper industry]. *Lesovodstvo, lesnye kul'tury i pochvovedeniye* [Silviculture, forest crops and soil science]. Leningrad: LTA, 1990, pp. 63–67.
- [6] Knight D. H., Baker W. L., Engelmark O., Nilsson C. A landscape perspective on the establishment of exotic tree plantations: Lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Sweden. *Forest Ecology and Management* 2001, v. 141(1–2), pp. 131–142.
- [7] Sable I., Grinfelds U., Jansons A., Vikele L., Irbe I., Verovkins A., Treimanis A. Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*Pinus contorta*) and scots pine (*Pinus sylvestris*). *Pine wood and fibers. BioResources*, 2012, v. 7(2), pp. 1771–1783.

- [8] Bäcklund S., Jönsson M.T., Strengbom J., Göran T. Tree and stand structure of the non-native *Pinus contorta* in relation to native *Pinus sylvestris* and *Picea abies* in managed forests in boreal Sweden. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2018, v. 33, iss. 3, pp. 245–254. DOI: 10.1080/02827581.2017.1364785
- [9] Pinyagina N.B. *Obzor i analiz statisticheskoy informatsii o deyatel'nosti tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti za 3 kvartala 2021 goda* [Review and analysis of statistical information on the activities of the pulp and paper industry for 3 quarters of 2021]. *Packaging R&D*, 2022, no. 1 (45), p. 4.
- [10] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Ju.V., Zhukova V.A. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. IV. Delignifikatsiya drevesiny kak put' polucheniya tsellyulozy. Chast' II* [Wood as chemical raw material. History and modernity. IV. Wood delignification as a way to produce cellulose. Part II]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84
- [11] Bryntsev V.A., Lavrenov M.A. *Otsenka rezul'tatov introduktsii vidov roda Larix Mill. v tsentr evropeyskoy chasti Rossii* [Evaluation of the results of the introduction of species of the genus Larix Mill. to the center of the European part of Russia]. *Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone]*, 2019, v. XXXVII, no. 6, pp. 385–395.
- [12] Bratilova N.P., Konovalova D.A., Nechaeva D.A., Aleksievich E.G. *Biologicheskaya produktivnost' bokovykh pobegov derev'ev sosny kedrovoy sibirskoy raznykh form* [Biological productivity of lateral shoots of Siberian cedar pine trees of different forms]. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy* [Fruit growing, seed production, introduction of woody plants], 2018, v. 21, pp. 46–48.
- [13] Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) reaction to climate change in the provenance tests in the north of the Russian plain. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 2021, t. 63, no. 2, pp. 138–149.
- [14] Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden — a review. *Forest Ecology and Management*, 2001, no. 141, pp. 15–29.
- [15] Dāble I., Grīnfelds U., Jansons Ā., Vītele L., Irbe I., Verovkins A., Bāders E., Treimanis A. Suitability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and lodgepole pine (*Pinus contorta*) wood for paper production: Comparative analysis. *Mēpzinātne*, 2012, no. 26(59), pp. 155–166 (in Latvian with English abstract).
- [16] Stafeev B.L. *Severoamerikanskaya sosna skruchennaya — perspektivnaya poroda dlya introduktsionnogo ispytaniya v Arkhangel'skoy oblasti* [North American lodgepole pine is a promising species for introduction testing in the Arkhangelsk region]. *Voprosy introduktsii khozyaystvenno tsennykh drevesnykh porod na Evropeyskiy Sever* [Issues of introduction of economically valuable tree species to the European North]. *Arkhangel'sk: AILiLH*, 1989, pp. 35–43.
- [17] Alekseev V.M., Zhigunov A.V., Bondarenko A.S., Burtsev D.S. *Introduktsiya sosny skruchennoy v usloviyakh Leningradskoy oblasti* [Introduction of lodgepole pine in the Leningrad region]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2014, no. 3, pp. 24–33.
- [18] Korzhagov S.A., Gribov S.E., Smirnov A.V., Khamitov R.S., Shchekalev R.V. *Vliyanie tipa usloviy mestoproizrastaniya i geograficheskogo polozheniya populyatsiy na stepen' introgressivnoy gibridizatsii eli v Vologodskoy oblasti* [Influence of the type of habitat conditions and geographical location of populations on the degree of introgressive hybridization of spruce in the Vologda region]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry information]*, 2020, no. 4, pp. 94–104.
- [19] Gutiy L.N., Fedorkov A.L. *Eksperimental'nye kul'tury sosny skruchennoy v Syktyvkar'skom lesnichestve respubliki Komi* [Experimental cultures of lodgepole pine in the Syktyvkar forestry of the Komi Republic]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2016, no. 1, pp. 48–54.
- [20] Fedorkov A.L., Turkin A.A. *Eksperimental'nye kul'tury sosny skruchennoy v Respublike Komi* [Experimental cultures of lodgepole pine in the Komi Republic]. *Russian J. of Forest Science [Lesovedenie]*, 2010, no. 1, pp. 70–74.
- [21] Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Demidenko S.A., Bykov Yu.S., Paramonov A.A. *Rost i razvitie sosny skruchennoy (Pinus contorta Loud. var. latifolia S. Wats) v usloviyakh severnoy taygi* [Growth and development of lodgepole pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) in the northern taiga]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute]*, 2016, no. 2, pp. 45–59.
- [22] Raevskiy B.V., Mordas' A.A. *Khod rosta kul'tur sosny skruchennoy v podzone sredney taygi* [Growth course of lodgepole pine crops in the middle taiga subzone]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2005, no. 1–2, pp. 23–33.
- [23] Feklistov P.A., Biryukov S.Yu., Fedyaev A.L. *Sravnitel'nye ekologo-biologicheskie osobennosti sosny skruchennoy i obyknovennoy v severnoy podzone evropeyskoy taygi* [Comparative ecological and biological features of lodgepole and Scots pine in the northern subzone of the European taiga]. *Arkhangel'sk: Publishing house of Arkhangelsk State Technical University*, 2008, 118 p.
- [24] Babich N.A., Khamitov R.S., Andronova M.M. *Stupenchataya introduktsiya drevesnykh rasteniy na severe Russkoy ravniny* [Stepwise introduction of woody plants in the north of the Russian Plain]. *Arkhangel'sk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov*, 2021, 412 p.
- [25] Nilov V.N., Pavlova M.A., Stafeev B.L. *O kachestve drevesiny severoamerikanskoy sosny skruchennoy na Evropeyskom Severe* [On the quality of North American twisted pine wood in the European North]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 1987, no. 3, pp. 56–60.
- [26] Heiðarsson L., Pukkala T., Snorrason A. Individual-tree growth models for lodgepole pine (*Pinus contorta*) in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*, 2023, no. 36, pp. 81–93.
- [27] Zhu J.Y., Vahey D.W., Scott C.T., Myers G.C. Effect of tree-growth rate on papermaking fiber properties. *Appita J.*, 2008, v. 61, no. 2, pp. 141–155.
- [28] Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. *Kharakteristika strukturno-razmernykh svoystv volokon khvoynoy sul'fatnoy tsellyulozy s primeneniem statisticheskogo modelirovaniya* [Characteristics of the structural and dimensional properties of coniferous sulfate cellulose fibers using statistical modeling]. *Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone]*, 2016, v. XXXVII, no. 5–6, pp. 333–337.
- [29] Zeng X., Retulainen E., Heinemann S., Fu S. Fibre deformations induced by different mechanical treatments and their effect on zero-span strength. *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 2012, v. 27(2), pp. 335–342.
- [30] Kang K.-Y., Zhang S.Y., Mansfield S.D. The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (*Pinus Banksiana* Lamb.). *Holzforchung*, 2004, v. 58, pp. 455–463.

