

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.164.3; 676.032.16

DOI: 10.53374/1993-0135-2023-6-521-529

Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. XLI, № 6. С. 521–529

СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОН СОСНЫ СКРУЧЕННОЙ, ВЫРАЩЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ИНТРОДУКЦИОННОГО СТРЕССА

Я. В. Казаков, Н. А. Бабич

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Российская Федерация, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17

*Представлены результаты сравнения структурно-морфологических свойств волокон целлюлозы, полученной сульфатным способом из интродуцированной сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) и сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) из образцов древесины одного диаметра с точки зрения оценки их бумагообразующего потенциала для использования в производстве бумаги и картона. Целлюлоза для сравнения получена по одинаковому режиму сульфатной варки. Выход целлюлозы составил 53,6 и 42,0 %, а число каппа 39 и 41 у сосны скрученной и сосны обыкновенной соответственно. Определение структурно-морфологических характеристик волокна проводилось на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester для образцов без размола и после размола в мельнице Йокро до 30 °ШР. Для обработки данных использована оригинальная технология сравнительного анализа свойств волокон в MS Excel, данные представлены в табличном виде, и в виде сравнительных диаграмм свойств и фракционного состава, а также двумерные диаграммы длина-ширина по волокнам. Результаты показали большую схожесть структурно-морфологических свойств волокон сульфатной небеленой целлюлозы из сосны скрученной и обыкновенной. По сравнению с целлюлозой из сосны обыкновенной, неразмолотые волокна сосны скрученной несколько более длинные (2,098 мм против 2,064 мм), и широкое (33,7 мкм против 33,5 мкм), содержит меньше мелочи (0,9 против 1,2 %). Различия во фракционном составе по длине волокна более заметны для неразмолотых образцов. Наибольшие различия проявляются для фракций 1,7–2,3 мм, в которых больше доля у сосны обыкновенной, за счет чего появляются различия в средней длине волокна. В результате размола, под действием гидромеханических нагрузок, свойства волокон сосны скрученной изменяются в более сильной степени, а размол до одинаковой степени помола сглаживает различия во фракционном составе по длине волокна. Результаты свидетельствуют о меньшей прочности стенки волокна целлюлозы из сосны скрученной, что связано с ускоренным ростом.*

Ключевые слова: волокно, сульфатная целлюлоза, структурно-морфологические свойства, фракционный состав.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 6, P. 521–529

STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF LODGEPOLE PINE FIBERS GROWN UNDER CONDITIONS OF INTRODUCTION STRESS

Y. V. Kazakov, N. A. Babich

Northen (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

*The results of a comparison of the structural and morphological properties of cellulose fibers obtained by the kraft method from introduced lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) and Scots pine (*Pinus silvestris* L.) from wood samples of the same diameter are presented in terms of assessing their papermaking potential for use in production paper and cardboard. Pulp for comparison was obtained using the same kraft cooking regime. The pulp yield was 53.6 and 42.0 %, and the kappa number was 39 and 41 for lodgepole pine and Scots pine, respectively.*

Measurement of the structural and morphological characteristics of the fibers was carried out on an automatic fiber analyzer L&W Fiber Tester for samples without refining and after refining in a Yokro mill up to 30 SR. For data processing, an original technology for comparative analysis of fiber properties in MS Excel was used; the data is presented in tabular form, and in the form of comparative diagrams of properties and fractional composition, as well as two-dimensional length-width diagrams for fibers.

The results showed great similarity in the structural and morphological properties of unbleached kraft pulp fibers from lodgepole and Scots pine. Compared to Scots pine cellulose, unrefined lodgepole pine fibers are slightly longer (2.098 mm vs. 2.064 mm), and wider (33.7 μm vs. 33.5 μm), and contain less fines (0.9 vs. 1.2 %).

Differences in the fractional composition along the fiber length are more noticeable for unrefined samples. The greatest differences appear for fractions of 1.7–2.3 mm, in which Scots pine has a larger proportion, due to which differences in the average fiber length appear. As a result of refining, under the influence of hydromechanical loads, the properties of lodgepole pine fibers change to a greater extent, and refining to the same SR smooths out differences in the fractional composition along the length of the fiber. The results indicate lower fiber wall strength of lodgepole pine pulp, which is associated with accelerated growth.

Keywords: *fibers, kraft pulp, structural and morphological properties, fractional composition.*

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задачи обеспечения предприятий целлюлозно-бумажной промышленности древесным сырьем, в мировой практике все большее внимание уделяется искусственному выращиванию лесов. Ускоренный рост древесины, повышение продуктивности лесов, снижение производственных затрат на доставку сырья на предприятие – ключевые преимущества данного подхода.

Сосна скрученная была интродуцирована во многих странах мира, прежде всего, за высокую производительность по сравнению с местными породами. Многочисленные исследования, в основном в Швеции и Финляндии, подтверждают, что сосна скрученная превосходит аборигенную сосну по росту и производству биомассы [6].

В странах северо-западной Европы хорошие результаты достигнуты при плантационном выращивании сосны скрученной, ареал естественного произрастания которой составляют страны американского континента [1]. Опираясь на этот опыт, в 1979 году в Архангельской области было начато интродукционное испытание североамериканской сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm), были проведены обширные исследования приживаемости и роста данного вида [1; 5; 7], которые показали хорошие результаты. Установлено, что у сосны скрученной к 30-летнему возрасту динамика ширины годичного слоя выше, чем у сосны обыкновенной, в одинаковых условиях произрастания. Количество годичных слоев в 1 см, больше у сосны обыкновенной, во всех категориях [7; 8].

В 1986 году, Нилов В. Н. и соавт. провели исследование образцов древесины сосны скрученной широколиственной, в старой посадке на территории Сортвальского лесхоза Карельской АССР. При сравнении образцов с высоты ствола 1,3 м, было выявлено, что у сосны скрученной по сравнению с сосной обыкновенной, при большей ширине годичного слоя, больше и число трахеид в радиальном ряду. За счет меньшей толщины стенок трахеид и более высокого показателя соотношения поперечника полости к поперечнику трахеиды, у сосны скрученной больше поверхностная пористость древесины. При измерении длины трахеид древесины сосны скрученной и обыкновенной, существенных отличий выявлено не было. В возрасте 10 лет, длина трахеид сосны скрученной и сосны обыкновенной соответственно, составила $2,28 \pm 0,12$ мм и $2,12 \pm 0,08$ мм, а в возрасте 50 лет $2,49 \pm 0,11$ мм и $2,49 \pm 0,06$ мм. Однако следует отме-

тить большое варьирование показателя у сосны скрученной, особенно в молодом возрасте [3].

При выращивании в одинаковых условиях сосна скрученная по качеству древесины не уступает сосне обыкновенной. По результатам некоторых исследований сообщается, что сосна скрученная имеет лучшую форму ствола, менее подвержена искривлению и растрескиванию во время сезонного хранения. Целлюлоза из нее имеет большую разрывную длину и более гибкие волокна. Естественная очистка ствола от сучьев по сравнению с сосной обыкновенной происходит медленнее, что значительно отличает эти два вида сосен [6].

В Ирландии, Великобритании, Швеции было отмечено, что сосна скрученная является перспективной породой для ускоренного выращивания древесины, пригодной для целлюлозно-бумажной промышленности в странах с умеренным климатом [7; 10]. В Швеции, сосна скрученная считается наилучшим сырьем для целлюлозно-бумажной продукции [9].

Исследования подобного характера проводились и на территории Архангельской области. Ю. И. Дроздов отмечает, что особая ценность древесины сосны скрученной – возможность получения целлюлозы как сульфитным, так и сульфатным способами, при выходе целлюлозы 45–50 % [2].

Нилов В. Н. и соавторы изучили образцы древесины сосны скрученной широколиственной, в старой посадке на территории Сортвальского лесхоза Карельской АССР. Они показали, что сульфатная целлюлоза из сосны скрученной при степени делигнификации 36,4 ед. Каппа характеризуется значениями разрывной длины, сопротивления раздиранию и продавливанию, превышающими эти показатели ГОСТа 11208–82 для целлюлозы хвойной сульфатной небеленой марки НС-1 [3].

В работе [11] представили результаты сульфатной варки древесины сосны скрученной и сосны обыкновенной, выход после варки сосны скрученной значительно выше, в целом, можно говорить о схожести результата. Однако авторы также отмечают влияние плотности древесины на ее удельный расход при варке. Так, сосна скрученная, обладая большей плотностью, имеет меньший расход на варку. Волокна сосны скрученной являются более длинными и менее широкими, чем волокна из сосны обыкновенной. Это означает, что волокна из сосны скрученной были более гибкими и обеспечивали лучшую прочность сцепления волокон, чем волокна сосны обыкновенной. Это также повлияло на механические свойства листов, в основном на разрывную прочность [11].

Структурно-морфологические свойства волокнистых полуфабрикатов представляют собой набор базовых характеристик выделенных растительных волокон, в сильной степени определяющих их бумагообразующие свойства и, соответственно, уровень прочностных и деформационных характеристик готовой бумаги или картона. Из всего спектра структурно-морфологических свойств наиболее популярны длина и ширина волокна, его гибкость и способность сохранять размеры и форму при воздействии силовых факторов процесса массоподготовки, поскольку именно эти свойства в наибольшей степени влияют на уровень бумагообразующих свойств [12; 13; 14; 15].

В настоящее время для контроля и углубленного исследования структурно-морфологических свойств волокнистых полуфабрикатов применяются новейшие инструментальные методы. Современные автоматические анализаторы волокна Fiber Tester (Lorentzen & Wettre), Morfi Compact (TechPap), Kajani (Valmet) и другие, позволяют за короткое время (5–6 мин) провести измерение набора геометрических характеристик до 20 тысяч отдельных волокон в пробе [14; 15]. Математическая обработка измеренных параметров дает гистограммы распределения длины, и ширины волокон, характеристик, оценивающих кривизну волокон, а также число изломов на волокне, долю мелочи и т. п. [15]. Во всех случаях результаты представляются в виде набора средних значений, гистограмм

распределения характеристик и нескольких величин размеров волокон, учитывающих взвешенную, объёмную или массовую долю [12; 13; 14].

Цель данной работы: сравнение структурно-морфологических свойств волокон целлюлозы, полученной сульфатным способом из интродуцированной сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) и дикорастущей сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) из образцов древесины одного диаметра, с точки зрения оценки их бумагообразующего потенциала для использования в производстве бумаги и картона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На базе Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова были проведены исследования свойств сосны скрученной интродуцированной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) и сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.). Образцы древесины примерно одинакового диаметра были отобраны на опытном участке в Приморском районе Архангельской области, рис. 1, а.

Сосна скрученная в возрасте 22 года имеет высоту 5,5 м, диаметр ствола 15–17 см, что соответствует таким же параметрам сосны обыкновенной, в возрасте 45 лет. При этом сосна скрученная имеет толщину коры 2...3 мм, неоднородную толщину годовых колец, составляющую в ядровой части 4...8 мм, в заболони 1...3 мм, рис. 1, б [17].



а



б



в

Рис. 1. Интродуцированная сосна скрученная (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm): а – на опытном участке в Приморском районе Архангельской области; б – поперечный срез ствола; в – щепа ручной рубки

Образцы после ручной окорки были распилены на шайбы высотой 2,5 см, из которых вручную получена щепка толщиной не более 5 мм, рис. 1, в. Опилки, полученные от поперечной распиловки древесины, были просушены и отсортированы на сите с перфорацией 0,25 мм, после чего использованы для изучения химического состава древесины.

Результаты химического анализа свидетельствуют о схожести древесины сосны скрученной и обыкновенной. При близкой величине содержания целлюлозы ($49,8 \pm 2,0$ и $50,9 \pm 2,0$ %) и лигнина ($24,6 \pm 1,5$ и $25,9 \pm 1,5$ %), древесина сосны скрученной имеет повышенное содержание экстрактивных веществ ($4,95 \pm 0,1$ против $1,87 \pm 0,1$) и золы ($0,35 \pm 0,05$ против $0,24 \pm 0,05$), что вызывает оптимизм при обсуждении перспектив ее химической переработки [17].

Небеленую сульфатную целлюлозу получали на автоклавной системе CAS 420 в лаборатории волокнистых полуфабрикатов Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ. Одновременно в соседних автоклавах проводили варки щепу из сосны скрученной и, для сравнения, из сосны обыкновенной. Условия варки: гидромодуль 3, расход активной щелочи на варку 18,5 %; температура варки 170 °С. Выход целлюлозы составил 53,6 и 42,0 %, а число каппа 39 и 41 у сосны скрученной и сосны обыкновенной соответственно.

Для определения структурно-морфологических свойств, образцы целлюлозы были подвержены роспуску и размолу в мельнице Йокро (ЦРА) при концентрации 6 % до степени помола 30 °ШР.

Определение структурно-морфологических характеристик волокна проводилось на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester [16]. При проведении измерений в поляризованном делаются световые цифровые снимки сильно разбавленной суспензии в виде тонкого плоского ламинарного потока, согласно ISO 16065-1.

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, а также двумерные диаграммы длина-ширина по волокнам и объектам (сосудам) [18]. Данная технология позволяет дать сравнительную характеристику структурно-морфологических свойств для выбранного набора (до 4-х образцов) волокнистых полуфабрикатов. Наглядное представление позволяет сравнить свойства различных образцов целлюлозы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структурно-морфологические характеристики волокна, измеренные на анализаторе Fiber Tester, представлены в таблице. Проанализированы волокна из целлюлозной массы, отобранной из размольного стакана мельницы Йокро в начале и после размола до 30 °ШР: целлюлоза из сосны обыкновенной без размола (обозначено СОБР) и после размола (СОПР),

и из сосны скрученной без размола (ССБР) и после размола (ССПР).

Установлено наличие различий в структурно-морфологических свойствах сульфатной целлюлозы из сосны скрученной, от целлюлозы из сосны обыкновенной. По сравнению с целлюлозой из сосны обыкновенной, неразмолотые волокна сосны скрученной несколько более длинные (2,098 мм против 2,064 мм), и широкие (33,7 мкм против 33,5 мкм), менее изогнутые (фактор формы 88,0 против 86,4) и имеют меньше изломов на мм (0,38 против 0,48). Также целлюлоза из сосны скрученной содержит меньше мелочи (0,9 против 1,2 %), повышенную грубость (221 против 208 дг), и большую среднюю длину прямолинейных сегментов (1,62 против 1,50 мм). Это связано с большей шириной годичных колец, и большими размерами отдельных волокон, что связано с ускоренным ростом деревьев.

После размола, который является обязательной стадией процесса массоподготовки при изготовлении бумаги и картона, под действием гидромеханических нагрузок, свойств волокон сосны скрученной, изменяются в более сильной степени. Это говорит о меньшей прочности стенки волокна, что связано с ускоренным ростом. Так, после размола до 30 °ШР, длина волокна целлюлозы из сосны скрученной становится меньше (1,77 мм против 1,79 мм), повышен средний угол излома ($61,2^\circ$ против $59,7^\circ$), становится больше изломов на 1 мм (0,451 против 0,438), содержание мелочи увеличивается сильнее (с 0,9 до 1,6 % против (с 1,2 до 1,5 %)), снижается средняя длина прямолинейных сегментов (1,29 против 1,4 мм).

Фракционный состав по длине и ширине волокна, а также по фактору формы (прямоизне) волокон представлен на рис. 2.

Различия во фракционном составе по длине волокна более заметны для неразмолотых образцов, наибольшие различия проявляются для фракций 1,7–2,3 мм, здесь больше доля у сосны обыкновенной. Именно за счет различий в этих фракциях появляются различия в средней длине волокна. Размол до одинаковой степени помола сглаживает различия во фракционном составе по длине волокна.

Силовое воздействие размальвающей гарнитуры на волокно приводит к направленным изменениям содержания фракций по длине волокна, рис. 2, а, происходит увеличение содержания коротковолокнистых фракций с длиной менее 1,5 мм, и снижение содержания фракций с длиной более 2,0 мм. Соответственно, сдвигается в коротковолокнистую область положение максимума на кривой распределения по длине волокна. У размолотых волокон сосны скрученной выше содержание фракций 1,0–1,5 мм, а у сосны обыкновенной – 2,0–2,7 мм.

Диаграммы фракционного состава по ширине волокна сосны обыкновенной и сосны скрученной также имеют некоторые отличия, рис. 2, б, выражающиеся в большей величине максимума у волокон сосны обыкновенной, то есть у сосны скрученной несколько выше полидисперсность волокон по ширине, как в неразмолотом, так и в размолотом состоянии.

Структурно-морфологические свойства волокон целлюлозы сосны скрученной и обыкновенной

| Параметр | Целлюлоза сосны обыкновенной | | Целлюлоза сосны скрученной | |
|----------------------------------|------------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
| | до размола | после размола | до размола | после размола |
| Обозначение | СОБР | СОПР | ССБР | ССПР |
| Средняя длина волокна, мм | 2,064 | 1,792 | 2,098 | 1,773 |
| Средняя ширина волокна, мкм | 33,5 | 32,3 | 33,7 | 32,2 |
| Средний фактор формы, % | 86,4 | 85,1 | 88,0 | 85,5 |
| Содержание мелочи, % (< 0,2 мм) | 1,2 | 1,5 | 0,9 | 1,6 |
| Грубость, дг | 208 | 75 | 221 | 74 |
| Средний угол излома, град | 55,9 | 59,7 | 55,7 | 61,2 |
| Число изломов на мм | 0,481 | 0,438 | 0,377 | 0,451 |
| Число больших изломов на мм | 0,171 | 0,178 | 0,131 | 0,191 |
| Число изломов на волокно | 0,850 | 0,672 | 0,668 | 0,635 |
| Число больших изломов на волокно | 0,302 | 0,270 | 0,232 | 0,269 |
| Средний индекс излома | 1,272 | 1,205 | 0,995 | 1,258 |
| Средняя длина сегмента, мм | 1,496 | 1,396 | 1,620 | 1,286 |

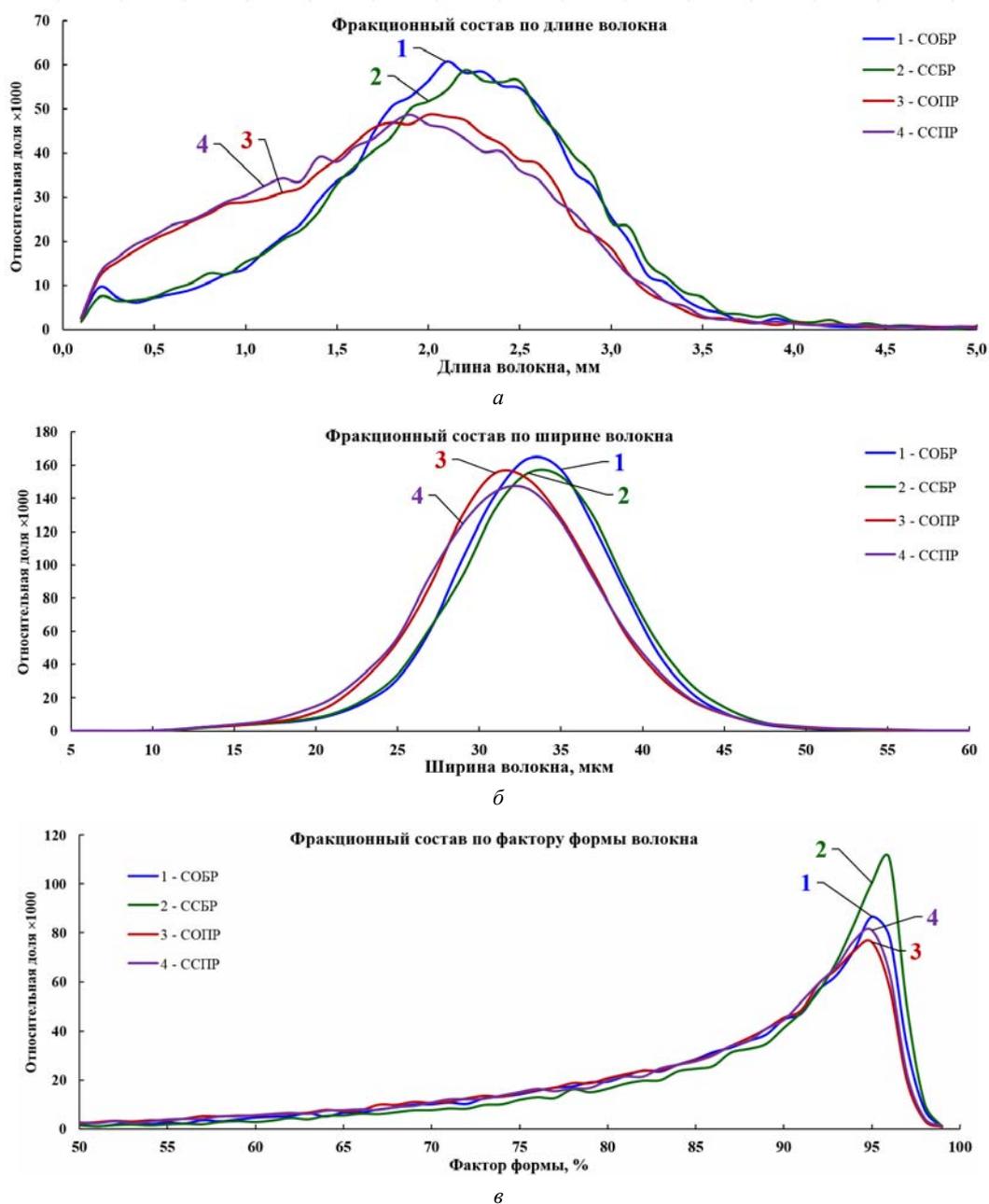


Рис. 2. Фракционный состав по длине волокна:

а – по длине волокна; б – по ширине волокна; в – по фактору формы (прямоизне) волокон

Изменения при размоле фракционного состава по ширине волокна, рис. 2, б, показывают, что положение максимума сдвигается в сторону уменьшения, а его высота снижается, то есть происходит перераспределение фракций с шириной волокна, близкой к средней, в сторону увеличения. При этом содержание фракций с шириной менее 15 мкм изменяется незначительно.

Таким образом, снижение средней ширины волокна при размоле связано с уменьшением содержания фракций с шириной более 35 мкм.

Диаграммы фракционного состава по фактору формы волокна сосны обыкновенной и сосны скрученной также имеют отличия, рис. 2, в, но, главным образом, в области практически прямых волокон с фактором формы выше 92 %. У сосны скрученной наблюдается большая величина максимума, чем у волокон сосны обыкновенной, как в неразмолом, так и в размолотом состоянии. Размол в наибольшей степени сказывается на прямизне волокон целлюлозы из сосны скрученной, резко снижается содержание практически прямых волокон с фактором формы выше 95 %, что доказывает влияние размола на волокно, при котором длинные прямые волокна подвергаются рубке, с получают извитость вследствие гидромеханических нагрузок.

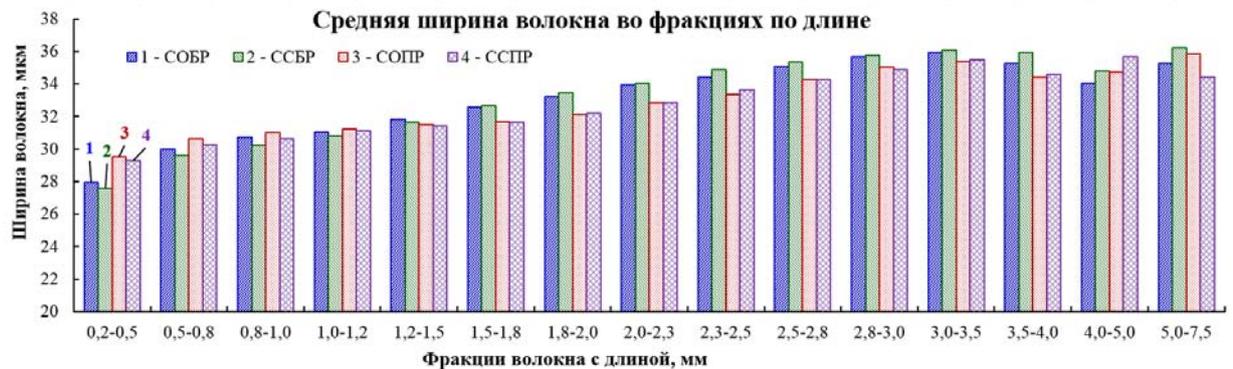
На рис. 3, а представлено изменение величины средней ширины волокна по фракциям волокон различной длины. Ширина волокна закономерно увеличивается, с увеличением длины волокна во фракциях. После размола, ширина волокна у коротких фракций

увеличивается, а у длинных уменьшается, что связано с рубкой крупных волокон при размоле и повышение содержания обрывков крупных волокон во фракциях с малой длиной волокна.

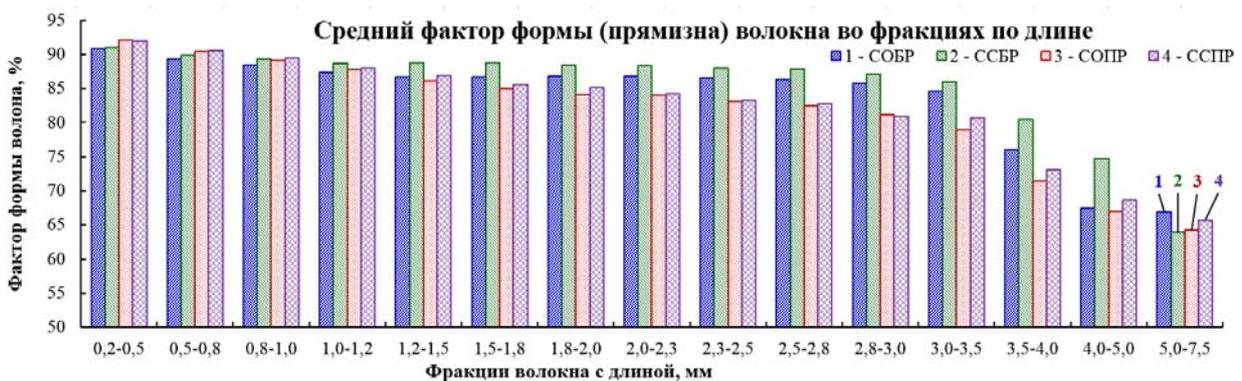
С увеличением длины волокна, фактор формы образцов сосны скрученной и обыкновенной постепенно снижается, рис. 3, б, то есть более длинные волокна являются и более изогнутыми, что закономерно. У размолотых образцов выше прямизна волокон в коротких фракциях с длиной волокна менее 1 мм, а в длинных фракциях выше прямизна у волокон без размола. У сосны скрученной волокна более прямые практически во всех фракциях.

Примененная нами технология сравнительного анализа свойств волокон позволяет также построить двумерные диаграммы длина-ширина волокна, рис. 4. Наглядное представление позволяет сравнить свойства исследованных образцов целлюлозы. Более светлые области диаграммы соответствуют большему содержанию фракций.

Диаграммы для неразмолотых целлюлоз сосны обыкновенной, рис. 4, а, и сосны скрученной, рис. 4, б, весьма схожи. При таком способе представления данных заметны становятся изменения в структурно-размерных свойствах сосновых волокон при воздействии размола на волокно. Максимум на диаграмме, рис. 4, в и г, смещается в область коротких фракций по длине, и повышается полидисперсность волокон по ширине.



а



б

Рис. 3. Изменение параметров волокон во фракциях по длине: а – средняя ширина волокон, мкм; б – средний фактор формы, %

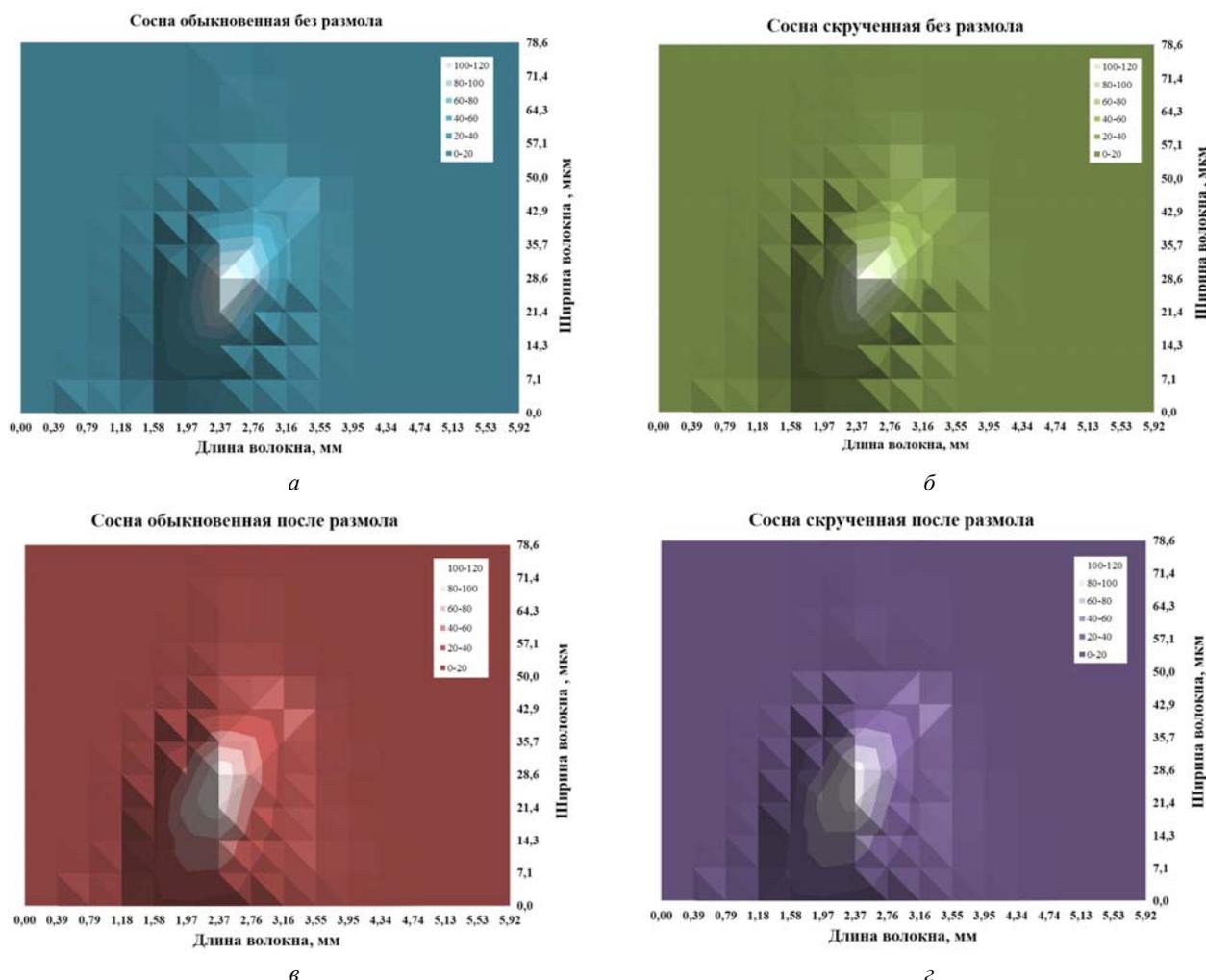


Рис. 4. Двумерные диаграммы длина-ширина волокна: а – сосна обыкновенная без размола; б – сосна скрученная без размола; в – сосна обыкновенная после размола; г – сосна скрученная после размола

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное сравнение структурно-морфологических свойств волокон целлюлозы, полученной сульфатным способом из интродуцированной сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) и дикорастущей сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) из образцов древесины одного диаметра, с точки зрения оценки их бумагообразующего потенциала для использования в производстве бумаги и картона показало большую схожесть структурно-морфологических свойств волокон сульфатной небеленой целлюлозы из сосны скрученной и обыкновенной.

По сравнению с целлюлозой из сосны обыкновенной, неразмолотые волокна сосны скрученной несколько более длинные (2,098 мм против 2,064 мм), и широкие (33,7 мкм против 33,5 мкм), содержит меньше мелочи (0,9 против 1,2 %), имеет повышенную грубость (221 против 208 дг). Это связано с большей шириной годичных колец, и большими размерами отдельных волокон.

Различия во фракционном составе по длине волокна более заметны для неразмолотых образцов, наибольшие различия проявляются для фракций 1,7–2,3 мм, здесь больше доля у сосны обыкновенной. Именно

за счет различий в этих фракциях появляются различия в средней длине волокна.

В результате размола, под действием гидромеханических нагрузок, свойств волокон сосны скрученной, изменяются в более сильной степени, а размол до одинаковой степени помола сглаживает различия во фракционном составе по длине волокна.

Все отмеченные особенности свидетельствуют о меньшей прочности стенки волокна, целлюлозы из сосны скрученной, что связано с ускоренным ростом. При введении в композицию бумаги целлюлозы из сосны скрученной, выращенной в условиях интродукционного стресса, не потребуются значительных изменений в режиме работы узла размола массоподготовительного отдела бумажной фабрики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Стафеев Б. Л. Северо-американская сосна скрученная – перспективная порода для интродукционного испытания в Архангельской области // Вопросы интродукции хозяйственно-ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск : АИЛиЛХ, 1989. С. 35–43.

2. Дроздов И. И., Дроздов Ю. И. Культуры сосны скрученной в решении сырьевой проблемы балансовой древесины // Лесн. вестник МГУЛ. 2005. № 5. С. 83–84.

3. Нилов В. Н., Павлова М. А., Стафеев Б. Л. О качестве древесины североамериканской сосны скрученной на Европейском Севере // Лесной журнал. 1987. № 3. С. 56–60. (Изв. высш. учеб. заведений).

4. Раевский Б. В., Мордась А. А. Ход роста культур сосны скрученной в подзоне средней тайги // Лесной журнал. 2005. № 1–2. С. 23–33. (Изв. высш. учеб. заведений).

5. Алексеев В. М., Жигунов А. В., Бондаренко А. С., Бурцев Д. С. Интродукция сосны скрученной в условиях Ленинградской области // Лесной журнал. 2011. № 3. С. 24–33. (Изв. высш. учеб. заведений)

6. 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.

7. Феклистов П. А., Бирюков С. Ю., Федяев А. Л. Сравнительные эколого-биологические особенности сосны скрученной и обыкновенной в северной подзоне европейской тайги // Архангельск : Изд-во АГТУ, 2008. 118 с.

8. Гутый Л. Н., Федорков А. Л. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве республики Коми // Лесной журнал. 2016. № 1. С. 48–54. (Изв. высш. учеб. заведений).

9. 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.

10. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review // Forest Ecology and Management. 2001. № 141. P. 15–29

11. Sable I. Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*Pinus contorta*) and scots pine (*Pinus sylvestris*) / I. Sable, U. Grinfelds, A. Jansons, L. Vikele, I. Irbe, A. Verovkins, A. Treimanis // "Pine wood and fibers" BioResources. 2012. 7(2). P. 1771–1783.

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

13. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Характеристика структурно-размерных свойств волокон хвойной сульфатной целлюлозы с применением статистического моделирования // Хвойные бореальной зоны. XXXVII, 2016. № 5–6. С. 333–337.

14. 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.

15. Пенкин А. А., Казаков Я. В. Изменение структурно-морфологических свойств вторичного волокна

из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон // Лесной журнал. 2022. № 5. С. 157–172 (Изв. высш. учеб. заведений).

16. Масленникова А. А., Окулова Е. О., Казаков Я. В., Бабич Н. А. Бумагообразующие свойства целлюлозы из древесины интродуцированных лесных культур // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : матер. V Междунар. науч.-техн. конф. (Архангельск, 11–14 сентября 2019 г.) // Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. Архангельск : САФУ, 2019. С. 148–153.

17. Масленникова А. А., Окулова Е. О., Казаков Я. В., Бабич Н. А. Получение и свойства целлюлозы из древесины сосны скрученной интродуцированной // Физикохимия растительных полимеров : матер. VIII междунар. конфер. (01–05 июля 2019 г.) / Архангельск : Сев. (Арктич.) федер. ун-т имени М. В. Ломоносова, 2019. С. 245–249.

18. Казаков Я. В., Корельская Е. А. Технология расширенной сравнительной характеристики структурно-размерных свойств волоконистых полуфабрикатов по данным автоматического анализатора волокна // 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.

