

ISSN 0536 - 1036

DOI:10.17238/issn0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Основан в 1833 г.

2/362

2018



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- В.П. Макаров, Ю.В. Зима, О.Ф. Малых, Е.А. Баницкова.* Опыт, состояние и перспективы создания культур *Pinus sylvestris* L. в степных борах Восточного Забайкалья..... 9
- А.Ю. Карпечко.* Влияние несплошной рубки на тонкие корни и микоризные окончания ели обыкновенной..... 23
- А.Е. Осипенко, С.В. Залесов.* Производительность искусственных сосняков в ленточных борах Алтайского края..... 33
- Д.А. Данилов, Н.В. Беляева, А.В. Грязькин.* Особенности формирования запаса и товарной структуры модальных хвойных древостоев сосны и ели к возрасту спелого насаждения..... 40
- Н.О. Пастухова, А.И. Горкин, О.П. Лебедева.* Сравнительный анализ смолопродуктивности сосны в разных лесорастительных условиях..... 49

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- М.М. Умаров, А.В. Скрытников, Е.В. Чернышова, Е.Ю. Микова.* Применение цифровых моделей местности для трассирования лесных автомобильных дорог..... 58
- Ю.А. Макарова, А.Ю. Мануковский.* Исследование воздействия паводковых вод на разрушение откосов земляного полотна..... 70
- П.Н. Перфильев.* Исследование оптимальных методов сплотки круглых лесоматериалов..... 77

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Старова, А.А. Миков.* Анализ процессов сушки древесины существенно неизотермическими режимами..... 88
- В.В. Лозовецкий, А.А. Шадрин, С.А. Катков.* Моделирование движения древесностружечных материалов в цилиндрикоконических бункерах..... 97

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- В.В. Гораздова, Е.В. Дернова, Д.А. Дулькин, Е.О. Окулова.* Влияние фибриллирования и укорочения волокон при размоле на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости целлюлозных материалов..... 109
- А.Н. Иванкин, В.Г. Санаев, Г.А. Горбачева, А.К. Агеев, Д.П. Кирюхин, Г.А. Кичигина, П.П. Куц.* Модификация свойств природных целлюлозосодержащих композиционных материалов фторсополимерами и теломерами тетрафторэтилена..... 122

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- К.Л. Михайлов, Д.Х. Файзулин, Н.А. Демина.* Роль научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в лесном хозяйстве..... 133



УДК 676.054.6

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109

ВЛИЯНИЕ ФИБРИЛЛИРОВАНИЯ И УКОРОЧЕНИЯ ВОЛОКОН ПРИ РАЗМОЛЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, ДЕФОРМАТИВНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ**В.В. Гораздова¹, асп.**Е.В. Дернова¹, канд. техн. наук, доц.**Д.А. Дулькин², д-р. техн. наук, ген. директор**Е.О. Окулова¹, асп.*¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;

e-mail: v.gorazdova@narfu.ru, e.dernova@narfu.ru, e.okulova@narfu.ru

²Управляющая компания «Объединенные бумажные фабрики», ул. Трудовая, д. 2, пос. Полотняный Завод, Дзержинский р-н, Калужская обл., Россия, 249844;

e-mail: dmdulkin@yandex.ru

Размол волокнистых материалов является одним из ключевых процессов обработки растительных волокон в целях придания им бумагообразующих свойств. При размол растительных волокон в водной среде происходит как чисто механический (укорачивание и продольное расщепление волокон на фибриллы), так и коллоидно-химический (набухание и гидратация волокон) процессы. Цель работы – изучение влияния преимущественного укорачивающего или фибриллирующего размола, смоделированного в лабораторных условиях, на прочностные и деформационные характеристики волокнистых полуфабрикатов. Преимущественное укорочение волокон наблюдается при размол массы низкой концентрации, в ходе которого на каждое волокно, попадающее между ножами размалывающего аппарата, приходится большее удельное давление. Для получения сильно фибриллированных волокон, напротив, следует подвергать размолу массу высокой концентрации, в процессе которого каждому волокну будет соответствовать меньшее удельное давление и большее взаимное трение волокон, способствующее их расчесыванию и расщеплению. В связи с этим моделирование укорачивающего или фибриллирующего размола при разной концентрации массы проведено в лабораторных условиях с использованием трех видов размалывающего оборудования – лабораторного рошпа, мельниц Йокро и PFI. Объектами исследования служили образцы хвойной небеленой целлюлозы высокого и нормаль-

*При выполнении исследований использовалось оборудование Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера», Центра коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» и лаборатории нанотехнологии кафедры теоретической физики Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, созданных при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Для цитирования: Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А., Окулова Е.О. Влияние фибриллирования и укорочения волокон при размолу на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости целлюлозных материалов // Лесн. журн. 2018. № 2. С. 109–121. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109

ного выхода. Продемонстрирована возможность моделирования преимущественного укорачивания или фибриллирования волокон при лабораторном размоле, что позволяет целенаправленно изменять бумагообразующие свойства волокон и получать бумажный лист с заданными потребительскими свойствами.

Ключевые слова: размол, фибриллирование, укорачивание, целлюлоза высокого выхода, целлюлоза нормального выхода, прочность, деформативность, трещиностойкость.

Введение

Назначение размола – придание волокнам определенной структуры и размеров по длине и толщине, гибкости и пластичности, необходимой степени гидратации для обеспечения хорошего формования (просвета) и заданных свойств бумаги. При размоле полуфабрикатов механические процессы вызывают измельчение волокон и обуславливают структуру бумаги, а коллоидно-физические явления, происходящие в результате взаимодействия целлюлозы с водой, обеспечивают связь волокон в бумаге [7–9].

В процессе размола происходит разрушение межмолекулярных связей внутри клеточной стенки и образование зон смещения структурных элементов в волокнах, в результате чего возникают микротрещины, в которые проникает вода, в дальнейшем вступающая во взаимодействие со свободными гидроксильными группами целлюлозного комплекса. Расклинивающее действие воды приводит к более глубокому расщеплению волокон при размоле, увеличивая их гибкость и пластичность. Образование зон смещения в волокнах осуществляется вдоль клеточной стенки и может закончиться расщеплением ее на отдельные фрагменты.

Многими исследователями [11–17] показано, что в процессе размола происходит внешняя и внутренняя фибрилляция волокна. Внешняя фибрилляция заключается в полном или частичном отделении от волокна фибрилл, что способствует увеличению наружной поверхности волокон и числа свободных гидроксильных групп на их поверхности. Вместе с тем внешняя фибрилляция ослабляет прочность самого волокна. Внутренняя фибрилляция приводит к необратимым перегруппировкам структурных элементов внутри набухшей вторичной стенки волокна, не уменьшая его прочности. Процессы внешнего и внутреннего фибриллирования трудно разделить, так как они тесно взаимосвязаны. Косвенно степень внешней фибрилляции оценивают обычно по изменению наружной поверхности волокон, внутренней – по их гибкости.

В процессе размола волокно подвергается также укорачиванию. При размоле жесткие целлюлозные волокна преимущественно фибриллируются, а мягкие укорачиваются, хотя этот процесс в значительной степени определяется режимом (условиями) размола [19, 20, 24].

Цель данной работы – исследование влияния преимущественного укорачивающего или фибриллирующего размола, смоделированных в лабораторных условиях, на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости волокнистых полуфабрикатов.

Объекты и методы исследования

Моделирование различного характера разработки волокон при размоле (преимущественного укорачивания или фибриллирования) осуществляли при помощи следующего лабораторного оборудования:

ролл (концентрация массы 1,0 %) – для большей рубки волокон при двух значениях прижима по механическому воздействию (ролл_{гид} и ролл_{мак});

мельница Йокро (6,0 %) – для получения промежуточного характера помола волокон (укорочение и фибриллирование примерно в равной степени);

мельница PFI (10,0 %) для большего фибриллирующего воздействия на волокна в режиме присадки ($PFI_{\max} = 2,25$ мм) и отсадки ($PFI_{\min} = 7,00$ мм) барабана.

В качестве объектов исследования использовали хвойную целлюлозу нормального и высокого выхода (ЦВВ). Полуфабрикаты во всех размалывающих аппаратах размалывали до степени помола 25 °ШР. Для оценки прочностных и деформационных свойств исследуемых полуфабрикатов изготавливали лабораторные образцы массой 100 г/м^2 .

Для определения структурно-морфологических характеристик волокон использовали анализатор свойств волокна системы Fiber Tester, разработанный компанией «Lorentzen & Wettre». С помощью этого прибора оценивали следующие показатели: длина и ширина волокна (l , мм, и w , мкм); средний фактор формы (F , %); доля мелочи (M , %); грубость волокна (G , мкг/м); средний угол излома ($Y_{\text{изл}}$); количество изломов на волокно (N_b); средняя длина сегмента ($l_{\text{сегм}}$, мм).

Стандартные лабораторные образцы (отливки) из предварительно подготовленной волокнистой массы изготавливали в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 на листоотливном аппарате типа Rapid-Köthen BBS-2 Estanit [4].

Прочность волокон в структуре образцов (P_b , Н/см) определяли на приборе The Pulmac Zero-Span Tensile Tester согласно TAPPI T 231 sm-96 и TAPPI T 273 pm-95 [22, 23].

Величину межволоконных сил связи ($F_{\text{сб}}$, МПа) устанавливали по методу С.Н. Иванова путем измерения внешнего усилия, необходимого для сдвига в плоскости соприкосновения слоев двухслойных отливок массой 1 м^2 каждого слоя 100 г.

Показатели качества лабораторных образцов исследовали, используя стандартные методы:

толщину образцов – по ГОСТ 27015–86 [5];

прочность на разрыв и удлинение при растяжении – по ГОСТ 13525.1–79 [1] при помощи лабораторного испытательного комплекса, включающего разрывную машину ТС 101-0,5 (г. Иваново) и ПЭВМ. Программное обеспечение Комплекс для математической обработки индикаторной диаграммы «нагрузка-удлинение» позволяет рассчитывать такие характеристики, как плотность (ρ , г/см³); напряжение при разрушении (σ_p , МПа); деформация разрушения (ϵ_p , %); разрывная длина (L , м); работа разрушения (A_p , мДж) [10];

прочность на излом при многократных перегибах (N , ч.д.п.) – по ГОСТ 13525.2–80 на приборе марки FRANK-PTI [2];

сопротивление продавливанию (Π , кПа) – по ГОСТ 13525.8–80 на приборе марки Lorentzen & Wettre [3];

сопротивление сжатию на коротком расстоянии (SCT , кН/м) – по ГОСТ Р ИСО 9895–2013 на приборе марки FRANK-PTI [6];

трещиностойкость (FT , Дж/м) согласно ISO/TS 17958:2013 на приборе марки Lorentzen & Wettre [18, 21].

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительный микроскопический анализ образцов полуфабрикатов до и после лабораторного размола наглядно демонстрирует различный характер помола волокон в зависимости от вида размалывающего аппарата (рис. 1).

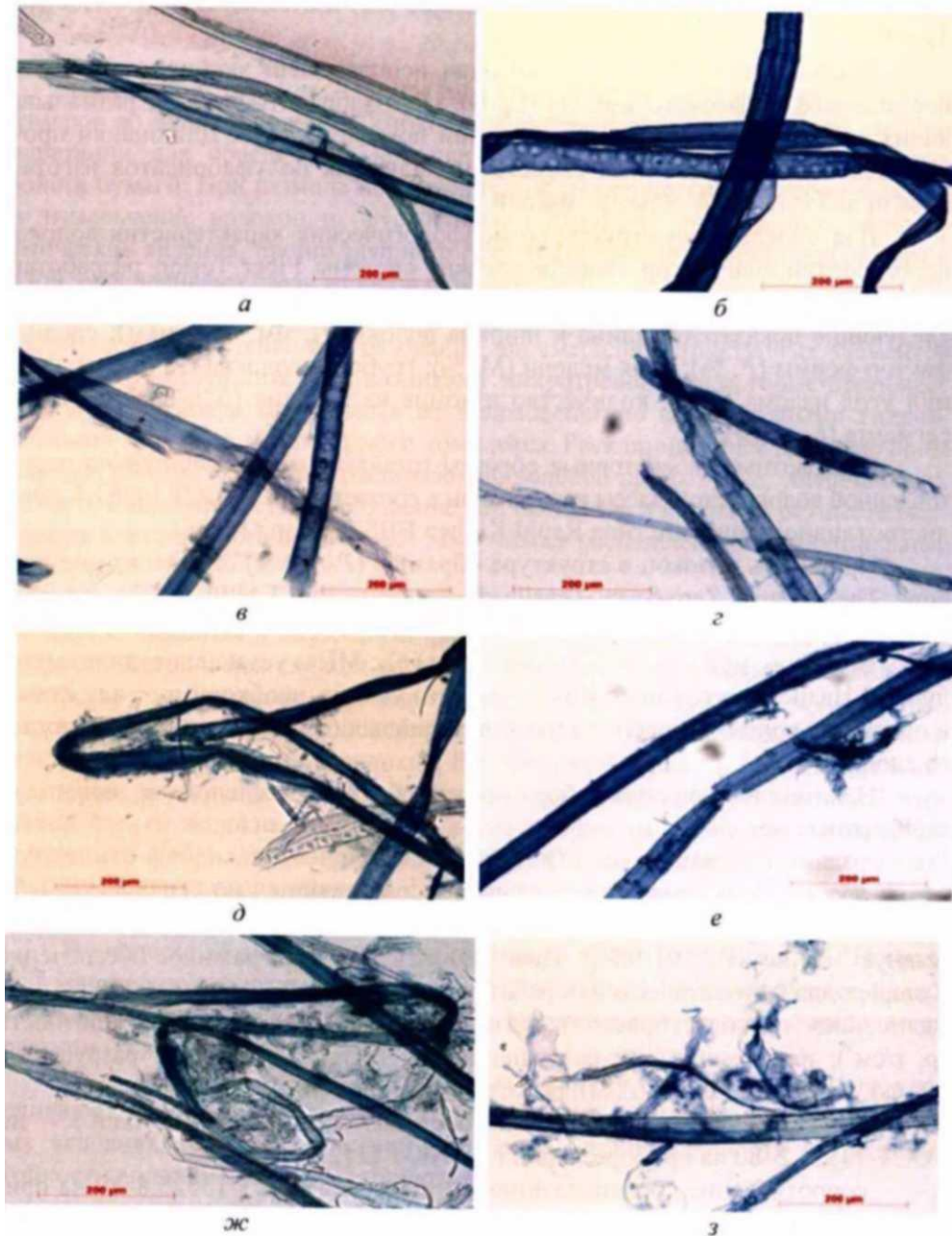


Рис. 1. Микрофотографии волокон полуфабрикатов до размола (а, б), после размола в ролле (в, г), мельницах Йокро (д, е) и PFI (ж, з): а, в, д, ж – ЦВВ; б, г, е, з – целлюлоза нормального выхода

Количественный анализ изменения структурно-морфологических свойств волокон в исследуемых условиях размола представлен в табл. 1.

Таблица 1
Результаты, полученные на анализаторе волокна Fiber Tester для ЦВВ и целлюлозы нормального выхода

| Образец | l , мм | w , мкм | F | M | Γ , мкг/м | $U_{изл}$ | N_b | $l_{сегм}$, мм |
|-------------------------------------|----------|-----------|-----|-----|------------------|-----------|-------|-----------------|
| | | | % | | | | | |
| <i>Целлюлоза высокого выхода</i> | | | | | | | | |
| Исходный | 2,41 | 32,7 | 89 | 2,4 | 192 | 52 | 0,444 | 1,99 |
| После размола: | | | | | | | | |
| ролл _{max} | 2,01 | 33,4 | 90 | 8,2 | 162 | 52 | 0,316 | 1,79 |
| ролл _{min} | 2,02 | 33,0 | 91 | 7,9 | 156 | 51 | 0,241 | 1,87 |
| ЦРА | 2,18 | 32,8 | 89 | 7,0 | 168 | 56 | 0,396 | 1,88 |
| PFI _{min} | 2,23 | 32,9 | 86 | 6,6 | 145 | 54 | 0,709 | 1,70 |
| PFI _{max} | 2,21 | 32,8 | 86 | 7,3 | 156 | 54 | 0,694 | 1,70 |
| <i>Целлюлоза нормального выхода</i> | | | | | | | | |
| Исходный | 2,26 | 30,0 | 82 | 4,9 | 199 | 56 | 1,239 | 1,25 |
| После размола: | | | | | | | | |
| ролл _{max} | 1,75 | 30,4 | 89 | 6,4 | 147 | 52 | 0,443 | 1,48 |
| ролл _{min} | 2,09 | 29,6 | 89 | 5,3 | 146 | 55 | 0,359 | 1,84 |
| ЦРА | 1,77 | 27,8 | 87 | 4,7 | 143 | 55 | 0,571 | 1,38 |
| PFI _{min} | 2,13 | 29,9 | 83 | 4,2 | 131 | 57 | 0,859 | 1,48 |
| PFI _{max} | 2,12 | 29,7 | 84 | 4,1 | 145 | 57 | 0,959 | 1,41 |

В целом исходные (неразмолотые) волокна хвойных полуфабрикатов отличаются лентообразной формой с тупыми или заостренными концами и узкими полостями, наличием окаймленных пор. Длина волокон в среднем составляет 2,2...2,4 мм, ширина – около 30 мкм.

Волокна ЦВВ в силу технологии производства характеризуются более высокими значениями длины, ширины и фактора формы и относительно низкими значениями доли мелочи и степени дефектности волокон по сравнению с волокнами целлюлозы нормального выхода.

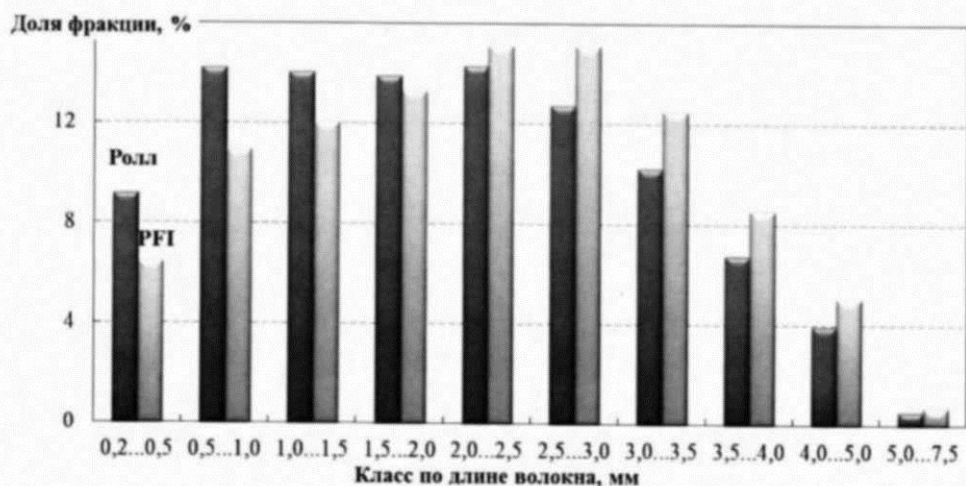
Проведение процесса размола в трех разных размалывающих аппаратах до одинаковой степени помола волокон позволило смоделировать характер их разработки. При размоле полуфабрикатов в ролле наблюдаются снижение их длины на 17 % для ЦВВ и 23 % для целлюлозы нормального выхода и закономерное существенное повышение доли мелкой фракции (в 3,5 и 1,3 раза соответственно). При этом отмечается «выпрямление» волокон (фактор формы для обоих видов полуфабрикатов составил 89...91 %) за счет обрывания крайних сегментов, о чем, в свою очередь, свидетельствует уменьшение числа изломов на волокне.

Противоположный характер разработки волокон получен при проведении процесса размола в мельнице PFI. Высокая концентрация массы при размоле обуславливает разработку поверхности волокон с сохранением их длины. Так, при размоле ЦВВ и целлюлозы нормального выхода до 25 °ШР отмечено снижение средней длины волокон лишь на 8 и 6 % соответственно. Преимущес-

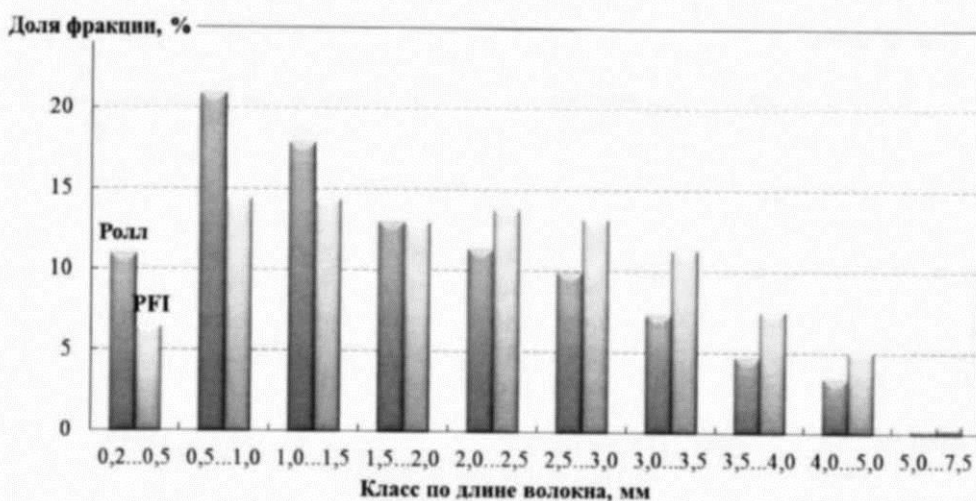
твенное фибриллирующее воздействие подтверждается изменением гибкости (фактор формы и число изломов на волокне) и грубости волокон, которая уменьшается от 192...199 до 131...145 мкг/м в данных условиях размола.

Данные об изменении свойств волокон в процессе размола в мельнице Йокро логично занимают промежуточное положение. Обработка волокон в этом аппарате в большей степени оказывает влияние на изменение свойств целлюлозы нормального выхода, что обусловлено более интенсивной степенью воздействия на клеточную стенку в процессе глубокой варки.

Дополнительным подтверждением преимущественного укорачивания или фибриллирования волокон при моделировании процесса размола полуфабрикатов в различных размалывающих аппаратах являются данные о распределении фракций волокон по длине в ролле и мельнице PFI (рис. 2).

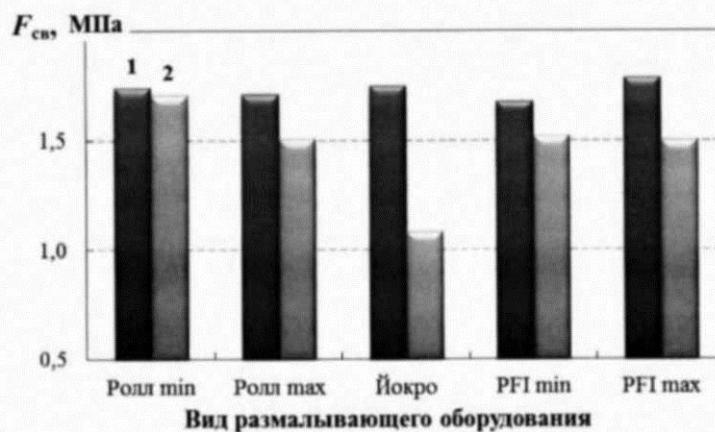


а

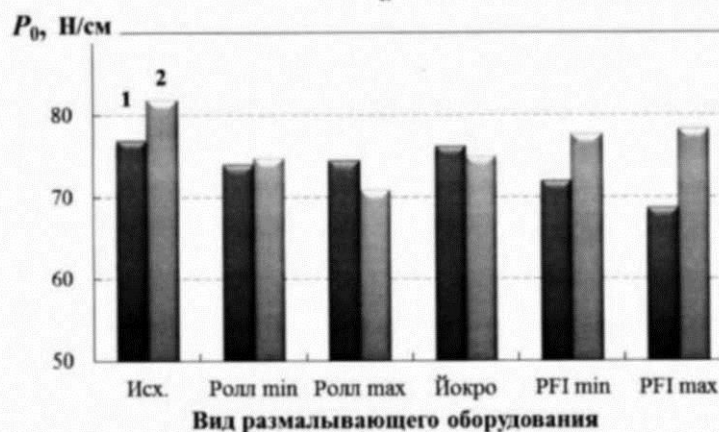


б

Рис. 2. Фракционный состав полуфабрикатов после размола: а – ЦВВ; б – целлюлоза нормального выхода



а



б

Рис. 3. Изменение интенсивности межволоконных взаимодействий (а) и собственной прочности волокон (б) полуфабрикатов после размола: 1 – ЦВВ; 2 – целлюлоза нормального выхода (исх. – исходный образец)

На рис. 3 представлено изменение фундаментальных свойств волокон (интенсивности межволоконных взаимодействий $F_{св}$ и собственной прочности P_0) в моделируемых процессах размола полуфабрикатов.

Отметим, что любой режим размола приводит к снижению прочности волокон в образцах ЦВВ. В большей степени отрицательный эффект размола для данного полуфабриката проявляется при проведении процесса, направленного на преимущественное фибриллирование волокон (P_0 снижается на 11 %). Это, очевидно, обусловлено наличием в технологии получения ЦВВ стадии горячего размола, которая приводит к росту дефектности волокон. Высокая концентрация массы при моделировании фибриллирующего размола, в свою очередь, провоцирует снижение прочности волокон и их разрушение по местам дефектов, о чем свидетельствует повышенная доля мелочи в полуфабрикате.

В случае целлюлозы нормального выхода фибриллирующий характер размола позволяет сохранить прочность волокон на достаточно высоком уровне, что обусловлено повышенной гибкостью длинных лентообразных волокон целлюлозы с низким остаточным содержанием лигнина. Такие волокна

в большей степени подвержены рубящему действию размалывающей гарнитуры, но легче поддаются внутреннему фибриллингованию без критичного нарушения целостности клеточной стенки.

Как укорачивающий, так и фибриллирующий характер размола волокон увеличивает уровень межволоконных сил связи в образцах. В большей степени данный эффект наблюдается у образцов целлюлозы нормального выхода, что является логичным следствием повышенной гибкости и существенного снижения грубости трахеид в условиях глубокой сульфатной варки. Наименьший уровень межволоконных сил связи отмечен у образцов, размолотых в мельнице Йокро, так как данный размалывающий аппарат обеспечивает «мягкое» воздействие на волокно с позиции не только его укорочения, но и фибриллингования и в меньшей степени интенсифицирует развитие межволоконных взаимодействий.

Уровень значений характеристик прочности, деформативности и трещиностойкости исследуемых полуфабрикатов в зависимости от характера помола волокна представлен в табл. 2.

Таблица 2

Показатели физико-механических свойств лабораторных образцов ЦВВ и целлюлозы нормального выхода

| Размалывающее оборудование | ρ , г/см ³ | σ_p , МПа | ϵ_p , % | L , м | FT , Дж/м | A_p , мДж | N , ч.д.п. | SCT , кН/м | P , кПа |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|-----------|
| <i>Целлюлоза высокого выхода</i> | | | | | | | | | |
| Ролл _{min} | 0,377 | 37,7 | 2,71 | 8 950 | 0,367 | 219 | 980 | 3,84 | 640 |
| ЦРА | 0,399 | 39,5 | 2,84 | 9 200 | 0,505 | 237 | 1 100 | 4,24 | 720 |
| PFI _{min} | 0,395 | 37,2 | 3,06 | 9 450 | 0,456 | 252 | 2 390 | 4,02 | 700 |
| <i>Целлюлоза нормального выхода</i> | | | | | | | | | |
| Ролл _{min} | 0,754 | 80,8 | 3,00 | 10 800 | 0,811 | 272 | 2 930 | 4,18 | 610 |
| ЦРА | 0,755 | 70,3 | 3,93 | 9 300 | 0,976 | 311 | 2 720 | 3,47 | 800 |
| PFI _{min} | 0,833 | 83,9 | 3,42 | 10 100 | 0,813 | 314 | 3 600 | 3,83 | 780 |

В целом для целлюлозы нормального выхода в моделируемых процессах размола оптимальный характер разработки волокон с позиций их средней длины и прочности наблюдается при преимущественном фибриллинговании волокон. Такие лабораторные образцы целлюлозы отличаются наивысшей прочностью (σ_p , A_p , N) и трещиностойкостью (FT), что связано с уплотнением структуры образцов (ρ), повышением их равномерности и сомкнутости за счет разработки волокон. Для целлюлозы нормального выхода максимальная деформационная способность (ϵ_p) отмечена в случае проведения процесса размола в мельнице Йокро, которая обеспечивает получение массы с оптимально укороченными и фибриллингованными волокнами одновременно.

Свойства ЦВВ изменяются незначительно из-за сохранности исходного лигноцеллюлозного комплекса клеток древесины в условиях короткой варки.

Для ЦВВ проведение размола в мельнице Йокро позволяет, с одной стороны, сохранить на достаточно высоком уровне среднюю длину и собственную прочность волокон, с другой - интенсифицировать развитие межволоконных взаимодействий. В совокупности данные факторы приводят к получению максимальных значений показателей качества ЦВВ (сопротивление

продавливанию, сопротивление сжатию по методу *SCT*, трещиностойкость). Максимальные значения разрывной длины, сопротивления излому, работы и деформации разрушения закономерно обнаруживаются в случае преимущественного фибриллирования волокон при размоле в мельнице PFI при сохранении их длины.

Проведение процесса размола ЦВВ в лабораторном роле, т. е. с выделением преимущественной рубки волокон, не позволяет получить высокий уровень значений ни по одному исследуемому показателю.

Заключение

Установлено, что размол волокнистых полуфабрикатов существенно влияет на равномерность макроструктуры бумаги, поскольку изменяет содержание мелкой фракции, среднюю длину волокон, их прочность, гибкость и способность к связеобразованию.

Показано, что при размоле волокнистых полуфабрикатов в лабораторном роле (при низкой концентрации массы) укорачивание волокон происходит в большей степени, в мельнице Йокро наравне с укорочением наблюдается фибриллирование кисточных стенок, в мельнице PFI (при высокой концентрации массы) в основном происходит фибриллирование волокон с образованием небольшого количества обрывков и мелких элементов.

Представлена возможность различных вариаций размола в целях придания готовой продукции требуемых физико-механических показателей полуфабрикатов для бумаги и картона.

Продемонстрирована простота и легкость моделирования размола в лабораторных условиях с преимущественным выделением определенного характера размола, что позволяет добиваться заданных бумагообразующих свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 13525.1–79. Полуфабрикаты волокнистые, бумага, картон. Метод определения прочности на разрыв и удлинение при растяжении. Взамен ГОСТ 13525.1–68; введ. 1980-07-01. М.: Стандартинформ, 2007. 5 с.
2. ГОСТ 13525.2–80. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения прочности на излом при многократных перегибах. Взамен ГОСТ 13525.2–68; введ. 1981-06-30. М.: Стандартинформ, 2007. 4 с.
3. ГОСТ 13525.8–86. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения сопротивления продавливанию. Взамен ГОСТ 13525.8–78, ГОСТ 13648.7–784; введ. 1988-01-01. М.: Стандартинформ, 2007. 6 с.
4. ГОСТ 14363.4–89. Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям. Взамен ГОСТ 14363.4–79; введ. 1993-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1993. 14 с.
5. ГОСТ 27015–86. Бумага и картон. Методы определения толщины, плотности и удельного объема. Взамен ГОСТ 13199–67, ГОСТ 12432–77; введ. 1988-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 4 с.
6. ГОСТ Р ИСО 9895–2013. Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
7. Дулькин, Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И., Блинова Л.А. Свойства целлюлозных волокон и их влияние на физико-механические характеристики бумаги и картона: моногр., под ред. В.И. Комарова. Архангельск: САФУ, 2011. 176 с.

8. Дьякова Е.В., Комаров В.И., Носкова Е.С. Устойчивость к инициированию и росту трещин в структуре целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн. 2007. № 1. С. 126–141. (Изв. высш. учеб. заведений)
9. Иванов С.Н. Технология бумаги. 3-е изд. М.: Школа бумаги, 2006. 696 с.
10. Казаков Я.В., Комаров В.И. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2001610526 от 10 мая 2001 г.
11. Карлссон Х. Гид по волокну. Анализ волокна и его применение в ЦБП: справочное руководство. Швеция: АВ Lorentzen & Werrte, 2006. 118 с.
12. Кларк Дж. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытаний). М.: Лесн. пром-сть, 1983. 456 с.
13. Комаров В.И., Казаков Я.В. Связь фундаментальных свойств (по Кларку) неразмолотой сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // Лесн. журн. 1993. № 2-3. С. 112–116. (Изв. высш. учеб. заведений).
14. Комаров В.И., Казаков Я.В. Влияние размола на корреляцию фундаментальных свойств (по Кларку) сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // Актуальные проблемы рационального использования природных и энергетических ресурсов Европейского Севера: сб. науч. тр. Архангельск: АЛТИ, 1994. С. 105–111.
15. Лумийнен Д., Пузырев С.С., Чижов Г.И. Размол при низкой концентрации М.: Изд-во ЦИНТИхимнефтемаш, 1992. 23 с. (Целл.-бум. машиностроение: обзор. информ.).
16. Материалы компании «Advanced Fiber Technology» (АФТ): информ. сообщение // 8-й Междунар. науч.-техн. конф. «Pар-For». СПб., 2004. 217 с.
17. Пузырев С.С., Коростелев С.А., Ковалева О.П. Размол при низкой концентрации // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 5. С. 54–58.
18. ISO/TS 17958:2013. Paper and Board. Determination of Fracture Toughness. Constant Rate of Elongation Method. Technical Committee, Subcommittee SC 2, 2013. 16 p.
19. Mäkelä P., Fellers C. An Analytic Expression for Determination of Fracture Toughness of Paper Materials // Innventia Report. 2010. No. 54.
20. Mäkelä P., Nordhagen H., Gregersen Ø.W. Validation of Isotropic Deformation Theory of Plasticity for Fracture Mechanics Analysis of Paper Materials // Nordic Pulp Paper Res. J. 2009. No. 24. Pp. 388–394.
21. SCAN-P77-95. Papers and Boards. Fracture Toughness. Scandinavian Pulp, Paper and Board. Testing Committee. 8 p.
22. TAPPI Standard T 231 pm-96. Zero-Span Breaking Strength of Pulp (Dry Zero-Span Tensile). Test Method T 231 cm-07. Atlanta, USA: TAPPI Press, 1996.
23. TAPPI T Standard 273 pm-95. Wet Zero-Span Tensile Strength of Pulp. Atlanta, USA: TAPPI Press, 1995.
24. Varanasi S., Batchelor W.J. Rapid Preparation of Cellulose Nanofibre Sheet // Cellulose. 2013. Vol. 20, no. 1. Pp. 211–215.

Поступила 24.10.17