- [31] Alashkevich Yu.D., Severgin V.A., Reshetova N.S., Voronin I.A. *Sovremennyye napravleniya v oblasti issledovaniya protsessa razmola voloknistykh materialov* [Modern trends in the field of research into the grinding process of fibrous materials]. *Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem nauki* [Young scientists in solving urgent problems of science]. Krasnoyarsk: Siberian State University named after M.F. Reshetnev, 2021, pp. 246–248.
- [32] Gharehkhani S., Sadeghinezhad E., Kazi S.N., Yarmand H., Badarudin A., Safaei M.R., Zubir M.N.M. Basic effects of pulp refining on fiber properties — A review. *Carbohydrate Polymers*, 2015, v. 115, pp. 785–803. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>
- [33] Chen T., Xie Y., Wei Q., Wang X. (Alice), Hagman O., Karlsson O., Liu J. Effect of Refining on Physical Properties and Paper Strength of *Pinus massoniana* and China Fir Cellulose Fibers. *BioResources*, 2016, v. 11(3). DOI: 10.15376/biores.11.3.7839-7848
- [34] Sable I., Grinfelds U., Vikele L., Rozenberga L., Zeps M., Neimane U., Jansons A. Effect of Refining on the Properties of Fibres from Young Scots (*Pinus Sylvestris*) and Lodgepole Pines (*Pinus Contorta*). *Baltic Forestry*, 2017, v. 23(2), pp. 529–533.
- [35] Ushakov A.V., Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V.A., Kovalev V.I. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy sovershenstvovaniya protsessa razmola voloknistykh polufabrikatov vysokoy kontsentratsii (obzor)* [Current state and prospects for improving the grinding process of high-concentration fibrous semi-finished products (review)]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2020, no. 4, pp. 315–329. DOI 10.14258/jcprm.2020048251
- [36] Yurtaeva L.V., Alashkevich Yu.D., Kaplev E.V., Vasil'eva D. Yu., Slizikova E.A. *Analiz dvizheniya potoka voloknistoy suspenzii v razmalyvayushchey ustanovke pri poluchenii melkodispersnoy tsellyulozy* [Analysis of the flow of fibrous suspension in a grinding unit during the production of finely dispersed cellulose]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2023, no. 3, pp. 317–327. DOI: 10.14258/jcprm.20230312008
- [37] Robertsen L., Joutsimo O. The effect of mechanical treatment on kraft pulps produced from different softwood raw materials. *Paperi ja Puu/Paper and Timber*, 2005, v. 87(2), pp. 111–115.
- [38] Joutsimo O., Robertsen, L. The effect of mechanical treatment on kraft pulp fibers. *Pulp and fiber properties*. *Paperi ja Puu/Paper and Timber*, 2004, v. 86(5), pp. 359–364.
- [39] Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, v. 50, pp. 12572–12578. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie201631q>
- [40] Kazakov Ya.V., Korel'skaya E.A. *Tekhnologiya rasshirennoy sravnitel'noy kharakteristiki strukturno-razmernykh svoystv voloknistykh polufabrikatov po dannym avtomaticheskogo analizatora volokna* [Technology of extended comparative characteristics of the structural and dimensional properties of fibrous semi-finished products according to the data of an automatic fiber analyzer]. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: Mater. VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. imeni professora V.I. Komarova* [Problems of mechanics of pulp and paper materials: Proc. VII Int. scientific-technical. conf. named after professor V.I. Komarova], Arkhangelsk, September 14–16, 2023. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk: NArFU, 2023, pp. 31–37.
- [41] Krushevskaya N.A., Kazakov Ya.V., Okulova E.O., Babich N.A. *Svoystva sul'fatnoy tsellyulozy iz drevesiny introdutsirovannoy sosny, vyrashchennoy v usloviyakh evropeyskogo Severa* [Properties of sulfate cellulose from introduced pine wood grown in the conditions of the European North]. *Fizikokhimiya rastitel'nykh polimerov* [Physicochemistry of plant polymers]. Proc. X int. conf. June 26–29, 2023. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2023, pp. 121–124.
- [42] Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps — ranking of pulps may shift. *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 2018, v. 33, no. 3, pp. 468–481. DOI: 10.1515/npprj-2018-3058

Authors' information

Kazakov Yakov Vladimirovich  — Dr. Sci. (Engineering) Professor of the Department of pulp and paper and wood chemical production, of the Higher School of Natural Sciences and Technologies, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU), j.kazakov@narfu.ru

Babich Nikolay Alekseevich — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests of the Higher School of Natural Sciences and Technologies, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU), n.babich@narfu.ru

Krushevskaya Natal'ya Andreevna — Master student of the Department of the Department of pulp and paper and wood chemical production, of the Higher School of Natural Sciences and Technologies, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU), n.krushevskaya@narfu.ru

Received 07.03.2024.

Approved after review 27.06.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest