

4. Смолин А.С., Комаров В.И. Роль лигнина в технологии материалов для гофрокартона // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы IV Международной научно-технической конференции. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2017. – С. 29-34.

5. Смолин, А.С. и др. Технология гофрокартона. Уч. пособие. – Санкт- Петербург:СПбГУПТД, 2018.– 405 с.

УДК 676. 017.272

Я.В. Казаков¹, доц., д-р техн. наук
И.В. Лебедев², ведущий инженер, канд. техн. наук
j.kazakov@narfu.ru, mr.ivan.lebedev@mail.ru
(¹САФУ, ²ООО «Лукойл-Энергосети», г. Архангельск, Россия)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БУМАЖНОГО ЛИСТА

Целлюлозно-бумажный материал обладает неоднородной анизотропной структурой, формирующейся в основном из волокон растительного происхождения, распределенных в листе стохастическим образом, и которую, в первом приближении, можно представить в виде волокнистой сетки.

Для поиска оптимальных условий получения бумаги с заданным уровнем физико-механических характеристик в настоящее время все шире применяется численного моделирования структуры бумаги, позволяющее создать 3-мерную модель материала, обладающую теми же свойствами, что и реальный материал. Работая с созданной моделью, можно избирательно проследить влияние различных параметров и свойств, не выполняя экспериментальной работы. Построение визуальной компьютерной модели дает наглядное представление о расположении и взаимодействии волокон в структуре листа и зависимости физико-механических свойств моделируемых образцов от изменяемых факторов.

Для получения компьютерной 3D-модели была разработана математическую модель полотна бумаги, которой после переноса в программную среду придается определенный набор свойств, более полно характеризующих структуру моделируемого листа [5]. В предыдущих исследованиях был описан ее базовый алгоритм [3,4].

Для создания физической основы моделирования бумажного полотна были исследованы 6 различных видов целлюлозы: небеленая хвойная со степенью делигнификации 25,4 и 51,9 ед. Каппа; небеленая лиственничная со степенью делигнификации 14,1 и 118 ед. Каппа; а также

беленая лиственная и хвойная целлюлоза. С применением вероятно-статических методов для каждого вида целлюлозы были обработаны обширные массивы данных их геометрических характеристик, полученных на автоматическом анализаторе L&W Fiber Tester.

При построении модели использован алгоритм получения адекватной по длине, ширине и кривизне выборки волокон для моделирования структуры бумажного листа с заданной композицией по волокну, который заключается в следующем: используя параметры распределения длины волокна формируется выборка из заданного числа волокон, подчиняющаяся логарифмически нормальному распределению и определяется количество волокон в каждом классе длины; для каждого из волокон в классе длины, используя параметры распределения ширины и кривизны волокна в классе, рассчитывается ширина и кривизна каждого волокна в классе. В результате каждое из модельных волокон получает характеристики – длину, ширину и кривизну погрешность в большинстве случаев не превышает 5 % [1,3].

3D моделирование отдельных волокон производится в несколько этапов [2]. На первом при заданных пользователем виде и степени обработки волокна, рассчитывается длина, ширина и кривизна каждого из волокон. Затем вычисляются координаты основных четырех определяющих точек кривой Безье и коэффициенты параметрического уравнения, которые подставляются в уравнение кривой и происходит построение траектории виртуального волокна.

На втором этапе выполняется моделирование поперечного сечения волокна. Исходя из морфологического строения, целлюлозное волокно можно представить в виде сплющенного цилиндра с продольным отверстием, поперечное сечение которого представляет эллипс, в связи с этим, необходимо производить построение двух подобных многоугольников, точки одного из которых будут являться точками для внешней стенкой волокна, а точки другого – для внутренней. При расчете используется параметрическое уравнение эллипса. Таким образом, каждой расчетной точке траектории (центральной линии) волокна присваивается набор точек, который однозначно характеризует поперечное сечение волокна в данной точке. Завершающим этапом построения волокна является создание прямоугольных полигонов соединением соответствующих точек полученной на втором этапе матрицы.

Укладка трехмерных волокон на плоскость и формирование трехмерной структуры листа является наиболее сложной и требующей большого объема вычислений операцией и производится в несколько основных этапов [5]: 1) разбиение всей поверхности на дискретную

сетку точек, размерами 2000×2000 , причем изначально каждой точке сетки присваивается нулевая z -координата; 2) генерация волокна со случайным распределением координат x, y его центра и расположением на определенном расстоянии от поверхности; 3) задание угла ориентации волокна на плоскости (нормальное распределение) и его поворот; 4) прибавление рассчитанных координат моделируемого волокна к координатам поверхности с учетом ее топологии и гибкости самого волокна.

В процессе моделирования, волокна формируют шероховатую поверхность, образующую развивающуюся сетку, рис.1.

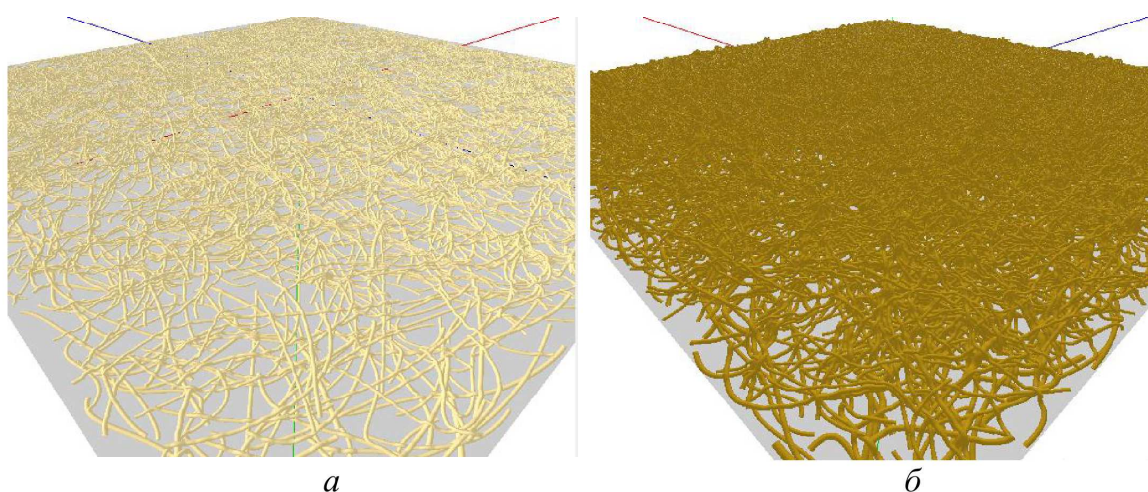


Рисунок 1 – Примеры моделей трехмерных листов бумаги: а – листовая небеленая целлюлоза (14,1 ед. Каппа), 35 °ШР, 1000 волокон; б – хвойная небеленая целлюлоза (51,4 ед. Каппа), 35 °ШР, масса $1 \text{ м}^2 75 \text{ г}$

Степень, с которой волокна изгибаются в z -направлении по этой поверхности определяется применением алгоритма «катящегося шара» [4]. 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. С помощью разработанного программного обеспечения для всех образцов целлюлозы было выполнено моделирование виртуальных листов (масса 75 г/м^2 , площадь поверхности 1 см^2) с различным содержанием лигнина в процессе размола рассчитаны его свойства. При расчете характеристик модели математически учитывается изменение фибриллярной структуры волокон в процессе размола, и определяется общая поверхность волокон. В таблице представлена характеристика виртуальных моделей массой $1 \text{ м}^2 75 \text{ г}$ и степенью помола 30 °ШР .

Таблица – Исследование моделей бумажных листов

Характеристика	Хвойная небеленая 25,9 ед. каппа	Хвойная беленая	Лиственная небеленая 118 ед. каппа
Количество волокон, шт.	4497	6083	9113
Средняя длина волокон, мм	1,93	1,53	1,13
Средняя ширина волокон, мкм	34,7	33,6	29,8
Средний фактор формы, %	87,6	87,5	92,1
Плотность листа, г/см ³	0,67	0,71	0,71
Толщина, мкм	111,9	105,6	105,6
Количество пересечений (кон- тактов волокон), шт.	77167	79718	130435
Площадь контактирующей поверхности, мм ²	28,7	28,4	43,4

Для прогнозирования механических свойств виртуальных листов применяется феноменологический подход, в ходе которого на основе вязкоупругой трехэлементной модели деформирования Максвелла-Томсона используется уравнение типичного тела с одним временем релаксации, которое описывает поведение кривой «напряжение-деформация» [4].

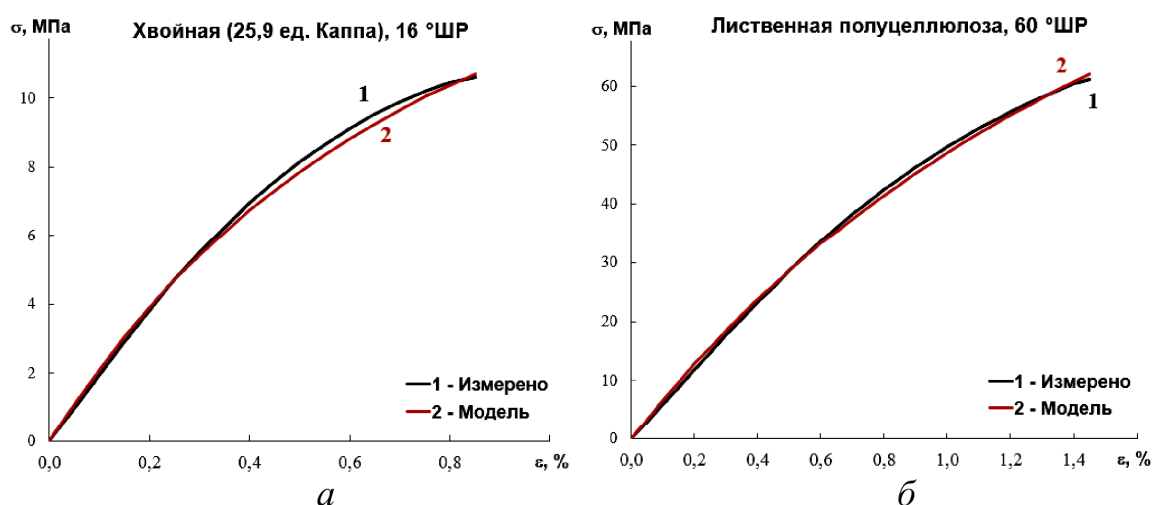


Рисунок 2 – Примеры экспериментальных и модельных кривых « σ - ϵ », полученных по уравнению 2: а – хвойная небеленая целлюлоза (25,9 ед. Каппа), 16 °ШР; б – лиственная полуцеллюлоза, 60 °ШР

В процессе моделирования производится расчет параметров модели деформирования и прогнозные значения деформации разрушения и разрушающего напряжения для выбранного образца. Далее рассчитываются точки кривой «напряжение – деформация», выполняется математическая обработка модельной кривой, и вычисляются характеристики деформативности.

На рис. 2 представлены примеры экспериментальных и модельных кривых «напряжение – деформация», на которых прослеживается их соответствие, что свидетельствует о работоспособности разработанной методики.

Таким образом, трехмерная компьютерная модель бумажного листа, созданная на основе математически формализованных закономерностей и разработанных алгоритмов, позволяет не только визуализировать и анализировать трехмерную структуру волокнистого материала, но и прогнозировать его деформационные и прочностные свойства.

Работа выполнена на оборудовании ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растительного сырья. 2014. №1. 269–275.
2. Kazakov Yakov, Lebedev Ivan, Guriev Timur. 3D-modelling of cellulose fibers. Progress in Paper Physics Seminar 2016 Conference Proceedings, Darmstadt, 2016, pp. 189–192.
3. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Моделирование структуры бумажного листа. // Лесной журнал. 2017. № 2/356. С. 160–172 (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Лебедев И.В., Казаков Я.В., Гурьев Т.А. Создание компьютерной модели структуры и деформирования бумажного листа. / В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. Архангельск, 14-16 сентября 2017 г. Сев. (Арктич.) фед. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2017. С. 68–73.
5. Манахова Т.Н., Казаков Я.В. Расчет параметров феноменологической модели деформирования целлюлозного материала по результатам измерений на автоматическом анализаторе волокна // Изв. высш. учеб. заведений: Лесной журн., 2014. №1. С.140–147.