



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.16.022.6.034

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-146-159

Особенности изменения структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука при размоле

Хоанг Минь Кхоа, аспирант; ResearcherID: [GXG-6942-2022](https://orcid.org/0000-0002-6731-0033).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6731-0033>

Я.В. Казаков[✉], д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Е.О. Окулова, учебный мастер; ResearcherID: [S-6096-2019](https://orcid.org/0000-0003-1798-1872).


ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1798-1872>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; hoangminhkhhoa.vfu@gmail.com, j.kazakov@narfu.ru[✉], e.okulova@narfu.ru

Поступила в редакцию 21.02.22 / Одобрена после рецензирования 18.05.22 / Принята к печати 23.05.22

Аннотация. Древесина тропических растений, в том числе бамбука, обладает большим потенциалом из-за быстрого роста, простоты выращивания, низкой стоимости и характеристик, ценных для целлюлозно-бумажной промышленности. Рассмотрены структурно-морфологические свойства небеленой целлюлозы, полученной сульфатным способом из древесины бамбука *Vambusa blumeana*, местом произрастания которого является Республика Вьетнам. Сульфатная варка проведена на автоклавной системе CAS 420. Бамбуковая целлюлоза имела выход 41,7 %, число капша – 17,3. Структурно-морфологические свойства волокна измерены на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester, после размола на мельнице Йокро до 60 °ШР. Цифровые микрофотографии получены на микроскопе ImagerM2m Carl Zeiss. Выполнено сравнение динамики структурно-размерных свойств целлюлозы из бамбука и производственной хвойной и лиственной небеленой целлюлозы. Установлено, что при общем, аналогичном лиственной и хвойной целлюлозе, характере изменения свойств при размоле: уменьшении средней длины волокна (с 1,90 до 1,21 мм), числа изломов на волокно (с 0,78 до 0,72), средней длины сегмента (с 1,17 до 0,86 мм), увеличении средней ширины (с 17,8 до 20,6 мкм), фактора формы (с 81,7 до 85,6), содержания мелочи (с 1,8 до 7,0 %) – изменение структурно-размерных характеристик волокна у целлюлозы из бамбука происходит в наибольшей степени. Пониженная ширина волокон при их высокой длине обеспечивает наибольший коэффициент вытянутости волокон (от 106,6 у неразмолотой до 58,8 при 60 °ШР) по сравнению с хвойной (81,3...60,6) и особенно лиственной (44,4...36,0) целлюлозой. Это приводит к уменьшению фактора формы и более легкому повреждению волокон в условиях гидромеханического воздействия при размолу, что выражается в изменении числа изломов на волокне. Максимальные изменения в структуре, размерах, форме волокна и содержании мелочи происходят уже в первые

© Кхоа Х.М., Казаков Я.В., Окулова Е.О., 2023

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

10 мин размола, отсюда следует вывод о низкой прочности бамбуковых волокон и их легкой повреждаемости. Можно предположить, что использование небеленой целлюлозы из бамбука в композиции бурых видов бумаги не приведет к повышению их прочности.

Ключевые слова: целлюлоза из бамбука, бумагообразующие свойства, структурно-морфологические свойства целлюлозы, размол целлюлозы, длина волокна, ширина волокна, фракционный состав

Для цитирования: Кхоа Х.М., Казаков Я.В., Окулова Е.О. Особенности изменения структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука при размоле // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 146–159. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-146-159>

Original article

Features of Changing Structural and Morphological Properties of Bamboo Pulp During Refining

Hoang M. Khoa, Postgraduate Student; ResearcherID: [GXG-6942-2022](https://orcid.org/0000-0002-6731-0033),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6731-0033>

Yakov V. Kazakov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Elena O. Okulova, Training master; ResearcherID: [S-6096-2019](https://orcid.org/0000-0003-1798-1872),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1798-1872>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; hoangminhkhhoa.vfu@gmail.com, j.kazakov@narfu.ru[✉], e.okulova@narfu.ru

Received on February 21, 2022 / Approved after reviewing on May 18, 2022 / Accepted on May 23, 2022

Abstract. The wood of tropical plants, including bamboo, has great potential due to its rapid growth, simple cultivation, low cost, and characteristics suitable for the pulp and paper industry. The study considers the structural-morphological properties of unbleached kraft pulp from the wood of *Bambusa blumeana*, which grows in the Republic of Vietnam. Kraft cooking was carried out on an autoclave system, CAS 420. The obtained bamboo pulp had a yield of 41.7 %, the Kappa number was 17.3. Structural and morphological properties are determined by an automatic fiber analyzer, L&W Fiber Tester. Digital microphotographs were taken with an ImagerM2m Carl Zeiss microscope. Samples were studied before and after refining at the Yokro mill up to 60 °SR. A comparison of the change in the structural and dimensional properties of bamboo pulp fibers was made with industrial softwood and hardwood unbleached pulp. It has been established that, with a general, similar to hardwood and softwood pulp, the nature of the change in properties during refining – a decrease in the average fiber length (from 1.90 up to 1.21 mm), an increase in width (from 17.8 to 20.6 μm), shape factor (from 81.7 to 85.6 %), fines content (from 1.8 to 7.0 %), a decrease in the number of kinks per fiber (from 0,78 to 0,72), the average segment length (from 1.17 to 0.86 mm), also observed for softwood and hardwood pulp, the change in the values of the structural and dimensional characteristics of the fibers in pulp from bamboo occurs to the greatest extent. The reduced fiber width with a high fiber length provides the highest values of the fiber slenderness ratio l/w (from 106.6 for unrefined to 58.8 at 60 °SR) in comparison with softwood (from 81.3 to 60.6) and especially hardwood (from 44.4 to 36.0), which in

turn leads to a reduced shape factor and easier damage to the fibers under hydromechanical action during refining, which is expressed in a change in the number of kinks on a fiber. The maximum changes in the structure, size, shape of the fiber and fine content occur already in the first 10 minutes of refining, which indicates the low strength of bamboo fibers and their easy damage. Therefore, it can be assumed that the use of unbleached bamboo pulp in brown paper furnishing will not lead to an increase in its strength.

Keywords: bamboo pulp, papermaking properties, structural-morphological properties of pulp, refining, fiber length, fiber width, fractional composition

For citation: Khoa H.M., Kazakov Ya.V., Okulova E.O. Features of Changing Structural and Morphological Properties of Bamboo Pulp During Refining. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 146–159. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-146-159>

Введение

В современных условиях при поиске новых быстровозобновляемых источников растительного сырья для химической переработки имеет смысл обратить внимание на древесину некоторых тропических растений, таких как, например, бамбук, который обладает большим потенциалом из-за быстрого роста, простоты выращивания, низкой стоимости и характеристик, ценных для деревоперерабатывающей промышленности в целом и для целлюлозно-бумажной в частности [8, 14, 21].

Для российской целлюлозно-бумажной промышленности расширение сырьевой базы возможно за счет использования экономически выгодных волокнистых полуфабрикатов из растений стран Дальневосточного региона и тропических растений, в том числе бамбука. Однако на данный момент в России бамбук недостаточно изучен и не применяется в производстве целлюлозы.

Бамбук произрастает в принципиально других географических и климатических условиях по сравнению с растениями российских лесов, что обуславливает бумагообразующие свойства, отличающихся от свойств целлюлозы из северных пород древесины [11, 18, 19]. Он широко распространен в зонах субтропиков и тропиков. Основные районы выращивания бамбука – Азиатско-Тихоокеанский, Американский регионы и Африка. Около 80 % бамбуковых лесов мира находятся в Азиатско-Тихоокеанском регионе. В Индии и Китае вместе – примерно 70 % бамбуковых лесов Азии [24].

Многие развивающиеся страны, которым не хватает лесных ресурсов, обладают богатыми запасами бамбука. С точки зрения сохранения лесов или устойчивого экономического развития бамбук является важным недревесным волокнистым сырьем для производства целлюлозы и бумаги, особенно для этих развивающихся стран. Бамбук был незаменим для бумажной промышленности на Индийском субконтиненте и в Китае [8]. Анализ состояния химической переработки растительных материалов в Республике Вьетнам показал, что еще в 2004 г. эта страна использовала 448,2 тыс. т бамбука для производства всех видов бумаги (для сравнения: древесины – 270 тыс. т, прочих недревесных материалов – 275,2 тыс. т и макулатуры – 119,2 тыс. т). Сейчас около 50 % древесины, заготовленной в лесах, применяется для производства целлюлозы [9].

Структурно-морфологические свойства волокнистых материалов во многом определяют их бумагообразующие свойства и уровень механических характеристик готовой бумаги. Длина и ширина волокна, его гибкость и спо-

способность сохранять размеры и форму при воздействии силовых факторов технологического процесса массоподготовки имеют решающее влияние на бумагообразующие свойства. В течение практически всего прошедшего периода развития научных знаний о свойствах бумаги постоянно уделялось внимание структурно-размерным или более широко – структурно-морфологическим свойствам растительных волокон, используемых для производства различных видов бумаги и картона [1, 4, 7, 12, 15, 20].

Для обеспечения требуемых потребительских характеристик необходимо изменение начального состояния волокна, т. е. его природных структурно-морфологических свойств, для чего обязателен размол [1, 2, 12].

Для контроля и углубленного исследования структурно-морфологических свойств волокнистых полуфабрикатов применяются современные автоматизированные инструментальные методы. Компьютерные технологии, электронно-оптические устройства и датчики сделали возможными новые виды автоматизированных измерений. Используемые сегодня современные анализаторы волокна позволяют в автоматическом режиме провести измерения характеристик до 20 тыс. отдельных волокон [15]. Математическая обработка измеренных данных дает гистограммы распределения длины и ширины волокон, а также характеристик их кривизны, числа изломов на волокне, доли мелочи и т. п. [3]. Во всех случаях результаты представляются в виде среднего значения, гистограммы распределения характеристик и нескольких показателей размеров волокон, учитывающих взвешенную, объемную или массовую долю [4, 15, 17].

Технология измерений геометрических размеров целлюлозных волокон заключается в анализе волокнистой массы, когда делают цифровые снимки сильноразбавленной суспензии в виде тонкого плоского ламинарного потока и с помощью программы распознавания образов (Image Analysis) определяют геометрические характеристики волокон [15]. Метод стандартизован. Международными стандартами измерения длины волокна с применением автоматических анализаторов являются ISO 16065-1 (используется поляризованный свет) и ISO 16065-2 (неполяризованный свет).

Изучением структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука занимаются уже достаточно давно [21–23], и геометрические размеры выделенных химическим и механическим путем волокон бамбука известны [13, 14, 16, 24]. Но в то же время установлены факты существенных отличий свойств волокон бамбука разных видов, а условия и место произрастания в данном случае оказывают чрезвычайно большое влияние [16, 18]. Так, средняя длина волокна целлюлозы из бамбука в зависимости от вида и места произрастания может составлять 1,68...2,18 мм при интервале изменения длины отдельных волокон 0,46–0,57...4,13–5,67 мм [16].

Целью данной работы является исследование закономерностей формирования при размоле структурно-морфологических свойств целлюлозного волокна из бамбука, произрастающего в Республике Вьетнам.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются целлюлозные волокна из бамбука *Vambusa blumeana*, место произрастания которого – Республика Вьетнам. Возраст растений составляет 3...5 лет, внешний диаметр стебля – 7...10 см, тол-

щина его стенки – 0,5...1,0 см. Для получения целлюлозы из бамбука ручным способом изготовлена щепка размерами $(15\pm 3)\times(25\pm 2)\times(5\pm 1)$ мм и проведена сульфатная варка на автоклавной системе CAS 420 (CRS Reactor Engineering, Швеция, 2013). Промытую целлюлозу вручную отжимали до сухости 21 % и хранили в герметичном пакете в холодильнике при температуре +4 °С. Полученная бамбуковая целлюлоза имела выход 41,7 %, число каппа – 17,3.

Размол в лабораторных условиях выполнен на мельнице Йокро (Frank-PTI, 2010) при концентрации массы 6 % в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 (ИСО 5264/3–79). Отбор образцов целлюлозной массы для анализа проведен до размола (после роспуска в гидроразбивателе) и через каждые 10 мин размола до итоговой степени помола 60 °ШР. У каждой пробы, взятой из размольного стакана, сразу определяли степень помола, отбирали пробу (примерно 0,05...0,10 г по а. с. волокну) для получения микроскопических фотографий и анализа структурно-морфологических свойств. Целлюлозную суспензию хранили до выполнения анализов в пробоотборниках, без сушки, при неизменной концентрации 6 %.

Микроскопические исследования волокон целлюлозы проведены на исследовательском моторизованном микроскопе высокого разрешения Imager M2m Carl Zeiss (Германия, 2011) с получением цифровых микрофотографий в проходящем свете (увеличение в 100 раз), предусматривающих возможность измерений микрообъектов за счет определения масштаба изображений.

Структурно-морфологические свойства целлюлозы установлены на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester (Lorentzen&Wettre, Швеция, 2010) [1–4, 6, 15], позволяющем выполнять расширенную количественную оценку в автоматическом режиме (в соответствии с ISO 16065-1). Для проведения анализа достаточно 0,1 г волокна в пересчете на абсолютно сухую массу. Разрешение во время измерения составляет 0,2 мкм. Диапазоны измерений следующие: длина волокон – 0,2...7,5 мм; ширина волокон – 10...100 мкм; фактор формы (кривизна) волокон – 50...100 %; идентификация мелочи при длине волокна – менее 0,2 мм. Полный цикл анализа одной пробы, включая разбавление и промывку, занимает около 6 мин, из которых на измерение структурно-морфологических характеристик волокон затрачивается около 100 с.

При помощи анализатора волокна Fiber Tester получены основные структурно-морфологические характеристики образцов: средняя длина (арифметическая, взвешенная по длине, взвешенная по массе), мм, и ширина волокон, мкм; средний фактор формы волокон (частное от деления проекции длины на фактическую длину, характеризует степень прямизны); доля мелочи (по длине) в образце (взвешенный процент волокон короче 0,2 мм относительно числа волокон длиннее 0,2 мм); грубость (масса волокна на единицу длины), мкг/100 м; средний угол излома, ...°; среднее число изломов на 1 мм длины волокна и на волокно, шт.; средняя длина сегмента, мм. Кроме того, определены характеристики фракционного состава: доля волокон в классах длины и ширины, %, до 75 и 50 классов через 0,1 мм и 2 мкм соответственно; средняя ширина волокон в классах длины, мкм; средний фактор формы волокон в классе.

Фактор формы волокна оценивает степень прямизны (или кривизны) волокон. Он измеряется у волокон, свободно движущихся в ламинарном потоке сильноразбавленной водной суспензии. В этих условиях отклонение формы волокна от прямолинейной определяется гибкостью волокон и наличием на них

локальных повреждений – изломов. Также большое значение имеет длина волокна (особенно коэффициент вытянутости) при сравнении фактора формы у различных полуфабрикатов. Как правило, более длинные целлюлозные волокна являются более искривленными и величина фактора формы у них меньше.

При размоле одновременно протекают 2 процесса. С одной стороны, в результате размола повышается гибкость волокон за счет нарушения сплошности клеточной стенки – внутренней фибрилляции, а также гидратации. С другой стороны, из-за механического воздействия происходит рубка волокон, в основном по ослабленным изломами участкам клеточной стенки. Таким образом, изогнутые ранее концевые участки волокон отрываются.

Поврежденность волокна (оценивают с помощью количеств, углов изломов и размеров прямолинейных сегментов на волокне) является важной характеристикой физических, прочностных и деформационных свойств бумаги. Поврежденность клеточной стенки – наименее изученный фактор, влияющий на комплекс бумагообразующих и физико-механических свойств полуфабрикатов и готовой продукции. Влияние проявляется в виде перегибов, скручивания, складок, микросжатий клеточной стенки волокна, возникающих в процессе получения полуфабрикатов и их последующей обработки, сопровождающейся интенсивными гидромеханическим и механохимическим воздействиями. При этом на слабых участках волокон происходят необратимые изменения [1, 2, 4].

Анализатор Fiber Tester фиксирует отмеченные виды дефектов клеточной стенки как изломы волокна (при условии, что угол составляет свыше 30°) [15]. Влияние количества изломов и их интенсивности на формирование структуры полотна и его прочность зачастую носит разнонаправленный характер. Более деформированные волокна улучшают формирование и плотность листа, но одновременно уменьшают прочность бумаги за счет снижения собственной прочности волокон. Кроме того, в условиях интенсивных нагрузок на волокно при размоле изломы способствуют укорочению волокна.

За результат принимается среднее по 3 параллельным измерениям. По завершении анализа пробы на экране формируется отчет в виде таблиц и графиков, а также выполняется экспорт результатов с возможностью представления в электронной таблице в формате .xls, что позволяет произвести сравнительную оценку различных образцов.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки способности целлюлозы из бамбука к размолу, а также для сравнения ее с хвойной (число каппа 25,9) и лиственной (число каппа 16,2) небеленой производственной целлюлозой были построены кривые размола. Все виды целлюлозы не подвергнуты сушке. Кривые размола, представленные на рис. 1, показывают, что разمول целлюлозы из бамбука идет быстрее, но на начальном этапе, до достижения 30 °ШР, скорость размола лиственной целлюлозы несколько выше: она характеризуется большим количеством высокогидрофильных гемицеллюлоз. На последующих этапах, когда начинает нарушаться клеточная стенка, наиболее быстро по сравнению с другими видами целлюлозы растет степень помола у целлюлозы из бамбука, так как поверхность его волокон менее прочная и процессы фибрилляции идут быстрее. Это подтверждается исследованиями [11].

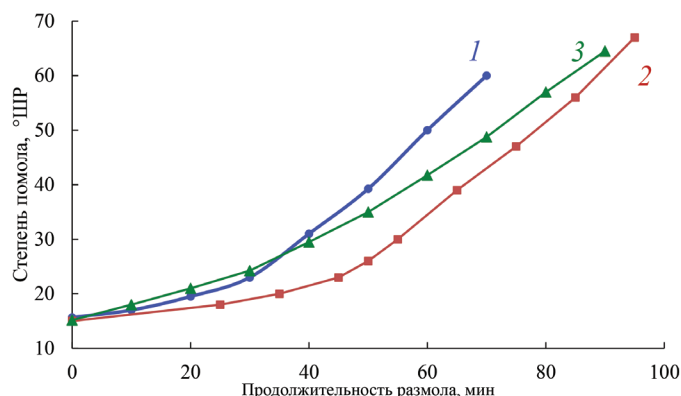


Рис. 1. Кривые размола небеленой целлюлозы: 1 – бамбуковой; 2 – хвойной; 3 – лиственной

Fig. 1. Refining curves of unbleached pulp: 1 – bamboo; 2 – softwood; 3 – hardwood

Проведенные микроскопические исследования образцов целлюлозы из бамбука позволяют оценить изменение состояния волокон при лабораторном размоле (рис. 2). Пробы для приготовления микропрепаратов были получены из суспензии, взятой из размольного стакана мельницы Йокро, т. е. без сушки волокон. В процессе размола, попадая между ножами размалывающего барабана и стенкой размольного стакана, волокна подвергаются воздействию механических и гидродинамических сил, обуславливающему протекание сложных механических, физико-химических и коллоидных процессов в структуре волокон.

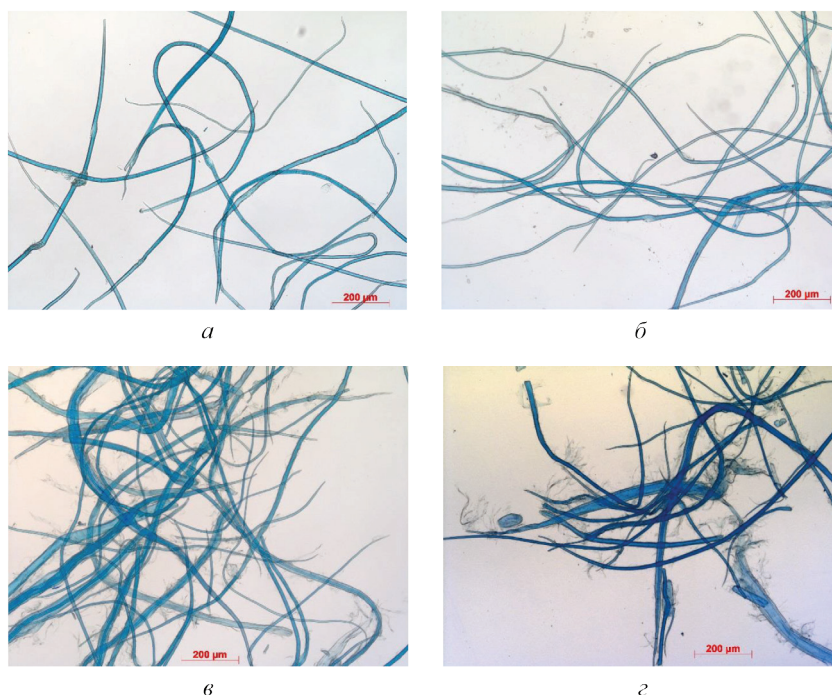


Рис. 2. Микрофотографии образцов бамбуковой целлюлозы при степени помола, °ШР: а – 16; б – 20; в – 40; з – 60

Fig. 2. Microphotographs of cellulose fibers at the degree of refining, °SR: а – 16; б – 20; в – 40; з – 60

На рис. 2 хорошо видны визуальные отличия в морфологии образцов целлюлозы из бамбука при увеличении степени помола. До размола образцы представляют собой длинные, тонкие и сильно изогнутые волокна с глад-

кой поверхностью (рис. 2, *a*). При размоле до 20 °ШР появляются пережимы на некоторых волокнах и образуется незначительный ворс на поверхности (рис. 2, *b*). При дальнейшем размоле наблюдаются существенное нарушение клеточной стенки и ее поверхностное расщепление в продольном направлении на фибриллы (поверхностное фибриллирование), набухание волокон. В результате происходит укорочение волокон (рубка), что выражается в наличии оборванных концов. Волокна становятся более мягкими, повышаются их эластичность и пластичность. На поверхности волокон образуется «начес» тонкого пухообразного материала (рис. 2, *в, г*).

На рис. 3 графически представлено изменение фракционного состава целлюлозы из бамбука по длине (размер класса – 0,1 мм) и ширине (размер класса – 2 мкм) волокна. Взвешивание выполнено по длине волокна. Силовое воздействие размалывающей гарнитуры на волокно приводит к направленным изменениям содержания фракций по длине волокна (рис. 3, *a*), происходят последовательное и достаточно резкое увеличение содержания коротковолокнистых фракций с длиной менее 1 мм и снижение содержания фракций с длиной более 1,5 мм. При этом самое резкое изменение наблюдается уже при размоле до 17 °ШР и, соответственно, сдвигается в коротковолокнистую область положение максимума на кривой распределения по длине волокна.

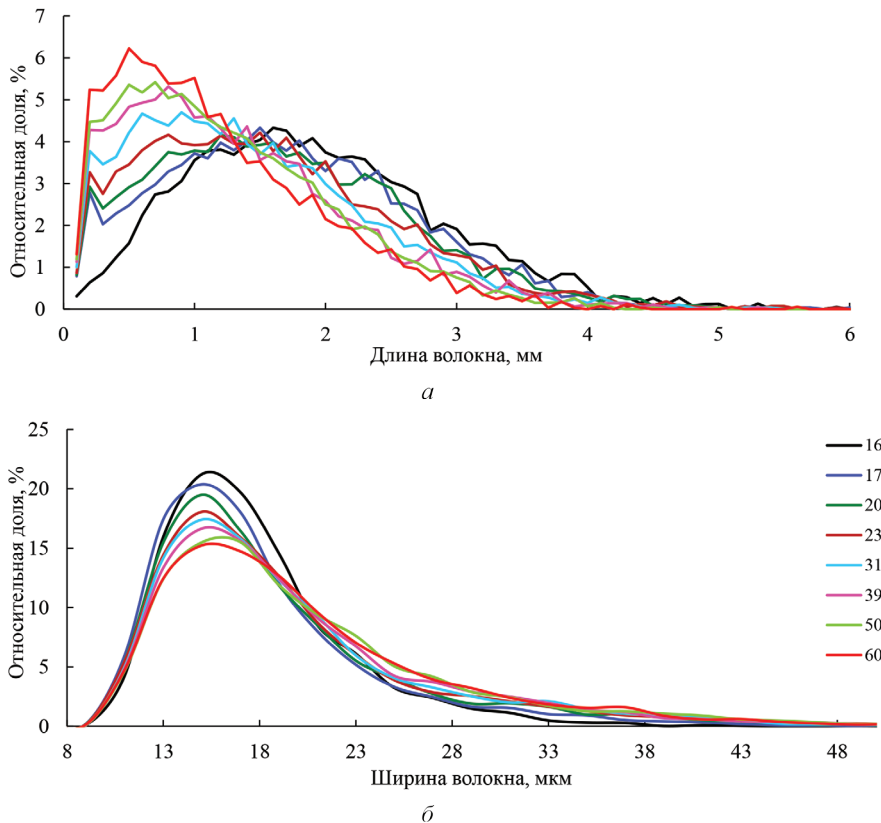


Рис. 3. Фракционный состав бамбуковой целлюлозы при степени помола 16, 17, 20, 23, 31, 39, 50 и 60 °ШР: *a* – по длине волокна; *b* – по ширине волокна

Fig. 3. Fractional composition of bamboo pulp with the degrees of refining 16, 17, 20, 23, 31, 39, 50 and 60 °SR: *a* – by fiber length; *b* – by fiber width

Диаграммы фракционного состава по ширине волокна (рис. 3, б) показывают увеличение полидисперсности волокон по ширине. Положение максимума незначительно перемещается в сторону большего значения, но его высота заметно снижается, т. е. происходит перераспределение фракций с шириной волокна близкой к средней в сторону увеличения. При этом содержание фракций с шириной менее 10 мкм изменяется незначительно. Таким образом, возрастание средней ширины волокна из бамбука при размоле связано в основном не с сдвигом положения максимума, а с ростом содержания фракций шириной более 20 мкм.

Данные о структурно-размерных свойствах волокон из бамбука, изменяющихся при размоле, представлены в табл. 1. Для характеристики длины волокна во всех случаях использована средняя, средневзвешенная по длине величина. Выявлено, что средняя длина волокна закономерно снижается с 1,90 до 1,21 мм за счет рубки, ширина увеличивается с 17,8 до 20,6 мкм за счет сплющивания и набухания волокон. Фактор формы растет с 81,7 до 85,6 % из-за обрыва изогнутых фрагментов волокон при размоле, накопление мелочи в массе изменяется от 1,8 до 7,0 %.

Таблица 1

**Изменение структурно-морфологических свойств волокон из бамбука
при размоле**

**Changes in the structural and morphological properties
of bamboo fibers after refining**

Характеристика	Продолжительность размола, мин							
	0	10	20	30	40	50	60	70
Степень помола, °ШР	16	17	20	23	31	39	50	60
Средняя длина волокна, мм	1,90	1,73	1,68	1,59	1,46	1,36	1,30	1,21
Средняя ширина волокна, мкм	17,8	18,1	19,1	19,6	19,8	20,1	20,5	20,6
Коэффициент вытянутости	106,6	95,5	87,8	81,1	73,6	67,6	63,2	58,8
Средний фактор формы, %	81,7	83,8	84,2	84,6	85,1	85,1	85,1	85,6
Содержание мелочи, % (<0,2 мм)	1,8	3,7	3,9	4,3	5,0	5,7	6,0	7,0
Грубость, дг	169	117	112	113	105	113	125	117
Средний угол излома, ...°	58,9	59,4	58,6	57,5	57,3	56,8	56,4	55,8
Число изломов на 1 мм	0,595	0,556	0,594	0,617	0,638	0,696	0,712	0,733
Число больших изломов на 1 мм	0,241	0,230	0,239	0,233	0,237	0,262	0,270	0,259
Число изломов на волокно	0,780	0,754	0,777	0,761	0,728	0,750	0,747	0,721
Число больших изломов на волокно	0,316	0,312	0,312	0,287	0,270	0,283	0,283	0,255
Средний индекс излома	1,635	1,538	1,627	1,674	1,722	1,864	1,913	1,945
Средняя длина сегмента, мм	1,168	1,213	1,167	1,118	1,032	0,949	0,917	0,862

Таким образом, наблюдается направленное изменение структурно-размерных свойств, которое не является уникальным и характерно для всех волокнистых полуфабрикатов. В табл. 2 представлены данные об изменении свойств хвойной и лиственной небеленой целлюлозы [4, 5].

Таблица 2

Изменение структурно-морфологических свойств волокон хвойной и лиственной небеленой целлюлозы при размоле

Changes in the structural and morphological properties of softwood and hardwood fibers after refining

Степень помола, °ШР	Средняя		Коэффициент вытянутости	Средний		Число изломов на волокно	Средняя длина сегмента, мм	Доля мелочи, %
	длина волокна, мм	ширина волокна, мкм		фактор формы, %	угол излома, ...°			
<i>Хвойная целлюлоза</i>								
17	2,34	28,8	81,3	85,0	58,1	0,72	1,68	4,5
20	2,23	29,7	75,1	85,4	56,8	0,75	1,66	4,9
25	2,21	30,4	71,4	85,6	55,9	0,69	1,68	4,8
30	2,09	30,8	68,5	86,0	55,4	0,67	1,59	5,2
40	2,07	31,1	66,6	86,6	55,3	0,59	1,56	5,2
60	1,91	31,5	60,6	87,4	54,5	0,48	1,49	6,2
<i>Лиственная целлюлоза</i>								
15	0,99	22,3	44,4	89,3	48,4	0,59	0,70	2,9
20	0,96	23,0	41,7	91,7	52,3	0,33	0,83	3,1
30	0,95	24,0	39,6	91,0	53,3	0,38	0,79	3,3
60	0,91	25,3	36,0	89,2	53,2	0,50	0,71	3,6

Волокно хвойной целлюлозы до размола имеет большую среднюю длину (2,34 мм) и большую среднюю ширину (28,8 мкм), чем у целлюлозы из бамбука. Волокно лиственной целлюлозы до размола характеризуется меньшей средней длиной (0,99 мм), но большей средней шириной (22,3 мкм) по сравнению с целлюлозой из бамбука. Особенно различия в размерных свойствах данных полуфабрикатов видны, если рассмотреть коэффициент вытянутости волокон (отношение длины волокон к ширине) [6, 10] – показатель, характеризующий потенциал структурообразования бумажного листа при отливе. У волокон бамбука показатель максимален – 106,6, и при размоле до 60 °ШР снижается до 58,8 (изменение составляет 47,8). У хвойной целлюлозы коэффициент вытянутости варьирует при размоле от 81,3 до 60,6 (изменение – 20,6), а у лиственной – от 44,4 до 36,0 (изменение – 8,4).

Таким образом, сравниваемые волокнистые полуфабрикаты различаются по длине, ширине и коэффициенту вытянутости. Поэтому особенности изменения структурно-размерных свойств целлюлозы из бамбука в процессе размола удобнее анализировать, если вычислить их относительное изменение, приняв за 100 % величины после роспуска. Графики, отражающие эти закономерности, представлены на рис. 4. При постепенном увеличении степени помола полуфабриката от исходной до 60 °ШР у всех образцов наблюдается снижение средней длины волокна: у бамбука – на 36 %, у хвойной целлюлозы – на 18,5 %, у лиственной – на 8 %. Основное укорочение волокон бамбука происходит уже

на начальных этапах размола – через 10 мин. При этом накапливается мелочь в массе: увеличение составляет 205 отн. % (с 1,8 до 3,7 %), а при размоле до 60 °ШР – 390 отн. % (от 1,8 до 7,0 %).

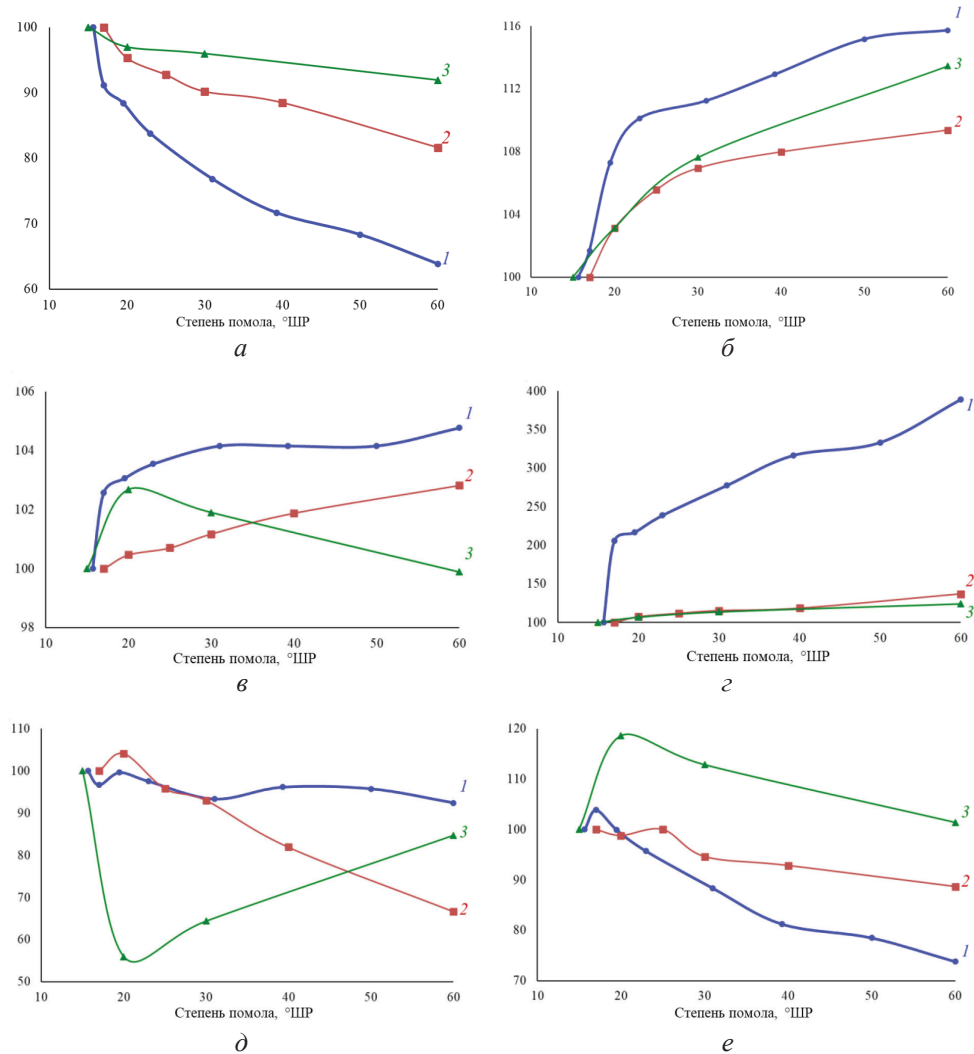


Рис. 4. Относительное изменение, %, структурно-размерных свойств целлюлозы (1 – бамбуковой; 2 – хвойной; 3 – лиственной) в процессе размола: а – средней длины волокна; б – средней ширины волокна; в – среднего фактора формы; г – содержания мелочи; д – среднего числа изломов на волокно; е – средней длины сегмента

Fig. 4. Relative change, %, in the structural and dimensional properties of pulp (1 – bamboo; 2 – softwood; 3 – hardwood) after the refining: а – the average fiber length; б – average fiber width; в – mean shape factor; г – fines content; д – average number of kinks per fiber; е – average segment length

Средний фактор формы у бамбука возрастает с 81,7 до 85,6 %. Наибольший рост наблюдается на начальной стадии размола. Аналогичное, но менее выраженное изменение фактора формы при размоле характерно для длиноволокнистой хвойной целлюлозы. У коротковолокнистой лиственной целлюлозы после первоначального увеличения фактор формы снижается.

Средний угол излома бамбуковой целлюлозы в результате размола после начального небольшого роста непрерывно уменьшается с 59,4 до 55,8°. Это соответствует изменению фактора формы. Количество изломов на волокно снижается при размоле на 7,5 %, и, как следствие, средняя длина сегментов (неповрежденных жестких участков клеточной стенки) существенно сокращается. У бамбуковой целлюлозы это проявляется сильнее, чем у хвойной и лиственной.

Заключение

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента установлены особенности изменения при размоле структурно-размерных свойств небеленой целлюлозы из бамбука *Vambusa blumeana*, местом произрастания которого является Республика Вьетнам. При общем, аналогичном лиственной и хвойной целлюлозе, характере изменения свойств при размоле: снижении средней длины волокна, числа изломов на волокно, средней длины сегмента, увеличении средней ширины, фактора формы, содержания мелочи – изменение структурно-размерных характеристик волокна у целлюлозы из бамбука происходит в наибольшей степени.

Пониженная ширина волокон при высокой длине волокна обеспечивает наиболее высокий коэффициент вытянутости волокон (106,6...58,8) бамбуковой целлюлозы по сравнению с хвойной (81,3...60,6) и особенно лиственной (44,4...36,0) целлюлозой, что приводит к понижению фактора формы и более легкому повреждению волокон в условиях гидромеханического воздействия при размоле.

Максимальные изменения в структуре, размерах, форме волокна и содержании мелочи происходят уже в первые 10 мин размола. Это свидетельствует о низкой прочности бамбуковых волокон и их легкой повреждаемости. Можно сделать предварительный вывод, что использование небеленой целлюлозы из бамбука в композиции бурых видов бумаги не приведет к повышению их прочности. Для подтверждения или опровержения данного предположения необходимы дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белоглазов В.И., Комаров В.И., Дьякова Е.В., Гурьев А.В. Структурно-размерные свойства волокон полуфабрикатов как фактор, определяющий качество тарного картона // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Архангельск, 13–17 сент. 2011 г. Архангельск: САФУ, 2011. С. 57–63.

Beloglazov V.I., Komarov V.I., Dyakova E.V., Guryev A.V. Structural and Dimensional Properties of Semi-Finished Pulp Fibers as a Factor Determining Quality of Container Board Product. *The Issues in Mechanics of Pulp and Paper Materials: Proceedings of the 1st International Scientific-Technical Conference. Arkhangelsk, September 13–17, 2011.* Arkhangelsk, NArFU Publ., 2011, pp. 57–63. (In Russ.).

2. Гурьев А.В., Дернов А.И., Дьякова Е.В. Оценка свойств волокон в структурированном и неструктурированном состояниях. Часть I. Полуфабрикаты для тарного картона // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. № 1. С. 67–70.

Guryev A.V., Dernov A.I., Dyakova E.V. Evaluation of Fiber's Properties in Structured and Unstructured States. Part I. Semi-Finished Products for Container Board. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton = Pulp. Paper. Board*, 2013, no. 1, pp. 67–70. (In Russ.).

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

Kazakov Ya.V. Characterization of Geometrical Parameters of Fibers of Cellulose Semi-Finished Products with the Use of Probabilistic Methods. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* = Chemistry of Plant Raw Material, 2014, no. 1, pp. 269–275. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401269>

4. 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.

Kazakov Ya.V., Manakhova T.N. Paper-Forming Potential of Softwood Unbleached Pulp: The Modern View Using the Automatic Fiber Analyzer. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* = Pulp. Paper. Board, 2013, no. 5, pp. 34–39. (In Russ.).

5. Лебедев И.В. Моделирование структуры и деформационных характеристик бумажного листа: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2017. 150 с.

Lebedev I.V. *Simulation of Structure and Deformation Properties of Paper Sheet*. Cand. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2017. 150 p. (In Russ.).

6. Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагонепроницаемого сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 157–172.

Penkin A.A., Kazakov Ya.V. Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of Recycled Pulp. Part 1. Fiber Characteristics. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 157–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-157-172>

7. Aprianis Y., Novriyanti E., Akbar O.T. The Characteristics of Thorny Bamboo (*Bambusa blumeana*) for Dissolving Pulp. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 415, no. 1, p. 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/415/1/012024>

8. Chen Z., Zhang H., He Z., Zhang L., Yue X. Bamboo as an Emerging Resource for Worldwide Pulp and Papermaking. *Bioresources*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 3–5. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.3-5>

9. Draft Strategy for the Development of Forestry in Vietnam for the Period 2006–2020. *Vietnam Administration of Forestry*. (In Vietnamese). Available at: <https://tongcuclamnghip.gov.vn/LamNghiep/Index/chien-luoc-phet-trien-lam-nghip-viet-nam-giai-doan-2006-2020-626> (accessed 25.03.23).

10. Ferdous T., Quaiyyum M.A., Bashar S., Jahan M.S. Anatomical, Morphological and Chemical Characteristics of Kaun Straw (*Seetaria-Ltalika*). *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, no. 2, pp. 288–298. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0057>

11. 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, vol. 115, pp. 785–803. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>

12. Hagaev O., Zou X. A New Concept to Characterize Fiber Development in Refining and Mechanical Pulp Quality for LWC and SC Grades. *Pulp and Paper*, Canada, Ontario, 2007, vol. 108, pp. 50–56.

13. Haiyan Ni, Yonggui Li, Shiwei Fu. Morphological Structure and Properties of Bamboo Shell Fiber. *Journal of Natural Fibers*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 586–595. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1349710>

14. Kamthai S., Puthson P. The Physical Properties, Fiber Morphology and Chemical Compositions of Sweet Bamboo (*Dendrocalamus asper* Backer). *Natural Science*, 2005, vol. 39, pp. 581–587.

15. Karlsson H., Rinneuo T. *Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry*. Sweden, Kista, AB Lorentzen and Wettre Publ., 2006. 120 p.

16. Lee K.-S., Song W.-Y., Shin S.-J. Elucidating Soda and Soda-Anthraquinone Pulp- ing Characteristics of Korean Bamboo Species. *Peolpeu Jong'i Gi'sul*, 2016, vol. 48, no. 3, p. 44. <https://doi.org/10.7584/ktappi.2016.48.3.044>
17. Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2011, vol. 50, no. 22, pp. 12572–12578. <http://dx.doi.org/10.1021/ie201631q>
18. Marja-Sisko, Ilvessalo-Pfäffli Leaf Fibers. *Fiber Atlas: Identification of Papermaking Fibers. Springer Series in Wood Science*. Ed. by T.E. Timell. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Publ., 1995. 400 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-07212-7>
19. Mera F.A.T., Xu C. Plantation Management and Bamboo Resource Economics in China. *Ciencia y Tecnología*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.18779/cyt.v7i1.93>
20. Monga S., Thapliyal B.P., Tyagi S., Naithani S. Relationship between Strength Properties and Fiber Morphological Characteristics of *S. Officinarum*. *International Journal of Science and Research*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 1549–1556. <https://doi.org/10.21275/ART20164484>
21. Sharma A.K., Dutt D., Upadhyaya J.S., Roy T.K. Anatomical, Morphological, and Chemical Characterization of *Bambusa tulda*, *Dendrocalamus hamiltonii*, *Bambusa balcooa*, *Malocana baccifera*, *Bambusa arundinacea*, and *Eucalyptus tereticornis*. *Bioresources*, vol. 6, no. 4, pp. 5062-5073. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.6.4.5062-5073>
22. Song B., Deng H., Tan L., Liu H. Fiber Structure and Basic Properties of Bamboo Pulp. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 332-334, pp. 874–877. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.332-334.874>
23. Tripathi S.K., Mishra O.P., Bhardwaj N.K., Varadhan R. Pulp and Papermaking Properties of Bamboo Species *Melocanna baccifera*. *Cellulose Chemical Technology*, 2018, no. 52, pp. 81–88. Available at: [https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT1-2\(2018\)/p.81-88.pdf](https://www.cellulosechemtechnol.ro/pdf/CCT1-2(2018)/p.81-88.pdf)
24. Wai N.N., Nanko H., Murakami K. A Morphological Study on the Behavior of Bamboo Pulp Fibers in the Beating Process. *Wood Science and Technology*, 1985, vol. 19, no. 3, pp. 211–222. <https://doi.org/10.1007/BF00392050>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest