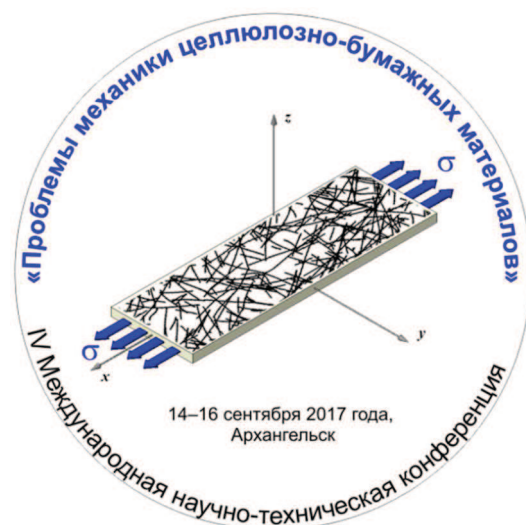




Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ



МАТЕРИАЛЫ IV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПОСВЯЩЕННОЙ ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА В.И. КОМАРОВА

14–16 сентября 2017 г.

Архангельск
2017



Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

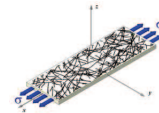
THE ISSUES IN MECHANICS OF PULP-AND-PAPER MATERIALS



PROCEEDINGS 4th INTERNATIONAL CONFERENCE IN MEMORY OF PROFESSOR VALERY KOMAROV

September 14–16, 2017

Arkhangelsk
Russia



СОЗДАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ БУМАЖНОГО ЛИСТА

И.В. Лебедев, Я.В. Казаков, Т.А. Гурьев

Северный (Арктический) федеральный университет, г. Архангельск, Россия

На основе разработанных ранее алгоритмов описывается технология получения виртуального трехмерного бумажного листа. Создание листа выполняется путем генерации трехмерных волокон, обладающими геометрическими характеристиками, подчиняющимся заданным законам распределения, и их последующей укладкой в единую структуру. Для любой получаемой структуры производится расчет деформационных и прочностных характеристик.

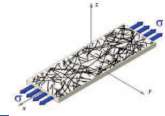
COMPUTER MODELLING OF STRUCTURE AND DEFORMATION OF A PAPER SHEET

I.V. Lebedev, Y.V. Kazakov, T.A. Gurjev

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

Based on the earlier algorithms reveals a mechanism for obtaining virtual three-dimensional paper sheet. The creation of the sheet is performed by generating three-dimensional fibers with random geometric characteristics, and their subsequent packing into a single structure. For any get structure calculation of deformation and strength characteristics.

В целлюлозно-бумажной отрасли для анализа структуры материала существует множество методов, одним из которых, еще развивающимся, является компьютерное моделирование. Основополагающим алгоритмом любого моделирования структуры бумажного листа является повторяющийся цикл из трех основных шагов: генерация отдельного волокна, размещение волокна в пространстве модели, изгиб волокна относительно топологии поверхности. Итогом данного моделирования является трехмерный вычислительный имитатор бумажной структуры с возможностью прогнозирования свойств бумаги. Эта модель дает возможность создать виртуальный образец, который будет напоминать реальный. Созданная модель не может полностью заменить экспериментальную работу, однако вычислительное моделирование, в зависимости от его совершенства, может стать методом для быстрой оценка определенных свойств полученного листа и использования этой информации для регулирования тех или иных качеств бумаги, на которые направлено моделирование. Ранее [1,2] были получены алгоритмы создания математических моделей отдельных целлюлозных волокон и бумажного листа в целом. Целью данной работы является описа-

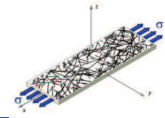


ние прикладного программного обеспечения для построения компьютерной модели деформирования бумажного листа на основании информации об изменении структурно-морфологических характеристик целлюлозных полуфабрикатов с различным содержанием лигнина в процессе размола.

Для обеспечения соответствия моделирования бумажного полотна реальным объектам, были изучены свойства шести различных видов целлюлозы: небеленая хвойная со степенью делигнификации 25,4 и 51,9 ед. Каппа; небеленая лиственная со степенью делигнификации 14,1 и 118 ед. Каппа; а также беленая лиственная и хвойная целлюлоза. С применением вероятностно-статических методов для каждого вида целлюлозы были обработаны обширные массивы данных их геометрических характеристик, полученных на автоматическом анализаторе L&W Fiber Tester¹. В результате было установлено, что для ширины (b) и длины (l) волокна данные не противоречат гипотезе о принадлежности выборки к логарифмическому нормальному распределению с параметрами μ и σ , а данные для кривизны волокна – экспоненциальному распределению с параметром λ [3,4]. Таким образом, для каждого полуфабриката при четырех различных степенях помола были получены параметры распределения, которые позволяют получить выборки волокон с заданной длиной, шириной и кривизной практически при любой степени механического воздействия.

По разработанному ранее алгоритму [5] при моделировании отдельного волокна программа согласно полученным для каждого образца параметрам распределения и заданной пользователем степени помола рассчитывает длину, ширину и кривизну волокон. На основе полученных значений производится расчет координат основных четырех определяющих точек кривой Безье (параметрическая кривая, наиболее близкая к реальной траектории волокна), которые используются для вычисления коэффициентов параметрического уравнения. После полученные коэффициенты подставляются в уравнение кривой и выполняется построение траектории виртуального волокна.

Далее производится моделирование поперечного сечения волокна. Исходя из морфологического строения целлюлозное волокно можно представить в виде цилиндра с продольным отверстием, поперечное сечение которого также представляет эллипс, в связи с этим для моделирования поперечного сечения волокна необходимо производить построение двух подобных многоугольников, точки, одного из которых, будут являться точками для внешней стенки волокна, а точки другого – для внутренней.



Моделирование поперечного сечения осуществляется по параметрическому уравнению эллипса, центры которых представляют основные точки траектории волокна.

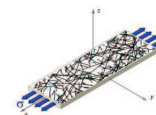
Завершающим этапом построения волокна является создание прямоугольных полигонов соединением соответствующих точек всех построенных многоугольников. Результат моделирования единичного целлюлозного волокна представлен на рис. 1.



Рис. 1. Модель трехмерного целлюлозного волокна из лиственной целлюлозы с небольшим количеством остаточного лигнина ($l = 0,82$ мм, $b = 35,7$ мкм, $f = 89$ %)

Для решения следующей задачи – создания трехмерной модели бумажного листа в разработанном ПО имеется два выбираемых пользователем варианта генерации данной модели: по количеству волокон или по весу получаемого листа. При выборе первого варианта (задании n -го количества волокон) производится поочередное моделирование волокон от 1 до n и их размещение случайным образом на ровной поверхности, площадь которой задается пользователем, но не превышает 10 см^2 . В случае второго варианта генерация волокон происходит до тех пор, пока не будет достигнута заданная масса 1 м^2 листа. Для этого при моделировании каждого волокна производится расчет его массы в граммах и его суммирование к значению общей массы всех волокон, которая после этого делится на площадь заданной поверхности для укладки.

Укладка является наиболее сложной и требующей большого объема вычислений операцией в создании модели бумажного листа и производится в несколько основных этапов. На первом этапе происходит разбиение всей поверхности на дискретную сетку точек, размерами 2000×2000 , причем изначально каждой точке сетки присваивается нулевая z -координата. Далее происходит генерация волокна со случайным распределением коор-



динат (x,y) его центра и расположением на определенном расстоянии от поверхности. Таким образом, каждая точка волокна получает определенные x,y,z -координаты в каждой точке дискретной сетки. На завершающем этапе происходит прибавление рассчитанных координат моделируемого волокна к координатам поверхности с учетом ее топологии и гибкости самого волокна.

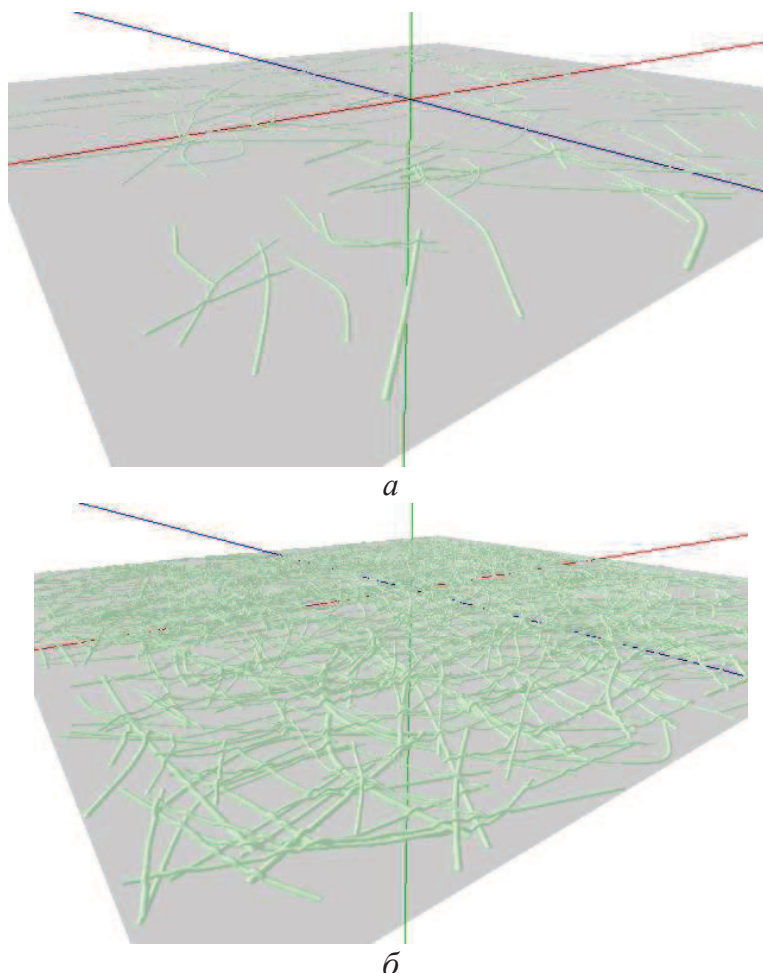
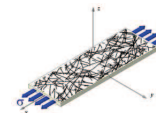


Рис. 2. Трехмерные модели бумажного листа из хвойной беленой целлюлозы при степени помола 30°ШР : *a* – 100 волокон; *b* – 1000 волокон

В процессе моделирования, волокна формируют шероховатую поверхность, образующую развивающуюся сетку. Степень, с которой волокна изгибаются в z -направлении по этой поверхности определяется применением алгоритма «катящегося шара» [1]. Изгиб волокна при его укладке на уже сформированную поверхность напрямую зависит от «радиуса шара», величина которого напрямую связана с плотностью листа, соответствующей степени помола, заданной пользователем. На рис. 2 приведены результаты моделирования бумажного листа из хвойной беленой целлюло-



зы на поверхности площадью 1 см^2 при степени помола $30 \text{ }^\circ\text{ШР}$ и изменяющемся количестве волокон.

На рис. 3 показан вид сверху трехмерных моделей при тех же условиях, но теперь при изменяющемся значении массы 1 м^2 образцов.

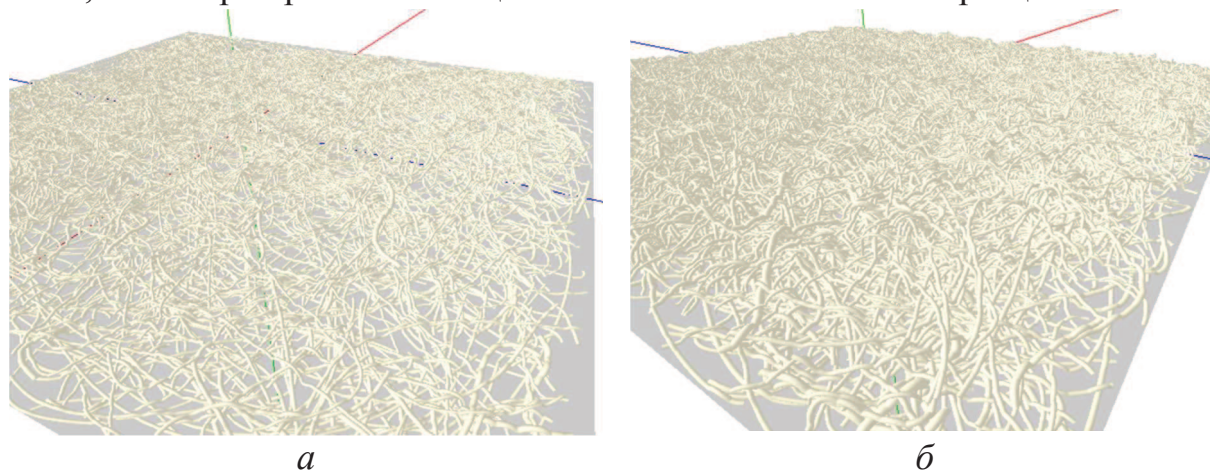
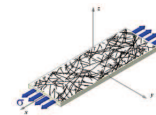


Рис. 3. Трехмерные модели бумажного листа из хвойной белой целлюлозы при степени помола $30 \text{ }^\circ\text{ШР}$: *а* – 30 г/м^2 ; *б* – 75 г/м^2

Таким образом, укладывая друг на друга волокна, мы получаем 3-мерный массив данных, который позволяет однозначно судить о количестве целлюлозных волокон в рассматриваемой области пространства и количестве пустот между ними. При задании постоянного числа сегментов в каждом волокне это позволяет просчитать количество точек пересечения сегментов волокон и вычислить свойства моделируемого бумажного полотна. Основные параметры модели вычисляются автоматически и выводятся сразу после ее генерации. Рассчитанные параметры для примеров на рис. 2 и 3 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные физические параметры полученных моделей

Параметр	Номер рисунка с примером модели			
	Рис. 2, <i>а</i>	Рис. 2, <i>б</i>	Рис. 3, <i>а</i>	Рис. 3, <i>б</i>
Удельный вес, г/м^2	1,95	19,00	30,01	74,74
Количество волокон, шт.	100	1000	1564	3863
Толщина модели, мкм	31,9	43,5	50,2	101,1
Кажущаяся плотность, г/см^3	0,06	0,43	0,59	0,74
Масса модели, мг	0,2	2,2	3,1	7,2
Средняя длина волокон, мм	1,78	1,80	1,82	1,84
Средняя ширина волокон, мкм	34,2	33,6	33,5	33,5
Средний фактор формы, %	87,9	87,3	87,1	87,6



Получаемые значения этих (табл. 1) и других рассчитываемых параметров позволяют выполнить прогнозирование величин характеристик деформативности и прочности при растяжении для образцов при различной степени помола. Для выполнения этой цели может быть применен феноменологический подход [6], и на основе модели стандартного вязкоупругого тела используется уравнение, описывающее кривую «напряжение-деформация», являющуюся основным индикатором структуры целлюлозно-бумажных материалов. Коэффициенты получаемого уравнения вычисляются по уравнениям регрессии, использующие расчетные параметры трехмерной модели бумажного листа.

Таким образом, разработанный компьютерный имитатор позволяет оценить не только структуру, но и основные деформационно-прочностные свойства получаемых моделей при любых степенях помола, задаваемых пользователем.

¹Работа выполнена в инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России»

Список литературы

1. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Моделирование структуры бумажного листа. // ИВУЗ Лесной журнал. 2017. № 2/356. С. 160–172.
2. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Математическая модель структуры бумажного листа / В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. III Междунар. науч.-техн. конф. (Архангельск, 9-11 сентября 2015 г.) / Сев. (Арктич.) фед. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2015. С. 288–293.
3. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растительного сырья. 2014. №1. С. 269–275.
4. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Математическая модель геометрических характеристик волокон в бумажной массе / В сб. «Работа целлюлозно-бумажных предприятий в современных условиях»: матер. и докл. 16-й Междун. научн.-техн. конф. г. Караваяево. 28-29 мая 2015 г. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2015. С.80–88.
5. Казаков Я.В. Трехмерное моделирование целлюлозных волокон. // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: матер. IV Всерос. конф. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2009. Книга I. с. 57–59.
6. Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов / Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 440 с.