

УДК 676.017

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО МАТЕРИАЛА
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ
НА АВТОМАТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ ВОЛОКНА**

© *Т.Н. Манахова, асп.*

Я.В. Казаков, канд. техн. наук

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002
E-mail: TatiankaYa17@yandex.ru

Рассмотрен разработанный метод прогнозирования деформационного поведения при растяжении сульфатной хвойной небеленой целлюлозы с использованием феноменологической модели на основе уравнения типичного тела с одним временем релаксации. Параметры модели рассчитаны по многофакторным уравнениям регрессии, связывающим свойства волокна и деформационные свойства целлюлозно-бумажного материала при растяжении образцов сульфатной хвойной небеленой целлюлозы производственного изготовления с различным содержанием лигнина (число Каппа 25,9...51,4) и степенью помола 14...40 °ШР.

В качестве входных данных использованы результаты измерений структурно-морфологических характеристик волокна на автоматическом анализаторе L&W FiberTester.

В процессе моделирования по уравнениям регрессии рассчитываются параметры модели деформирования и прогнозные значения плотности, толщины, деформации разрушения и разрушающего напряжения для выбранного образца, а также точки кривой «напряжение–деформация», выполняется математическая обработка модельной кривой и вычисляются характеристики деформативности. Результаты экспортируются в MS Excel для последующего анализа.

Представленный метод прогнозирования характеристик деформативности и прочности при растяжении для сульфатной хвойной небеленой целлюлозы с известными числом Каппа и степенью помола по данным о структурно-морфологических характеристиках волокна, полученных на автоматическом анализаторе L&W FiberTester, позволяет сократить время получения информации о деформационных свойствах целлюлозного материала до 20 мин без изготовления отливок и проведения испытаний.

Ключевые слова: сульфатная хвойная целлюлоза, деформационные характеристики, структурно-морфологические характеристики целлюлозных волокон, феноменологическая модель.

Деформация и прочность целлюлозно-бумажных материалов являются важными потребительскими свойствами, в значительной степени определяющими цену готовой продукции и спрос на нее.

Традиционные испытания технической целлюлозы, как правило, требуют много времени и включают в себя большое количество операций, проводимых вручную. Для определения комплекса свойств традиционным способом требуется как минимум 10 ч, в течение которых необходимо выполнить размол целлюлозы, изготовить и провести кондиционирование лабораторных отливок, нарезать образцы, подвергнуть их испытанию и провести расчеты [6].

Современные компьютерные технологии измерений открывают новые возможности автоматизированного определения характеристик целлюлозных волокон. Используемый в них прямой анализ геометрии волокон базируется на анализе изображения. Преимуществом этого метода является измерение первичных характеристик волокна, которые, по мнению разработчиков, могут объяснить причины отклонения в качестве массы [9]. Современные анализаторы волокна позволяют в автоматическом режиме проводить измерения и получать гистограммы распределения длины l_{cp} , ширины b , кривизны волокон f , числа изломов на волокне n , угла излома u , длины сегмента l_s , доли мелочи m и др. характеристик.

Очевидно, что такая полная характеристика целлюлозной массы имеет высокий прогнозирующий потенциал для определения деформационных и прочностных свойств технической целлюлозы.

Это подтверждают и высокие коэффициенты множественной корреляции деформационных и прочностных свойств со структурно-морфологическими характеристиками, рассчитанные в ходе эксперимента с использованием образцов хвойной сульфатной небеленой целлюлозы с различным содержанием лигнина (число Каппа 25,9...51,4) [4, 5], отобранных на ОАО «Соломбальский ЦБК» (табл. 1).

В процессе лабораторных испытаний технической целлюлозы на растяжение определяют комплекс свойств, состоящий из более 25 характеристик деформативности и прочности [1, 2]. Для прогнозирования такого комплекса характеристик традиционным путем необходимо составлять регрессионные

Таблица 1

Коэффициенты множественной корреляции деформационных и прочностных свойств со структурно-морфологическими характеристиками сульфатной хвойной небеленой целлюлозы

Y	$y = f(l_{cp}, b, f, u, n, l_s, m)$
Разрывная длина L	0,827
Разрушающая нагрузка F_p	0,818
Разрушающее напряжение σ_p	0,855
Деформация разрушения ε_p	0,697
Работа разрушения A_p	0,758
Жесткость при растяжении S	0,777
Начальный модуль упругости E_1	0,861
Модуль упругости в области предразрушения E_2	0,764

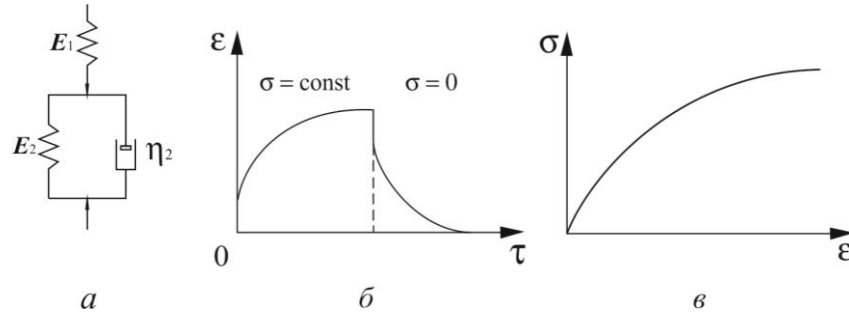


Рис. 1. Упругоэластическая модель деформирования: *a* – структура модели; *б* – график деформирования в режиме ползучести; *в* – кривая деформирования при растяжении с постоянной скоростью

уравнения отдельно для каждой характеристики и использовать их для дальнейших расчетов. Для сокращения объема вычислений при прогнозировании в качестве альтернативы предлагается использовать феноменологическую модель, анализируя которую можно рассчитывать деформационные и прочностные характеристики. Применяя к изучению деформаций феноменологический подход, касаются в основном только внешних проявлений механических свойств и изучают его поведение материала на основании рассмотрения идеализированных механических моделей [7]. При использовании подобной феноменологической модели количество уравнений регрессии сокращается до числа параметров модели.

Ранее был предложен способ прогнозирования деформационного поведения сульфатной хвойной целлюлозы с использованием стандартной упругоэластической модели (рис. 1), которую можно быть использовать для описания свойств целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки [3].

Зависимость, связывающая напряжение σ и деформацию ε для такой модели имеет следующий вид:

$$\sigma(\varepsilon) = E_2\varepsilon + \nu n(E_1 - E_2)(1 - e^{-\varepsilon/\nu n}),$$

где E_1 , E_2 – соответственно и длительный модуль упругости;

ν – скорость приложения нагрузки;

n – время релаксации напряжения.

Расчет параметров модели выполняется путем сопоставления экспериментальных значений напряжения и деформации образца в точках кривой «напряжение–деформация» (σ – ε) с рассчитанными по модели параметрами (E_1 , E_2 , n), полученными при математической обработке экспериментальных кривых σ – ε [1], и уточнения параметров. За параметры модели деформирования принимаются уточненные значения E_1^M , E_2^M и n^M , при которых минимален квадрат суммы отклонений значений напряжения экспериментальной кривой от модельной.

В табл. 2 представлены результаты расчета параметров модели деформирования (E_1^M , E_2^M и n^M). Для контроля соответствия модели экспериментальным данным здесь же приведены измеренные значения деформации разрушения ϵ_p и разрушающего напряжения σ_p .

На следующем этапе был проведен регрессионный анализ для оценки возможности прогнозирования параметров модели на основании структурно-морфологических характеристик волокна, измеренных на автоматическом анализаторе L&W FiberTester, а также числа Каппа и степени помола. Аппроксимация экспериментальных данных была осуществлена по линейному, логарифмическому, степенному уравнениям регрессии.

Таблица 2

**Расчетные параметры модели деформирования
для образцов хвойной сульфатной небеленой целлюлозы**

Число Каппа	Степень помола, °ШР	Параметры модели			Характеристики в точке разрушения	
		E_1^M ,	E_2^M ,	n^M , с	ϵ_p , %	σ_p , МПа
		МПа				
25	17	4380	369	10,0	1,98	37,3
	20	5750	615	11,6	2,15	57,2
	25	6691	583	12,5	2,73	75,0
	30	7266	841	12,6	2,01	73,6
	40	7498	691	13,3	2,45	83,0
30	15	4729	455	9,5	1,66	37,1
	20	5789	612	11,6	2,22	58,5
	25	6602	651	12,0	2,30	68,0
	30	7036	674	11,7	2,31	71,6
	40	7076	674	12,1	2,28	72,6
35	16	4041	320	9,1	1,72	30,5
	20	5390	467	11,9	2,73	58,8
	25	5891	464	11,8	2,58	61,5
	30	6321	557	11,1	2,36	62,1
	40	6730	677	12,0	2,23	68,5
40	17	4840	506	9,4	1,56	36,7
	20	6452	637	11,6	2,19	64,0
	25	6143	536	11,4	2,42	61,9
	30	6757	603	11,9	2,52	71,5
	40	6826	600	11,9	2,40	70,3
45	16	4873	553	9,2	1,48	36,1
	20	5033	397	10,9	2,19	46,8
	25	5858	489	12,1	2,70	63,9
	30	6291	665	13,9	2,55	74,7
	40	6966	583	11,9	2,59	73,7
50	14	3958	457	9,1	1,34	27,8
	20	5279	455	13,0	2,76	61,0
	25	5909	548	12,6	2,57	65,5
	30	5599	503	12,6	2,54	61,4
	40	5753	475	12,1	2,75	63,0

В качестве переменных x_i приняты средняя длина x_1 и ширина x_2 , фактор формы x_3 , угол излома x_4 , число изломов на волокно x_5 , длина сегмента x_6 , доля мелочи x_7 , а также число Каппа x_8 и степень помола x_9 .

Средняя стандартная ошибка прогнозирования параметров модели составляет от 4 до 10 %. Наиболее достоверные результаты дает прогнозирование по линейному уравнению регрессии, которое и было принято для дальнейшего использования.

Для прогнозирования зависимостей «напряжение–деформация» целлюлозно-бумажных материалов с использованием феноменологической модели деформирования по результатам измерений характеристик волокна на автоматическом анализаторе L&W Fiber Tester и расчета характеристик деформативности при математической обработке этих кривых была разработана программа Prognoz [8]. На рис. 2 представлен внешний вид программы.

Исходные данные для проведения расчетов: имя образца, число Каппа, степень помола, структурно-морфологические характеристики волокна, полученные с помощью L&W FiberTester, условия растяжения (длина и ширина образца, скорость растяжения). Расчеты могут быть выполнены с использованием только данных о структурно-морфологических характеристиках ($x_1 \dots x_7$) – вариант 1; с добавлением к ним данных о числе Каппа и степени помола ($x_1 \dots x_9$) – вариант 2.

В процессе моделирования по уравнениям регрессии считывают параметры модели деформирования и прогнозные значения плотности, толщины, деформации разрушения и разрушающего напряжения для выбранного образца. Далее рассчитывают точки кривой «напряжение–деформация», выполняют

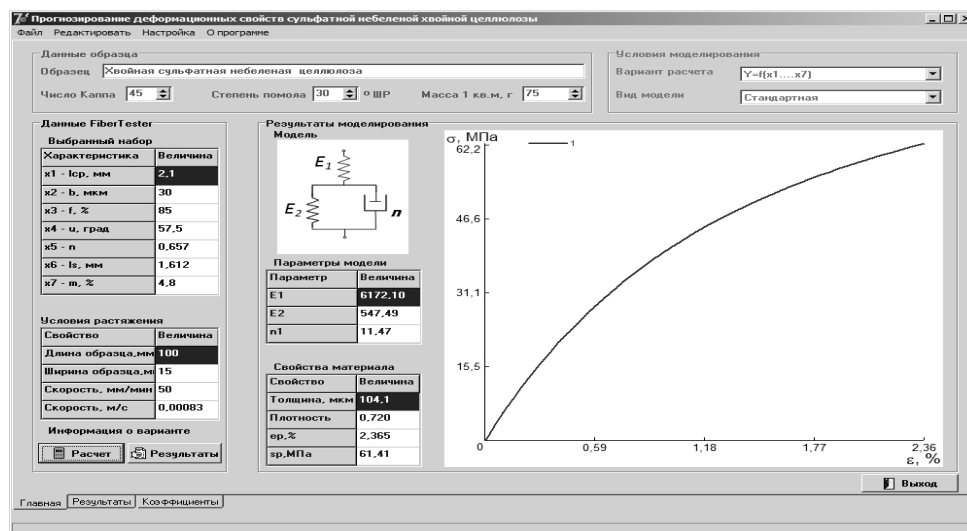


Рис. 2. Окно программы Prognoz при проведении расчетов

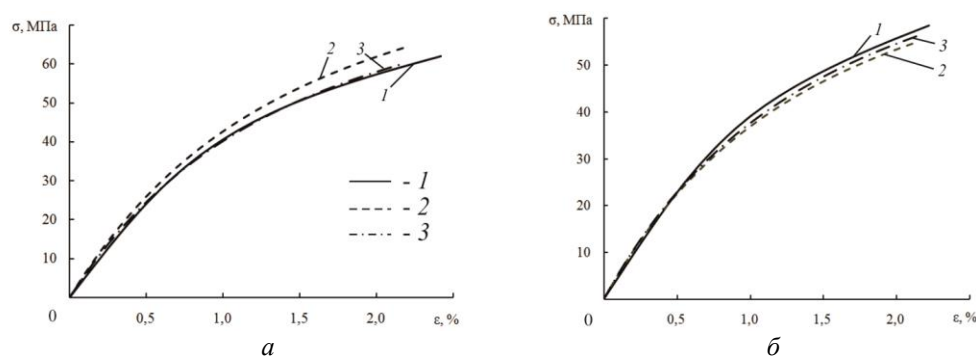


Рис. 3. Примеры экспериментальных и рассчитанных в программе Prognoz кривых «напряжение–деформация»: *а* – образец с числом Каппа 40 и степенью помола 25 °ШР; *б* – образец с числом Каппа 30 и степенью помола 20 °ШР; 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая для варианта 1; 3 – для варианта 2

математическую обработку модельной кривой и вычисляют характеристики деформативности. Результаты экспортируют в MS Excel для последующего анализа.

На рис. 3 представлены примеры экспериментальных и модельных кривых «напряжение–деформация», на которых прослеживается их соответствие, что свидетельствует о работоспособности разработанной методики. В большинстве случаев ошибка расчетов деформационных и прочностных характеристик в программе Prognoz составляет от 0,5 до 12,0 %.

Таким образом, установлена возможность использования феноменологической модели деформирования стандартного упруго-эластического тела с одним временем релаксации для прогнозирования характеристик деформативности и прочности при растяжении образцов сульфатной хвойной небеленой целлюлозы с известными числом Каппа и степенью помола по структурно-морфологическим характеристикам волокна, полученным на автоматическом анализаторе L&W FiberTester. Это позволяет сократить время получения информации о деформационных свойствах целлюлозного материала до 20 мин, без изготовления отливок и проведения испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Я.В., Комаров В.И. Математическая обработка кривых зависимости «напряжение–деформация», полученных при испытании целлюлозно-бумажных материалов на растяжение // Лесн. журн. 1995. №1. С. 109–114. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Комаров В.И., Казаков Я.В. Анализ механического поведения целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки // Лесн. вестник МГУЛ. 2000. №3 (12). С. 52–62.
3. Комаров В.И., Казаков Я.В. Использование феноменологической модели деформирования для прогнозирования деформативности сульфатной небеленой целлюлозы // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2000. №5. С. 38–41.

4. Манахова Т.Н., Казаков Я.В. Изменение свойств волокон хвойной сульфатной небеленой целлюлозы в процессах производства // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы V Всерос. конф. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2012. С. 350–353.

5. Манахова Т.Н., Казаков Я.В. Оптимизация использования прочностного потенциала хвойного волокна в процессах производства // Современное оборудование и технологии изготовления бумажно-картонной продукции из макулатурного сырья. Производство гофрокартона и изготовление тары: материалы и доклады 13-й Междунар. науч.-техн. конф. 23–25 мая 2012 г., Караваево. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2012. С. 75–83.

6. Пузырев А.С. Измерение качества бумаги и картона. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 410 с.

7. Тюленева Е.М. Уточнение реологической модели древесины / Хвойные борельной зоны. 2008. № 1–2. С. 179–183.

8. Свидетельство № 2013619256 РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для прогнозирования деформационных характеристик целлюлозы по результатам анализа волокна (Prognoz) / Казаков Я.В, Манахова Т.Н.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВПО Северный (Арктический) федеральный университет (RU). № 2013617338; заявл. 13.08.13; опубл. 30.09.13, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

9. Karlsson H. Fiber Guide. Fiber analysis and process applications in the pulp and paper industry. AB Lorentzen&Werrte. 2006. 120 p.

Поступила 15.07.13

Calculation of Phenomenological Model Parameters of Cellulose Material Deformation Based on the Data from Automated Analyzer

T.N. Manakhova, Postgraduate Student

Ya.V. Kazakov, Ph.D. (Engineering)

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, 163002, Arkhangelsk, Russia
E-mail: TatiankaYa17@yandex.ru

The paper presents a method developed to predict deformation tensile behaviour of unbleached softwood kraft pulp using a phenomenological model based on the equation of a typical body with a single relaxation time. The model parameters are calculated by multivariate regression analysis. The model links the properties of fiber and tensile deformation properties of pulp and paper material made of unbleached softwood industrial kraft pulp with different lignin content (the Kappa number 25.9 ... 51.4) and with refining degree of 14 ... 40 °SR .

As input data we used measurements of fiber structural-morphological characteristics taken by the automated analyzer L&W FiberTester.

During the simulation, parameters of the deformation model are calculated by regression equation. Predicted values of density, thickness, strain to failure, and failure stress for the selected sample are calculated. Then points of "stress-strain" curve are calculated, mathematical processing of the model curve is performed and characteristics of deformability are calculated. The results are exported to MS Excel for further analysis.

The presented method of predicting deformability and tensile strength for unbleached softwood kraft pulp with known Kappa number and degree of grinding allows us to reduce the time required to obtain data on the deformation properties of cellulose material to 20 minutes without having to make pulp handsheets or run any tests.

Keywords: unbleached softwood kraft pulp, deformation characteristics, structural and morphological characteristics of cellulose fiber, phenomenological model.

REFERENCES

1. Kazakov Ya.V., Komarov V.I. Matematicheskaya obrabotka krivykh zavisimosti "napryazhenie-deformatsiya", poluchennykh pri ispytanii tsellyulozno-bumazhnykh materialov na rastyazhenie [Mathematical Processing of the "Stress-Strain" Curves Obtained During Tension Testing of Pulp and Paper Materials]. *Lesnoy zhurnal*, 1995, no. 1, pp. 109–114.
2. Komarov V.I., Kazakov Ya.V. Analiz mekhanicheskogo povedeniya tsellyulozno-bumazhnykh materialov pri prilozhenii rastyagivayushchey nagruzki [Analysis of Mechanical Behavior of Pulp and Paper Materials at Tensile Load]. *Lesnoy vestnik MGUL*, 2000, no. 3 (12), pp. 52–62.
3. Komarov V.I., Kazakov Ya.V. Ispol'zovanie fenomenologicheskoy modeli deformirovaniya dlya prognozirovaniya deformativnosti sul'fatnoy nebelenoy tsellyulozy [Phenomenological Model for Predicting Deformation of Unbleached Kraft Pulp]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2000, no. 5, pp. 38–41.
4. Manakhova T.N., Kazakov Ya.V. Izmenenie svoystv volokon khvoynoy sul'fatnoy nebelenoy tsellyulozy v protsessakh proizvodstva [Changes in Fiber Properties of Unbleached Softwood Sulphate Pulp During Production]. *Novye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy V Vserossiyskoy konf.* [Latest Advances in Chemistry and Chemical Engineering of Plant Materials: Proc. 5th All-Russian Conf.]. Barnaul, 2012, pp. 350–353.
5. Manakhova T.N., Kazakov Ya.V. Optimizatsiya ispol'zovaniya prochnostnogo potentsiala khvoynogo volokna v protsessakh proizvodstva [Optimizing the Use of Strength Capacity of Coniferous Fibers in Production]. *Sovremennoe oborudovanie i tekhnologii izgotovleniya bumazhno-kartonnoy produktsii iz makulaturnogo syr'ya. Proizvodstvo go-frokartona i izgotovlenie tary: Materialy i doklady 13-y Mezhdunar. nauch-tekhn. konf.* [Modern Equipment and Technology of Paper and Paperboard Production from Waste Paper. Production of Corrugated Cardboard and Package: Proc. 13th Int. Sci. and Tech. Conf.]. 23–25 May 2012, Karavaevo. Moscow, 2012, pp. 75–83.
6. Puzyrev A.S. *Izmerenie kachestva bumagi i kartona* [Measuring the Quality of Paper and Paperboard]. Moscow, 1966. 410 p.
7. Tyuleneva E.M. Utochnenie reologicheskoy modeli drevesiny [Rheological Model of Wood Revisited]. *Khvoynye boreal'noy zony*, 2008, no. 1–2, pp. 179–183.
8. Kazakov Ya.V., Manakhova T.N. *Programma dlya prognozirovaniya deformatsionnykh kharakteristik tsellyulozy po rezul'tatam analiza volokna (Prognoz)* [Program for Prediction of Deformation Characteristics of Pulp by Fibers Analysis (Prognoz)]. Certificate of State Registration of Computer Software. Russian Federation, no. 2013619256.
9. Karlsson H. *Fibre Guide. Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry*. AB Lorentzen & Werrte, 2006. 120 p.