REFERENCES

1. Stafeev B. L. Severo-amerikanskaya sosna skru-chennaya – perspektivnaya poroda dlya introduktsion-nogo ispytaniya v Arkhangel'skoy oblasti // Voprosy introduktsii khozyaystvenno-tsennykh drevesnykh porod na Yevropeyskiy Sever. Arkhangel'sk : AILiLKH, 1989. S. 35–43.

2. Drozdov I. I., Drozdov Yu. I., Kul'tury sosny skruchennoy v reshenii syr'yevoy problemy balansovoy drevesiny // Lesn. vestnik MGUL. 2005. № 5. S. 83–84.

3. Nilov V. N., Pavlova M. A., Stafeev B. L. O kachestve drevesiny severoamerikanskoy sosny skruchennoy na Yevropeyskom Severe // Lesnoy zhurnal. 1987. № 3. S. 56–60. (Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy).

4. Rayevskiy B. V., Mordas' A. A. Khod rosta kul'tur sosny skruchennoy v podzone sredney taygi // Lesnoy zhurnal. 2005. № 1–2. S. 23–33. (Izv. vyssh. ucheb. Zavedeniy).

5. Alekseyev V. M., Zhigunov A. V., Bondarenko A. S., Burtsev D. S. Introduktsiya sosny skruchennoy v usloviyakh Leningradskoy oblasti // Lesnoy zhurnal. 2011. № 3. S. 24–33. (Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy).

6. Demidova N. A., Durkina T. M., Gogoleva L. G., Demidenko S. A., Bykov Yu. S., Paramonov A. A. Rost i razvitiye sosny skruchennoy (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) v usloviyakh severnoy taygi // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva. 2016. № 2. S.45–59.

7. Feklistov P. A., Biryukov S. Yu., Fedayayev A. L. Sravnitel'nyye ekologo-biologicheskiye osobennosti sosny skruchennoy i obyknovennoy v severnoy podzone yevropeyskoy taygi // Arkhangel'sk, izd-vo AGTU, 2008. 118 s.

8. Gutiy L. N., Fedorkov A. L. Eksperimental'nyye kul'tury sosny skruchennoy v Syktvykarskom lesnichestve

respubliki Komi // Lesnoy zhurnal. 2016. № 1. S. 48–54. (Izv. vyssh. ucheb. Zavedeniy).

9. 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.

10. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review // Forest Ecology and Management. № 141. 2001. P. 15–29.

11. Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*Pinus contorta*) and scots pine (*Pinus sylvestris*) / I. Sable, U. Grinfelds, A. Jansons, L. Vikele, I. Irbe, A. Verovkins, A. Treimanis // “Pine wood and fibers” BioResources. 2012. № 7(2). P. 1771–1783.

12. Kazakov Ya. V. Kharakteristika geometricheskikh parametrov volokon tsellyuloznykh polufabrikatov s ispol'zovaniyem veroyatnostnykh metodov // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2014. № 1. С. 269–275.

13. Lebedev I. V., Kazakov Ya. V. Kharakteristika strukturno-razmernykh svoystv volokon khvoynoy sul'fatnoy tsellyulozy s primeneniym statisticheskogo modelirovaniya // Khvoynyye boreal'noy zony. XXXVII, 2016. № 5–6. S. 333–337.

14. Kazakov Ya. V., Manakhova T. N. Bumagoobrazuyushchiy potentsial khvoynoy nebelenoy tsellyulozy: sovremennyy vzglyad cherez avtomaticheskyy analizator volokna // Tsellyuloza. Bumaga. Karton. 2013. № 5. S. 34–39.

15. Penkin A. A., Kazakov Ya. V. Izmeneniye strukturno-morfologicheskikh svoystv vtorichnogo volokna iz vlagoprochnogo syr'ya pri myagkom razmole. Chast' 1. Kharakteristika volokon // Lesnoy zhurn. 2022. № 5. С. 157–172 (Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy).

16. Maslennikova A. A., Okulova Ye. O., Kazakov Ya. V., Babich N. A. Bumagoobrazuyushchiye svoystva tsellyulozy iz drevesiny introdutsirovannykh lesnykh kul'tur // Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov : mater. V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Arkhangel'sk, 11–14 sentyabrya 2019 g.) // Sev. (Arktich.) feder. un-t im. M. V. Lomonosova. Arkhangel'sk : SAFU, 2019. S. 148–153.

17. Maslennikova A. A., Okulova Ye. O., Kazakov Ya. V., Babich N. A. Polucheniye i svoystva tsellyulozy iz drevesiny sosny skruchennoy introdutsirovannoy // Fizikokhimiya rastitel'nykh polimerov : mater. VIII mezhdun. konfer. (01–05 iyulya 2019 g.) / Arkhangel'sk: Sev. (Arktich.) feder. un-t imeni M. V. Lomonosova, 2019. S. 245–249.

18. Kazakov Ya. V., Korel'skaya Ye. A. Tekhnologiya rasshirennoy sravnitel'noy kharakteristiki strukturno-razmernykh svoystv voloknistykh polufabrikatov po dannym avtomaticheskogo analizatora volokna // Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov : mater. VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. imeni professora V. I. Komarova (Arkhangel'sk, 14–16 sentyabrya 2023 g.). Sev. (Arktich.) feder. un-t im. M. V. Lomonosova. Arkhangel'sk : SAFU, 2023. S. 31–37.

© Казаков Я. В., Бабич Н. А., 2023

Поступила в редакцию 20.08.2023
Принята к печати 01.12.2023