



ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.017.272

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.160

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БУМАЖНОГО ЛИСТА*

И.В. Лебедев, асп.

Я.В. Казаков, д-р техн. наук, зав. каф.

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: mr.ivan.lebedev@mail.ru, j.kazakov@narfu.ru

Предложен алгоритм создания математической модели структуры бумажного листа, обладающего такими же свойствами, как и реальный бумажный материал, что позволяет анализировать и прогнозировать его свойства. Представлено три основных этапа создания этой модели. На первом этапе с использованием экспериментальных данных находят параметры распределения основных геометрических характеристик волокна (длины, ширины, кривизны). На основе этих параметров и выявленных зависимостей вычисляют геометрические характеристики каждого моделируемого волокна. На втором этапе осуществляют трехмерное моделирование отдельных волокон. Оно включает расчет траектории волокон, расчет поперечного сечения и трехмерное представление каждого волокна с учетом выявленных на предыдущем этапе зависимостей. На третьем этапе полученные модели отдельных целлюлозных волокон укладываются в единую волокнистую сетку заданной площади, образуется 3D-модель бумажного листа. При этом изгиб волокон в пространстве реализуется за счет операций математической морфологии с учетом параметров исходного сырья. Предлагаемый алгоритм создания трехмерной модели бумажного листа используется с применением прикладного программного обеспечения, позволяющего не только получать визуальную модель листа бумаги, но и проводить анализ и прогнозирование свойств целлюлозно-бумажных материалов без использования обширной инструментально-экспериментальной базы.

Ключевые слова: целлюлозное волокно, моделирование, структура бумажного листа.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» (САФУ) и в инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (САФУ) при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Для цитирования: Лебедев И.В., Казаков Я.В. Моделирование структуры бумажного листа // Лесн. журн. 2017. № 2. С.160–172. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.160

Целлюлозно-бумажный волокнистый материал обладает неоднородной структурой, которая состоит в основном из целлюлозных волокон растительного происхождения, распределенных в листе стохастическим образом, и которую в первом приближении можно представить в виде волокнистой сетки. От других волокнистых материалов бумагу отличает плоская форма волокон в структуре и наличие развитых межволоконных связей (рис. 1).

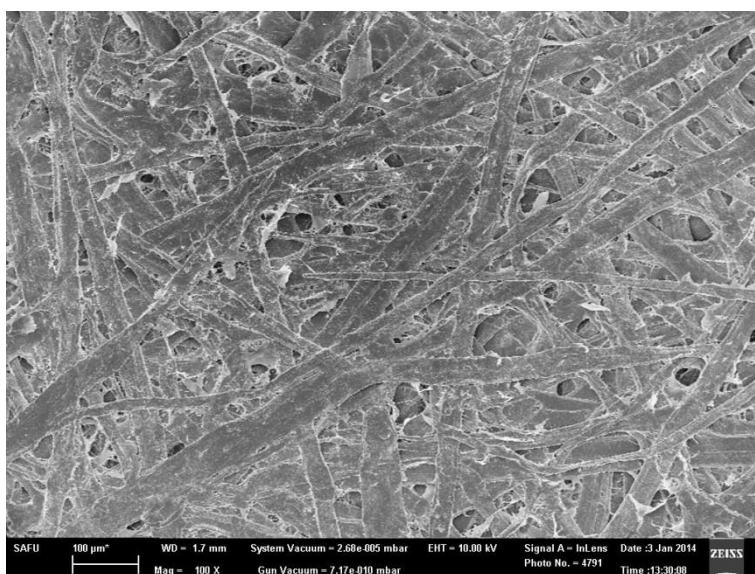


Рис. 1. Микрофотография лабораторного образца бумаги (получена на электронном микроскопе Zeiss SIGMA VP)

Исследование распределения волокон в структуре бумаги и их взаимодействия друг с другом позволяет понять, как компоненты композиции, особенно целлюлозные волокна, влияют на показатели физико-механических свойств бумаги, а также в дальнейшем прогнозировать значения прочностных и деформационных показателей и устанавливать оптимальные параметры композиции для получения бумаги с заданным комплексом свойств.

В исследовательской практике для количественной оценки неоднородности макроструктуры нашли применение оптические анализаторы, с помощью которых были установлены количественные закономерности, связывающие неоднородность макроструктуры с физико-механическими свойствами бумаги [5].

Для получения визуальной характеристики трехмерной структуры бумаги используют различные экспериментальные методы. Широко распространены сканирующая электронная микроскопия [15, 16] и рентгеновская томография, которая дает мощный инструмент для изучения различных свойств неоднородных материалов на основе спектра характеристик реальной макромасштабной структуры [11].

Другой широко распространенный метод анализа структуры волокнистых материалов – компьютерное моделирование. Создание 3D-модели бумажного полотна – перспективное направление для анализа и получения материала с заданными свойствами. При построении модели ей придается тот же набор свойств и параметров, что и у реального материала. Это позволяет получить наглядное представление о зависимости механических и капиллярных свойств моделируемых образцов от изменяемых факторов формирования волокнистой структуры. За счет аналитического варьирования композиции по волокну, способа и глубины обработки волокон (фибриллирование, или укорачивание), вида и технологии применения наполнителей и вспомогательных химических веществ становится возможным формирование трехмерной структуры бумаги с заданными физико-механическими характеристиками.

Принципы моделирования также применяют, например, для прогнозирования деформационного поведения целлюлозно-бумажного материала при растяжении с использованием феноменологического подхода на основании данных о структурно-морфологических характеристиках, полученных на автоматическом анализаторе волокна [4, 6, 9].

Исследователи разных стран применяли различные методы для моделирования стохастической структуры бумажного полотна (рис. 2). P.J. Pasi с коллегами [15] строили своеобразные волокнистые сети по следующему алгоритму: 1) размещение волокон в 3D-окне моделирования случайным образом; 2) сжатие структуры сетки до нужной толщины; 3) релаксация сетки до прекращения движения волокон. A. Dickson с соавторами [10] получали 3D-модель бумаги, укладывая в пространстве прямоугольные призмы, которые представляли собой модели целлюлозных волокон. Также были созданы модели, учитывающие композиционный состав бумаги и содержащие в себе волокна различных пород древесины, наполнители и мелочь [12, 16]. Одна из

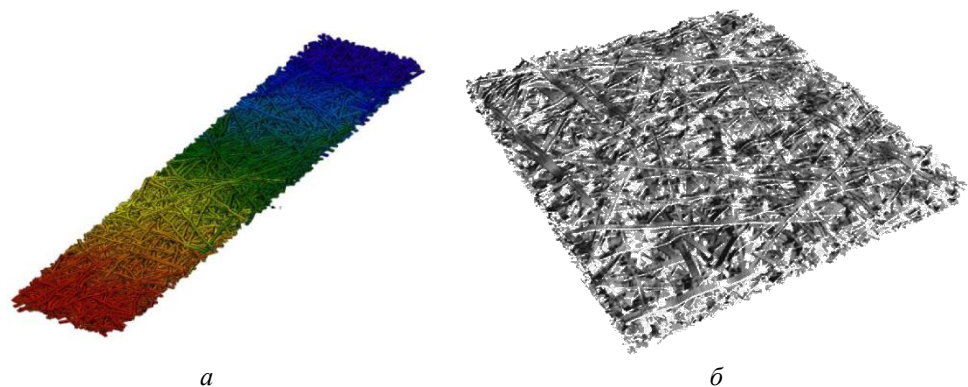


Рис. 2. 3D-модель бумажного полотна, учитывающая композиционный состав бумаги [12] (а) и распределение по длине волокна и жесткости волокон [16] (б)

основных особенностей построения модели бумаги – способ укладки волокон друг на друга в пространстве листа. Эту задачу авторы решали по-разному, но во всех случаях они использовали параметры, определяющие гибкость волокна [16]. Далее вводили коэффициенты, характеризующие взаимодействие волокон друг с другом. При этом ключевую роль приобретала RBA – относительная площадь связанной поверхности.

Все рассмотренные модели имеют отличия от реального бумажного полотна (см. рис. 1).

Недостатки моделей:

волокна имеют прямолинейную траекторию, что не учитывает их кривизну при расположении в пространстве;

волокна представляются в виде многогранных призм, что не учитывает структуру их поперечного сечения, имеющего различную степень сплюсненности, наличие люмена и толщину клеточной стенки;

длина всех волокон принимается одинаковой, что не учитывает наличие фракций волокон с различной длиной и шириной;

не учитывается мелочь, обязательно содержащаяся в реальной массе и во многом определяющая свойства бумаги;

отсутствует связь свойств модельных волокон с технологическими параметрами массоподготовки (например, степенью помола, или отлива, степенью анизотропии).

Для получения более точной компьютерной 3D-модели необходимо предварительно создать математическую модель полотна бумаги, которой после переноса в программную среду придается определенный набор свойств, более полно характеризующих структуру моделируемого листа. В предыдущих исследованиях был описан базовый алгоритм ее получения [8].

На первом этапе моделирования определяют геометрические характеристики отдельных волокон на основании анализа распределения их характеристик (длины, ширины и кривизны), на втором – создают 3D-модели отдельных волокон, массив характеристик которых подчиняется установленным распределениям, на третьем – укладывают полученные волокна в пространстве. В завершение определяют способ взаимодействия волокон между собой, т. е. физико-механические свойства структуры. Ниже рассмотрим каждый этап подробнее.

Для определения параметров распределения геометрических характеристик волокон целлюлозы на *первом этапе* были исследованы образцы беленой и небеленой сульфатной целлюлозы, размолотой до 20, 30 и 60°ШР. Результаты анализа волокна на автоматическом анализаторе L&W Fiber Tester [6, 14] с получением выборки примерно по 20 тыс. волокон были обработаны с помощью специального программного обеспечения [1]. Обширные массивы данных для хвойной и лиственной беленой и небеленой целлюлозы были обработаны с применением вероятностно-статических методов. В результате было установлено, что данные для ширины и длины волокна не противоречат

гипотезе о принадлежности выборки к логарифмическому нормальному распределению с параметрами μ и σ , данные для кривизны волокна – экспоненциальному распределению с параметром λ [3, 7].

Были выявлены зависимости ширины и кривизны волокон хвойной целлюлозы от длины и получены уравнения, отражающие зависимости между длиной l волокна в классе и степенью помола и параметрами распределения ширины (μ и σ , логарифмическое нормальное распределение) и кривизны (λ , экспоненциальное распределение) волокна (см. таблицу) и позволяющие получать выборки волокон с заданной длиной, а также рассчитывать ширину и кривизну каждого модельного волокна.

Уравнения регрессии для расчета параметров распределения ширины (μ , δ) и кривизны (λ) волокна хвойной целлюлозы в зависимости от длины волокна l и степени помола

Хвойная целлюлоза	Степень помола		
	20 °ШР	30 °ШР	60 °ШР
Беленая	$\mu = 3,17 l^{0,037}$	$\mu = 3,25 l^{0,031}$	$\mu = 3,24 l^{0,0349}$
	$\sigma = 0,30 l^{-0,343}$	$\sigma = 0,30 l^{-0,350}$	$\sigma = 0,31 l^{-0,371}$
	$\lambda = 11,87 l^{-0,358}$	$\lambda = 11,32 l^{-0,506}$	$\lambda = 10,25 l^{-0,347}$
Небеленая	$\mu = 3,11 l^{0,060}$	$\mu = 3,21 l^{0,0507}$	$\mu = 3,25 l^{0,0445}$
	$\sigma = 0,30 l^{-0,303}$	$\sigma = 0,30 l^{-0,299}$	$\sigma = 0,32 l^{-0,356}$
	$\lambda = 14,36 l^{-0,354}$	$\lambda = 10,95 l^{-0,355}$	$\lambda = 10,19 l^{-0,328}$

На основе этого исследования был выработан алгоритм получения адекватной по длине, ширине и кривизне выборки волокон для моделирования структуры бумажного листа с заданной композицией по волокну:

с использованием параметров распределения длины волокна формируется выборка из заданного числа волокон, подчиняющаяся логарифмически нормальному распределению, и определяется количество волокон в каждом классе длины;

с использованием параметров распределения ширины и кривизны волокна для каждого из волокон в классе длины, вычисленных по уравнениям из таблицы, рассчитываются ширина и кривизна каждого волокна в классе.

В результате каждое модельное волокно получает характеристики – длину, ширину и кривизну.

Таким образом, для описания геометрических характеристик целлюлозы производится переход от масштабных массивов данных к нескольким базовым параметрам для каждого образца и с использованием параметров распределения моделируется выборка волокон с адекватной вероятностно-статистической характеристикой.

Трехмерное моделирование волокон производится *на втором этапе* [2], алгоритм включает:

1. Расчет траектории волокна в плоскости с использованием параметрически задаваемых кривых Безье третьего порядка. Используются характери-

стики отдельных волокон: длина (l , мм); фактор формы f (кривизна); угол к определяющему направлению α (рис. 3, $a - e$).

2. Расчет поперечного сечения волокна в виде многоугольника (в форме эллипса) с числом ребер n от 4 до 36, шириной (b , мкм), толщиной стенки волокна (δ , мкм) и степенью сплюснутости (t , %) (рис. 3, $z - e$).

3. Трехмерное представление образа волокна в виде многогранника (рис. 4).

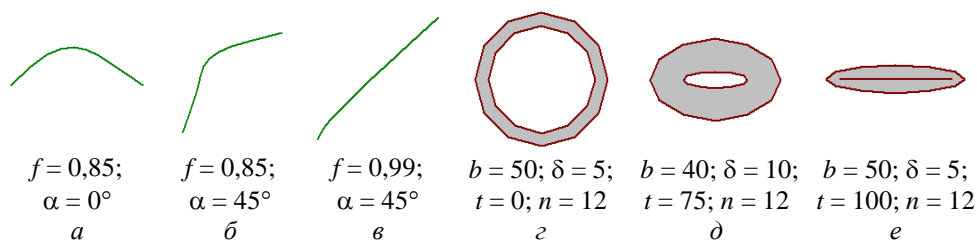


Рис. 3. Результаты моделирования траектории ($a - e$) и профиля волокон ($z - e$) по программе [1]

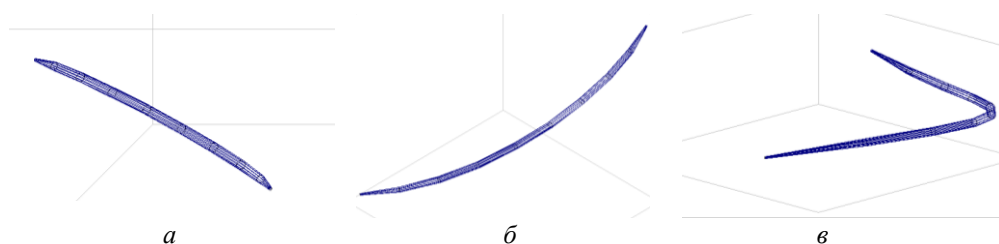


Рис. 4. Результаты трехмерного моделирования целлюлозных волокон длиной $l = 2,9$ мм, шириной $b = 50$ мкм с различными факторами формы f и углом ориентации α к горизонтальной оси при использовании проекций различного типа [2]: a – косоугольная ($f = 0,99; \alpha = 45^\circ$); $б$ – изометрическая ($f = 0,95; \alpha = 0^\circ$); $в$ – диметрическая ($f = 0,50; \alpha = 45^\circ$)

Форма моделей соответствует изображениям, получаемым при визуальном анализе формы окрашенных волокон в листе [3], и данным электронной микроскопии (см. рис. 1). Это подтверждает корректность подхода при применении кривых Безье, а установленные ранее параметры стохастической структуры с использованием законов распределения открывают путь к моделированию трехмерной структуры бумаги [7].

Задачей на *третьем этапе* является размещение волокон в пространстве, т. е. создание модели бумажного полотна. Моделирование выполняется на плоской поверхности, на которой последовательно располагаются волокна. Поверхность представляет собой участок квадратной формы с задаваемыми пользователем размерами, не превышающими 10 мм из-за ограничений по использованию памяти при выполнении моделирования. Волокна разбрасы-

ваются случайным образом по всей площади поверхности, при этом координаты их центров поддаются равномерному распределению, поскольку эффект флокуляции на образцах малых размеров не имеет существенного значения.

В качестве основы для построения модели волокна используется подход [16], в котором каждый слой моделируется из полученных волокон длиной l , шириной b и толщиной стенки δ . Характеристики волокон рассчитываются на основании полученных вероятностно-статистических зависимостей для волокон полуфабрикатов, используемых в композиции бумаги. При этом создается массив данных S_1 , который включает в себя точки замкнутого пространства, образованного линиями i -го сегмента волокна, и представляющего единичный сегмент волокна. Далее с помощью аффинных преобразований сдвига и поворота создается каждый следующий сегмент волокна (S_2, S_3, \dots, S_n), причем между смежными сегментами рассчитывается угол изгиба α_i по характеристическим точкам и узлам кривой Безье, моделирующей траекторию волокна. Количество сегментов задается количеством звеньев волокна n , определяемым пользователем и соответствующим степени разработки волокна. После построения всех сегментов волокна производится накопление всех точек из их массивов:

$$F_j = \sum_{i=1}^n S_i,$$

где j – номер моделируемого волокна из заданной выборки.

Далее программа по этому алгоритму от 1 до j создает все волокна и начинает укладывать их на ровную поверхность. Первые непересекающиеся с другими волокна укладываются на плоскую поверхность по траектории, соответствующей рассчитанной кривой Безье.

В процессе моделирования волокна начинают формировать шероховатую поверхность, образующую развивающуюся сетку. Степень, с которой волокна изгибаются в z -направлении по этой поверхности, определяется применением алгоритма «катящегося шара» [10]. Изгиб волокна при его укладке на уже сформированную поверхность напрямую зависит от радиуса шара r (рис. 5), изменяя который, можно менять траекторию волокна в z -направлении (рис. 6).

Для определения радиуса шара применяется относительная величина – плотность структуры листа ρ , зависящая от степени помола и выражаемая в процентах. Угол β_i между сегментами при укладывании одного волокна на другое определяется по следующей формуле:

$$\beta_i = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\rho}{100}.$$

Если $\rho = 100\%$, то волокна ложатся поверх друг друга с максимально плавным углом (радиусом шара), если $\rho = 0\%$, то шар не катится.

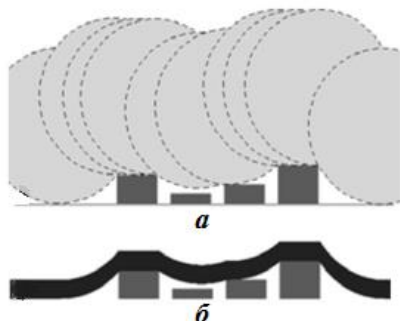


Рис. 5. Принцип моделирования: *a* – применение алгоритма катящегося шара по поверхности; *б* – результирующая конформация волокна [10]

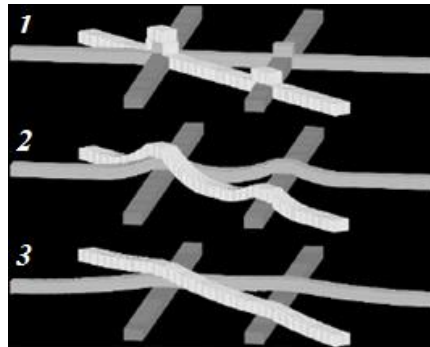


Рис. 6. Различные конформации волокна: 1 – $r = 0$ (шар не катится); 2 – r_1 ; 3 – r_2 ($r_2 > r_1$) [10]

Таким образом, каждый сегмент волокна подвергается операции изгиба согласно задаваемой жесткости волокон (исходя из плотности листа), и эта операция прекращается при выполнении одного из двух условий:

- 1) сегмент $i + 1$ изогнулся на максимально допустимый угол относительно сегмента i ;
- 2) массив данных, содержащий точки сегмента i , обладает общими элементами с массивом данных, определяющим элементы уже сформированной поверхности волокон.

Для реализации второго условия в программу необходимо ввести динамический трехмерный массив данных, который постоянно будет пополняться с помощью операций математической морфологии, которая позволяет обрабатывать множество точек в пространстве. Входными данными для аппарата математической морфологии являются два изображения: обрабатываемое и специальное, зависящее от вида операции и решаемой задачи. В нашем случае обрабатываемым изображением является поверхность со слоем волокон, специальным – сегмент с уже рассчитанным углом изгиба. Основной операцией при этом будет операция наращивания изображения A структурным элементом B , которая обозначается $A \oplus B$ и задается следующим выражением:

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b.$$

При осуществлении данной операции необходимо учитывать координаты центра каждого сегмента волокна, которые будут определять степень изогнутости волокна, размещаемого на матрице других волокон [14]. Если центр сегмента волокна i приходится на пик топографии, т. е. расположен непосредственно над верхним волокном, то расположение сегментов $i - 1$ и $i + 1$ и их центров определяется заданным радиусом катящегося шара, но при этом анализируется их пересечение (касание) с поверхностью уже наложенных воло-

кон. Если произошло касание волокна с поверхностью, то оно наращивается над этой поверхностью вне зависимости от того, изогнулось ли оно на необходимый радиус, заданный алгоритмом обработки. Некоторые возможные примеры пересечений в поперечном разрезе показаны на рис. 7.

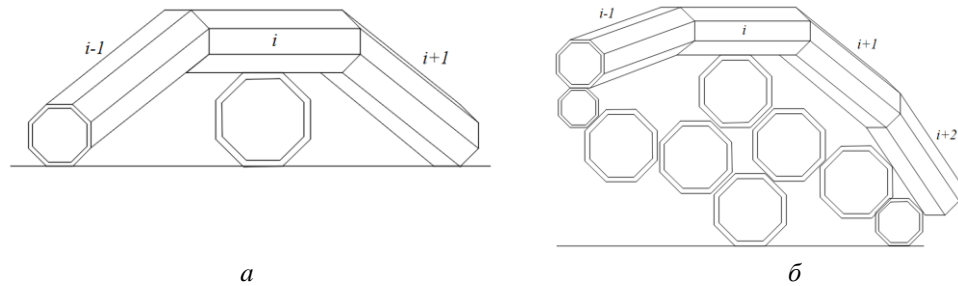


Рис. 7. Укладка волокон в пространстве: *а* – сегменты $i - 1$ и $i + 1$ легли на поверхность согласно заданному радиусу; *б* – сегмент $i - 1$ пересекся с уже уложенным волокном, сегмент $i + 1$ уложен согласно заданному радиусу и без пересечений

Таким образом, при укладке волокон друг на друга, получен трехмерный массив данных, который позволяет однозначно судить о количестве как целлюлозных волокон в рассматриваемой области пространства, так и пустот между ними. При задании постоянного числа сегментов в каждом волокне появляется возможность просчитать количество точек пересечения сегментов волокон и вычислить свойства моделируемого бумажного полотна.

Моделирующая программа для заданной массы 1 м^2 модельного листа вычисляет число волокон в образце и основные физические свойства: толщину, кажущуюся плотность, пористость и гладкость, а также относительную связанную поверхность, которая определяет механические или капиллярные свойства бумаги.

Заключение

На основании статистической обработки экспериментальных значений характеристик отдельных волокон беленых и небеленых волокнистых полуфабрикатов с различной степенью помола и анализа расположения волокон в трехмерной структуре реального листа бумаги разработан следующий алгоритм для построения 3D-модели листа бумаги с заданной композицией по волокну:

1) формирование выборки из заданного числа волокон на основании параметров распределения длины, ширины и кривизны волокна, а также установленных взаимосвязей между длиной волокна в классе и его шириной и кривизной; при этом каждое из модельных волокон получает характеристики – длину, ширину и кривизну;

2) построение 3D-моделей отдельных целлюлозных волокон, массив характеристик которых подчиняется установленным распределениям, при этом задается траектория расположения каждого волокна в плоскости;

3) построение 3D-модели листа бумаги путем укладки модельных волокон в волокнистую сетку на участке бумаги с заданным размером; придание волокнам трехмерной конформации реализуется за счет применения различных операций математической морфологии и с учетом изменения траектории волокна.

В дальнейшем для данной модели волокна с помощью программного обеспечения будет задан набор механических свойств, который позволит наблюдать за изменением 3D-модели бумажного полотна при деформационных нагрузках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 2012612982 РФ. Программа для анализа и моделирования распределения по длине и ширине целлюлозных волокон в бумажной массе (Моделирование фракционного состава) / Я.В. Казаков; заявитель и правообладатель САФУ (RU). № 2012610536; заявл. 30.01.2012; опубл. 26.03.2012, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

2. Казаков Я.В. Трехмерное моделирование целлюлозных волокон // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы IV Всероссий. конф. Барнаул: Алтайский ун-т, 2009. Кн. I. С. 57–59.

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

4. Казаков Я.В. Характеристики деформативности как основополагающий критерий в оценке качества целлюлозно-бумажных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2015. 534 с.

5. Казаков Я.В., Зеленова С.В., Комаров В.И. Влияние неоднородности структуры на характеристики жесткости картонов-лайнеров // Лесн. журн. 2007. № 3. С. 110–121 (Изв. высш. учеб. заведений).

6. 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.

7. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Математическая модель геометрических характеристик волокон в бумажной массе // Работа целлюлозно-бумажных предприятий в современных условиях: материалы и докл. 16-й Междунар. науч.-техн. конф. (Караваево, 28–29 мая 2015 г.). М.: МГУЛ, 2015. С. 80–88.

8. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Математическая модель структуры бумажного листа // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. (Архангельск, 9–11 сент. 2015 г.). Архангельск: САФУ, 2015. С. 288–293.

9. Манахова Т.Н., Казаков Я.В. Расчет параметров феноменологической модели деформирования целлюлозного материала по результатам измерений на автоматическом анализаторе волокна // Лесн. журн. 2014. № 1. С. 140–147. (Изв. высш. учеб. заведений).

10. Dickson A., Doole N., Sampson W. Simulation of Thickness Distribution in Random Fiber Networks // Proc. Seminar “Progress in Paper Physics”. Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008. Helsinki. 2008. Pp. 291–294.
11. Karlsson H. Fiber Guide. Fiber Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry. Sweden, 2006. 120 p.
12. Koivu V., Turpeinen T., Kataja M. X-Ray Micro-Tomographic Study of Paper-Making Fabrics // Proc. Seminar “Progress in Paper Physics”. Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008. Helsinki, 2008. Pp. 25–28.
13. Lavrykov S., Lindstrom S.B., Singh K.M., Ramarao B.V. 3-D Network Simulations of Paper Structure // Nordic Pulp and Paper Research J. 2012. No. 27(2). Pp. 256–263.
14. Lindstrom S.B. Modeling and Simulation of Paper Structure Development: Dr. Tech. Diss. Sundsvall, 2008. 184 p.
15. Pasi P.J., Miettinen, Jukka A., Ketoja, Tuomo Hje. Simulation of Structure and Deformation of Wet Fiber Networks // Proc. Seminar “Progress in Paper Physics”. Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008. Helsinki. 2008. Pp. 143–145.
16. Vincent R., Rueff M., Voillot C. 3-D Computational Simulation of Paper Hand-sheet Structure and Prediction of Apparent Density // Tappi J. 2009. No. 9(1). Pp. 15–19.

Поступила 21.12.16

UDC 676.017.272

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.160

Paper Sheet Texture Simulation

I.V. Lebedev, Postgraduate Student

Ya.V. Kazakov, Doctor of Engineering Sciences, Head of Department

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: mr.ivan.lebedev@mail.ru, j.kazakov@narfu.ru

This paper describes an algorithm for creating a mathematical model of the paper sheet texture having the same properties as the real paper material. This allows us to analyze and predict its properties. Three main stages of creating of this model are presented. The distribution parameters of basic fiber geometric characteristics (length, width, curvature) are determined with the use of the experimental data in the first stage. Based on these identified parameters and dependencies for each simulated fiber its geometric characteristics are calculated. The next step is the modeling of individual fibers. It includes the calculation of a trajectory of fibers, the cross-section calculation and three-dimensional representation of each fiber based on the identified dependencies in the previous step. In the third stage the obtained models of the individual cellulose fibers are stacked into a single fibrous mesh of a given area to form a paper sheet 3D-model. The fiber bending in space is realized by the mathematical morphology operations and the parameters of the starting crude. The proposed

For citation: Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. Paper Sheet Texture Simulation. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp.160–172. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.160

algorithm of creating the three-dimensional model of a paper sheet is implemented using the application software, that allows obtaining a visual model of a paper sheet and analyzing and predicting of the pulp and paper properties without the use of the extensive instrumental and experimental base.

Keywords: cellulose fiber, simulation paper sheet texture.

REFERENCES

1. Kazakov Ya.V. *Programma dlya analiza i modelirovaniya raspredeleniya po dline i shirine tsellyuloznykh volokon v bumazhnoy masse (Modelirovanie fraktsionnogo sostava)* [The Program for Analysis and Modeling of the Length and Width Distribution of the Cellulose Fibers in the Paper Pulp (Fractional Composition Simulation)]. Certificate of Authorship RF, no. 2012612982, 2012.
2. Kazakov Ya.V. Trekhmernoe modelirovanie tsellyuloznykh volokon [Three-Dimensional Modeling of Cellulose Fibers]. *Novye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy IV Vseros. konf.* [Proc. 4th All-Russ. Conf. "New Achievements in Chemistry and Chemical Technology of Vegetable Raw Materials"]. Barnaul, 2009, book I, pp. 57–59.
3. Kazakov Ya.V. Kharakteristika geometricheskikh parametrov volokon tsellyuloznykh polufabrikatov s ispol'zovaniem veroyatnostnykh metodov [Characterization of Geometrical Parameters of Fibers of Cellulose Semi-Finished Products with the Use of Probabilistic Methods]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ia* [Chemistry of Plant Raw Material], 2014, no. 1, pp. 269–275.
4. Kazakov Ya.V. *Kharakteristiki deformativnosti kak osnovopolagayushchiy kriteriy v otsenke kachestva tsellyulozno-bumazhnykh materialov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Characteristics of Deformability as a Fundamental Criterion in the Quality Assessing of the Pulp and Paper Products: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Arkhangelsk, 2015. 534 p.
5. Kazakov Ya.V., Zelenova S.V., Komarov V.I. Vliyaniye neodnorodnosti struktury na kharakteristiki zhestkosti kartonov-laynerov [Influence of Structural Nonuniformity on Stiffness Characteristics of Linerboard]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2007, no. 3, pp. 110–121.
6. Kazakov Ya.V., Manakhova T.N. Bumagoobrazuyushchiy potentsial khvoynoy nebelenoy tsellyulozy: sovremennyy vzglyad cherez avtomaticheskiiy analizator volokna [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.
7. Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. Matematicheskaya model' geometricheskikh kharakteristik volokon v bumazhnoy masse [A Mathematical Model of the Geometric Characteristics of Fibers in the Paper Pulp]. *Rabota tsellyulozno-bumazhnykh predpriyatiy v sovremennykh usloviyakh: materialy i dokl. 16-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Karavaevo, 28–29 maya 2015 g.)*. [Proc. 16th Intern. Sci. Eng. Conf. "Operation of the Pulp and Paper Enterprises Under Current Conditions"]. Moscow, 2015, pp. 80–88.
8. Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. Matematicheskaya model' struktury bumazhnogo lista [A Mathematical Model of the Paper Sheet Texture]. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Arkhangel'sk, 9–11 sent. 2015 g.)* [Proc. 3d Intern. Sci. Eng. Conf. "The Issues of Mechanics of Pulp-and-Paper Materials"]. Arkhangelsk, 2015, pp. 288–293.

9. Manakhova T.N., Kazakov Ya.V. Raschet parametrov fenomenologicheskoy modeli deformirovaniya tsellyuloznogo materiala po rezul'tatam izmereniy na avtomaticheskoy analizatore volokna [Calculation of Phenomenological Model Parameters of Cellulose Material Deformation Based on the Data from Automated Analyzer]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2014, no. 1, pp. 140–147.

10. Dickson A., Doole N., Sampson W. Simulation of Thickness Distribution in Random Fiber Networks. *Proc. Seminar "Progress in Paper Physics". Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008*. Helsinki, 2008, pp. 291–294.

11. Karlsson H. *Fiber Guide. Fiber Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry*. Sweden, 2006. 120 p.

12. Koivu V., Turpeinen T., Kataja M. X-Ray Micro-Tomographic Study of Paper-Making Fabrics. *Proc. Seminar "Progress in Paper Physics". Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008*. Helsinki, 2008, pp. 25–28.

13. Lavrykov S., Lindstrom S.B., Singh K.M., Ramarao B.V. 3-D Network Simulations of Paper Structure. *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 2012, no. 27(2), pp. 256–263.

14. Lindstrom S.B. *Modeling and Simulation of Paper Structure Development*: Dr. Tech. Diss. Sundsvall, 2008. 184 p.

15. Pasi P.J. Miettinen, Jukka A. Ketoja, Tuomo Hje. Simulation of Structure and Deformation of Wet Fiber Networks. *Proc. Seminar "Progress in Paper Physics". Helsinki University of Technology, TKK, Dipoli, Otaniemi, Espoo, Finland, 2–5 June 2008*. Helsinki, 2008, pp. 143–145.

16. Vincent R., Rueff M., Voillot C. 3-D Computational Simulation of Paper Hand-sheet Structure and Prediction of Apparent Density. *Tappi J.*, 2009, no. 9(1), pp. 15–19.

Received on December 21, 2016