



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.017.7

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-142-154

Сравнительный анализ тароупаковочного картона, полученного из различных видов целлюлозного волокнистого сырья

И.С. Содиков[✉], аспирант; ResearcherID: [HKV-1291-2023](https://orcid.org/0000-0002-2537-360X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2537-360X>

Н.В. Щербак, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4156-2020](https://orcid.org/0000-0002-7383-3826),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-3826>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; sodikovismoil@gmail.com[✉], n.sisoeva@narfu.ru

Поступила в редакцию 11.02.25 / Одобрена после рецензирования 23.04.25 / Принята к печати 27.04.25

Аннотация. Представлен сравнительный анализ свойств тароупаковочных видов картона, изготовленного в лабораторных условиях из целлюлозы стеблей хлопчатника, с промышленными образцами картона из вторичного сырья и полуфабрикатов высокого выхода, производимых на целлюлозных заводах России. Целью исследования является оценка возможности использования отходов хлопка как дополнительного или альтернативного сырья для получения тароупаковочных картонов, особенно в странах-производителях хлопка. Применение стеблей хлопка в качестве сырья для изготовления бумаги и картона не только решает проблемы сельскохозяйственных отходов, но и дает возможность внедрения модели циклической экономики, в соответствии с которой отходы повторно перерабатываются с получением материалов с высокой маржинальностью. Сравнивали образцы картона из целлюлозы стеблей хлопчатника 3 видов от разных производителей: картон-лайнер из первичного волокна Архангельского целлюлозно-бумажного комбината; из макулатуры марки МС-5Б Каменской бумажно-картонной фабрики и предприятия «Маяк»; картон-лайнер из эвкалиптовой макулатуры одного из предприятий Бразилии. Для оценки структурных характеристик образцов проведен микроскопический анализ волокна, позволивший визуализировать отличия морфологического строения волокон разной природы. Установлено, что целлюлоза стеблей хлопчатника по геометрическим параметрам ближе к показателям эвкалиптового макулатурного волокна. Длина волокна составила 0,75 мм, что на 40 % ниже, чем у образцов картона Каменской бумажно-картонной фабрики и «Маяка», и более чем в 2 раза меньше по сравнению со средней длиной целлюлозы в композиции картона Архангельского целлюлозно-бумажного комбината. Подготовку проб к испытаниям проводили по стандартным методикам в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57207–2008. Выполнен анализ физико-механических характеристик материалов, таких как разрывная длина, сопротивление продавливанию и др. Ввиду экологической и экономической целесообразности переработки недревесного сырья техноло-

гия производства картона из стеблей хлопчатника представляет собой важный шаг к созданию более устойчивых и конкурентоспособных материалов.

Ключевые слова: картон из стеблей хлопчатника, картон-лайнер, первичное волокно, макулатурное волокно, недревесное сырье, древесное сырье

Благодарности: Сравнительный анализ тароупаковочных видов бумаг проводили с использованием оборудования ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск.

Для цитирования: Содиков И.С., Щербак Н.В. Сравнительный анализ тароупаковочного картона, полученного из различных видов целлюлозного волокнистого сырья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 142–154. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-142-154>

Original article

Comparative Analysis of Packaging Cardboard Obtained from Different Types of Cellulose Fibrous Raw Materials

Ismoil S. Sodikov[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [HKV-1291-2023](https://orcid.org/0000-0002-2537-360X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2537-360X>

Natalia V. Shcherbak, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-4156-2020](https://orcid.org/0000-0002-7383-3826), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-3826>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; sodikovismoil@gmail.com[✉], n.sisoeva@narfu.ru

Received on February 11, 2025 / Approved after reviewing on April 23, 2025 / Accepted on April 27, 2025

Abstract. A comparative analysis of the properties of packaging cardboard types manufactured in laboratory conditions from cotton stalk cellulose with industrial samples of cardboard from recycled materials and high-yield semi-finished products produced at Russian paper mills has been presented in the article. The aim of the study has been to assess the possibility of using cotton waste as an additional or alternative raw material for the production of packaging cardboard, especially in cotton-producing countries. The use of cotton stalks as a raw material for the production of paper and cardboard not only solves the problem of agricultural waste, but also provides an opportunity to implement a circular economy model, according to which waste is recycled to produce high-margin materials. Samples of cardboard made from cotton stalk cellulose of 3 types from different manufacturers have been compared: linerboard made from primary fiber at the Arkhangelsk Pulp & Paper Mill; linerboard made from MS-5B waste paper at the Kamenskaya Paper & Board Mill and the “Mayak” Enterprise; linerboard made from eucalyptus waste paper at one of the Brazilian enterprises. To assess the structural characteristics of the samples, a microscopic analysis of the fiber has been carried out, which has made it possible to visualize the differences in the morphological structure of fibers of different nature. It has been established that the cellulose of cotton stalks is geometrically closer to that of eucalyptus waste paper fiber. The fiber length has been 0.75 mm, which is 40 % shorter than that of cardboard samples from the Kamenskaya Paper & Board Mill and the “Mayak” Enterprise and more than 2 times shorter than the average length of cellulose in the composition of cardboard from the Arkhangelsk Pulp & Paper Mill. The samples have been prepared for testing using standard methods in accordance with the requirements of GOST R 57207–2008. An analysis of the physical and mechanical characteristics of the ma-



terials, such as breaking length, bursting strength, etc., has been performed. Given the environmental and economic feasibility of recycling non-wood raw materials, the technology for producing cardboard from cotton stalks represents an important step towards creating more sustainable and competitive materials.

Keywords: cotton stalk cardboard, linerboard, virgin fiber, waste paper fiber, non-wood raw materials, wood raw materials

Acknowledgements: A comparative analysis of packaging types of paper was carried out using the equipment of the Innovative Technology Centre “Modern Technologies for Processing Bioresources of the North” of the Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk.

For citation: Sodikov I.S., Shcherbak N.V. Comparative Analysis of Packaging Cardboard Obtained from Different Types of Cellulose Fibrous Raw Materials. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 142–154. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-142-154>

Введение

На сегодняшний день хлопок выращивается на 32,6 млн га в 111 странах. После сбора хлопка остаются отходы в виде стеблей хлопчатника – 1–2 т/га [19]. С 2021 по 2024 гг. наблюдается глобальный рост потребительского спроса на продукцию хлопководства, достигающий 50 млн т/г. [25]. Хлопок служит различным целям, внося вклад в производство промышленных товаров, таких как брезент, переплет книг, промышленные нитки, вата, марлевые бинты и др. [15].

Объемы мирового производства хлопка демонстрируют стабильный рост. Китай и Индия занимают ведущие позиции в выращивании хлопка-сырца, каждая страна обеспечивает примерно 23 % от общего мирового объема. За ними следуют США, на долю которых приходится около 16,5 %, Бразилия – около 8 % и Узбекистан – около 3 % мирового хлопка [1].

В Китае недавние исследования указывают на ежегодное увеличение хлопковых отходов до более чем 100 млн т, причем значительная часть оказывается на свалках, что вызывает экологическую тревогу, особенно в отношении стеблей хлопка, которые также служат переносчиками вредителей, таких как *Pectinophora gossypiella* (розовый коробочный червь) [22]. Предполагаемая годовая глобальная доступность стеблей хлопчатника колеблется от 90 до 129 млн т, с ожиданием увеличения в будущем. Признавая важность экологической устойчивости, потенциал для переработки сельскохозяйственных отходов следует проиллюстрировать примером стеблей хлопчатника [9]. Традиционные методы утилизации – сжигание – становятся причиной не только выделения значительных количеств парниковых газов, но и потери ценных биохимических соединений, присущих стеблям хлопка [15, 18].

Использование стеблей хлопка в качестве сырья для изготовления бумаги и картона решает проблемы сельскохозяйственных отходов и дает возможность применить на практике модель циклической экономики: отходы вовлекаются в производство с получением материалов с высокой маржинальностью [10, 14, 23]. Это дает возможность увеличить доход от хлопковых культур и сделать их конкурентоспособными по сравнению с биотопливными культурами.

Еще одно преимущество недревесного сырья для развивающихся стран с ограниченными лесными ресурсами состоит в том, что недревесная биомасса

обеспечивает альтернативу импорту древесины, бумаги или целлюлозной массы [8, 13, 17]. Кроме того, в этих странах большая часть территории отведена под продовольственные культуры, что обуславливает значительное количество сельскохозяйственных отходов и развитие агропродовольственной промышленности [11, 12]. Недревесная биомасса повышает добавленную стоимость сельскохозяйственных культур за счет использования отходов для получения продукта, имеющего большой спрос – бумаги и картона [11, 16, 24].

В Туркменистане, например, производят бумагу из хлопчатника с использованием в качестве сырья ежегодно до 50 тыс. т соломы и 22 тыс. т хлопкового лinta [4].

Британская компания Fibe применяет сельскохозяйственные отходы – листья и стебли картофеля – для разработки экологически чистых волокон, подходящих для текстильной промышленности. Эти волокна легко разлагаются в природной среде и подлежат вторичной переработке. При производстве картофельного волокна потребляется на 99,7 % меньше воды и выделяется на 82 % меньше CO₂ по сравнению с традиционным хлопком, что снижает экологический след процесса. Такой подход к использованию сырья поддерживается ведущими модными брендами, заинтересованными во внедрении устойчивых материалов [20].

Таким образом, отходы хлопка могут служить дополнительным или альтернативным сырьем для получения картона, особенно в странах-производителях хлопка. При производстве картона основным сырьем выступают материалы с более жесткими и грубыми волокнами, такие как бурая древесная масса, полупеллюлоза, сульфатная целлюлоза и макулатура [3]. Вопросы применимости стеблей хлопка для производства картона требуют дополнительного исследования, т. к. информация по данному направлению фрагментарна.

Объекты и методы исследования

В качестве образцов были взяты 3 вида картона отечественных производителей и зарубежного: картон-лайнер из первичного волокна Архангельского целлюлозно-бумажного комбината (АЦБК); из макулатуры марки МС-5Б Каменской бумажно-картонной фабрики (Каменская БКФ) и предприятия «Маяк»; картон-лайнер из эвкалиптовой макулатуры одного из предприятий Бразилии. Масса 1 м² каждого из образцов составила 100 г.

Образцы картона-лайнера из стеблей хлопчатника для сравнения с промышленными образцами изготавливали в лабораторных условиях. Из стеблей хлопчатника выделяли целлюлозу, используя режим сульфатной варки, моделирующий получение полуфабриката высокого выхода, применяемого в производстве картонов, адаптированный для недревесных растений [5]. Полученная из хлопчатника целлюлоза отличалась следующими характеристиками: число Каппа – 99,59, разрывная длина – 4353 м, сопротивление продавливанию – 227 кПа, разрушающее усилие при сжатии кольца – 80 Н, сопротивление сжатию на коротком расстоянии – 2,43 кН/м [5].

Для оценки качества целлюлозу размалывали в мельнице PFI при концентрации массы 10 %, до достижения степени помола 30 °ШР в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 «Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям». Гидрофобизирующую проклейку проводили внутримас-

сно с использованием 1%-го раствора катионного крахмала с расходом 15 кг/т и алкилкетен-димерной дисперсии (АКД) – 10 кг/т. Масса образцов принята 100 г/м² для сравнения с промышленными образцами.

Лабораторные образцы изготавливали на комплексе для моделирования анизотропных волокнистых структур, т. е. в динамическом формующем устройстве, что позволило максимально приблизить их структуру к структуре промышленных образцов и соблюдать корректность сравнения показателей качества в 2 взаимно перпендикулярных направлениях – машинном и поперечном. Скорость на динамическом формующем устройстве была задана 1200 м/мин, сушку образцов производили в устройстве контактной сушки при температуре 93 °С. Размеры каждого из полученных образцов составили $\approx 245 \times 900$ мм.

Исследование физико-механических показателей композиционных материалов и подготовка к нему выполнены с применением аппаратов, приборов и методик, описанных в работе [2], в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57207–2008 «Картон для плоских слоев гофрированного картона», ГОСТ 12605–97 «Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба)», ГОСТ Р ИСО 9895–2013, ГОСТ 10711–97 «Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца», ГОСТ Р ИСО 2759–2017 «Картон. Метод определения сопротивления продавливанию», ГОСТ Р ИСО 9895-2013 «Бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами». Перед испытаниями образцы кондиционировали по ГОСТ Р ИСО 187–2012.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки структурных характеристик исследуемых образцов проведен микроскопический анализ волокна, позволивший визуализировать отличия морфологического строения волокон разной природы (рис. 1). Целлюлоза стеблей хлопчатника имеет признаки, характерные для целлюлозы из лиственных пород, в пробах обнаружены членики сосудов, соответствующие простому типу перфорации, аналогично породам эвкалипта, осины, дуба и т. п. (рис. 1, а). На стенках сосудов выявлены простые мелкие поры, располагающиеся продольными полосами. Отмечены также волокна либриформа, обладающие бумагообразующими свойствами, внешне схожие с волокнами эвкалипта (рис. 1 а, б). Зафиксированы тонкие удлиненные клетки с острыми окончаниями и щелевидными порами. В литературе диагностические признаки волокон стеблей хлопчатника не описаны [6, 7, 19, 21, 26]. По микрофотографиям видно, что картон Каменской БКФ (рис. 1, в) и предприятия «Маяк» (1, д) выполнены из вторичного волокна, о чем свидетельствует степень повреждения клеточной стенки целлюлозных волокон и большое количество загрязнений, приходящих с вторичным волокном: частички старого клея, смолы, краски и пр.

Оценка размерно-структурных характеристик выявила значительное отличие по основным геометрическим показателям волокон стеблей хлопчатника по сравнению с волокнистыми полуфабрикатами, традиционно используемыми в производстве картона на предприятиях РФ.

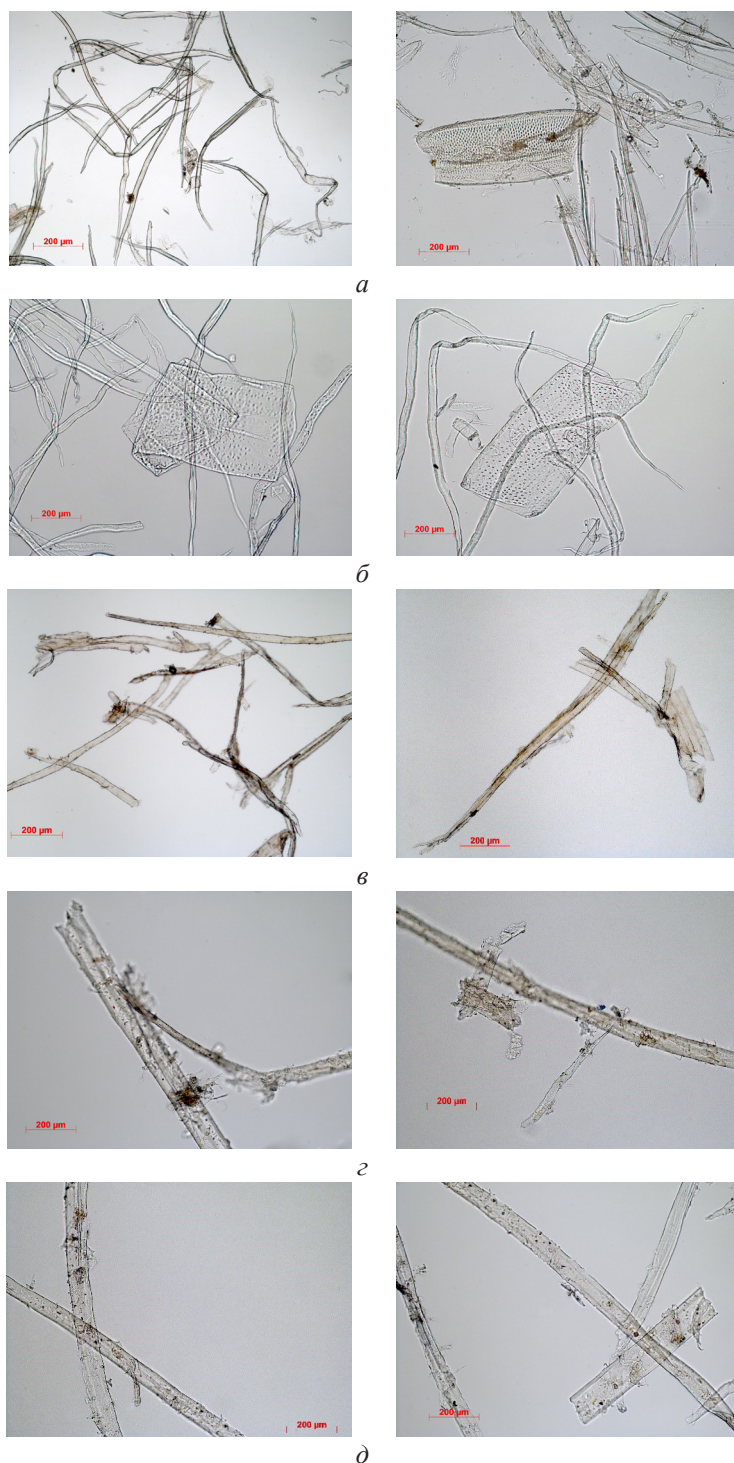


Рис. 1. Микрофотографии целлюлозных волокон в образцах картона разных производителей: *а* – из стеблей хлопчатника; *б* – из эвкалипта; *в* – АЦБК; *г* – Каменская БКФ; *д* – «Маяк»

Fig. 1. The micrographs of cellulose fibers in cardboard samples from different manufacturers: *a* – made from cotton stalks; *б* – made from eucalyptus; *в* – Arkhangelsk Pulp & Paper Mill; *г* – Kamenskaya Paper & Board Mill; *д* – «Mayak» Enterprise

Установлено, что целлюлоза стеблей хлопчатника по геометрическим параметрам ближе к эвкалиптовому волокну. Так, длина волокна составила 0,75 мм, что на 40 % ниже, чем у вторичного волокна в образцах картона предприятия «Маяк» и Каменской БКФ, и более чем в 2 раза меньше по сравнению со средней длиной волокна в композиции картона из первичной целлюлозы АЦБК. Обращает на себя внимание доля мелочи в исследуемых пробах. В образце картона из эвкалиптового волокна отмечено максимальное количество мелочи – 19,2 %, что закономерно вследствие исходной низкой длины эвкалиптового волокна и его неоднократной переработки. В образцах хлопчатника доля мелочи в 2 раза выше, чем в образце картона из первичной целлюлозы. Грубость волокон целлюлозы из стеблей хлопчатника низкая – в 2,5–3,0 раза меньше по сравнению с грубостью волокон вторичного сырья марки МС-5Б и первичной целлюлозы АЦБК при сопоставимых условиях варки полуфабрикатов высокого выхода для картона и числе Каппа [5]. Низкая грубость может стать причиной малого сопротивления сжатию короткого участка образца (табл. 1).

Таблица 1

**Исследование структурно-размерных показателей целлюлозных волокон
в образцах картона разных производителей**
**The investigation of structural and dimensional parameters of cellulose fibers
in cardboard samples from different manufacturers**

Образец	Средние			Грубость, мг/м	Средние			Доля мелочи, %
	длина, мм	ширина, мкм	фактор формы, %		угол излома, ...°	индекс излома, ...°	длина сегмента, мм	
Лабораторный	0,75	23,3	92,4	115	50,1	0,63	0,69	6,1
Каменской БКФ	1,29	28,2	88,7	312	49,1	0,85	1,16	4,9
Предприятия «Маяк»	1,32	28,6	88,9	249	49,4	0,78	1,18	4,2
АЦБК	1,66	30,1	89,1	409	50,5	0,55	1,44	3,1
Бразильского предприятия	0,66	26,2	88,9	170	49,6	1,80	0,56	19,2

Фракционное распределение волокон разной природы продемонстрировано на графике рис. 2. В образцах картона из целлюлозы стеблей хлопчатника и вторичного эвкалиптового волокна доля короткой фракции (до 0,5 мм) составляет 23 и 36 % соответственно, для картонов из макулатуры – не превышает 15 %, а из первичного волокна – не более 6 %. Пропорционально изменяется доля волокон длиной свыше 1,0 мм. Для образцов картона из целлюлозы стеблей хлопчатника показатель составляет 14 %, для картона из вторичного эвкалиптового волокна – 12 %, для картона МС-5Б – 40–43 %, для картона из первичной целлюлозы – более 50 %. Данный факт обосновывается высоким содержанием хвойной целлюлозы в картоне из первичной целлюлозы и в картоне марок МС-5Б. Такое распределение волокон по длине будет обосновывать физико-механические показатели. Длина волокна в первую очередь оказывает влияние на прочность при растяжении и разрывную длину, сопротивление продавливанию: чем выше длина волокна, тем выше эти характеристики.

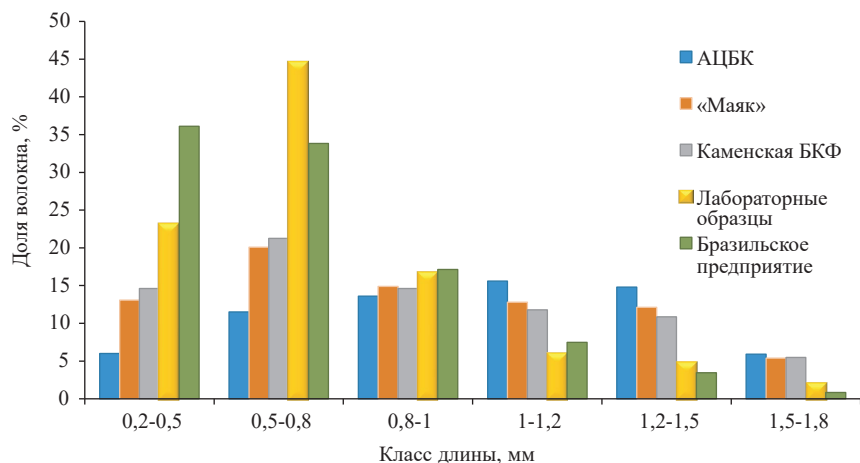


Рис. 2. Фракционное распределение волокон по длине

Fig. 2. The fractional distribution of fibers by length

Влияние вида и свойств волокна на физико-механические характеристики несимбатно (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические показатели картона разных производителей
The physical and mechanical parameters of cardboard from different manufacturers

Показатель	АЦБК		«Маяк»		Каменская БКФ		Лабораторные образцы		Бразильское предприятие	
	CD	MD	CD	MD	CD	MD	CD	MD	CD	MD
Сопротивление продавливанию, кПа	373*		211		182		175		194	
	404		246		202		202		207	
	390		230		189		185		203	
Сопротивление сжатию на коротком расстоянии, кН/м	1,8	3,7	2,1	3,0	2,0	3,0	1,0	2,5	2,1	2,1
	2,2	4,3	2,4	3,4	2,2	3,4	1,2	2,8	2,2	2,3
	2,0	4,2	2,3	3,2	2,0	3,2	1,1	2,6	2,1	2,2
Разрушающее усилие при сжатии кольца, Н	101	131	131	165	126	145	83	127	164	189
	109	145	152	188	136	166	94	145	174	196
	107	142	141	176	134	161	91	135	170	193
Число Кобба	23		37		22		22		31	
	24		39		23		23		32	
	24		38		23		23		31	
Толщина, мкм	144	138	149	147	143	146	196	198	161	163
	150	145	155	156	156	154	206	215	164	168
	148	143	153	152	151	152	201	211	163	167
Разрывная длина, м	3400	10 600	3850	6400	3100	5850	1900	6250	2800	4700
Прочность при растяжении, кН/м	3,33	10,60	4,13	6,73	3,13	6,00	1,80	6,33	2,90	4,90

Примечание: Показатели измерены в поперечном (CD) и машинном (MD) направлениях. *Для ячеек, содержащих 3 значения, верхнее является минимальным, среднее – максимальным, нижнее – средним.

Можно отметить, что у первичного волокна сопротивление продавливанию на 40–50 % выше по сравнению с другими видами картона. Данный факт

обусловлен большой длиной волокон первичной целлюлозы и способностью к межволоконному связеобразованию. Сопротивление сжатию на коротком расстоянии и разрывная длина у картонов из первичного волокна в 1,5–2,0 раза лучше ввиду того, что у первичного волокна более гибкие и эластичные волокна. Известно, что при увеличении количества циклов сушки и как следствие ороговения волокна теряют способность к образованию межволоконной связи.

Низкая грубость непосредственно оказывает влияние на сжатие: у картона из первичных волокон показатель на 24 % выше, чем у картонов из вторичного волокна, и на 38 % – чем у образцов из стеблей хлопчатника.

У картона из стеблей хлопчатника сопротивление продавливанию находится на одном уровне с картонами из вторичных волокон. Разрывная длина и прочность при растяжении лабораторного образца на 25 % выше, чем у картона из вторичного эвкалиптового волокна. Сравнение с картонами из вторичного волокна отечественного производства выявило, что показатели картона, изготовленного в лаборатории, находятся на одном уровне с продукцией предприятия «Маяк» и даже превосходят, если сравнивать с продукцией Каменской БКФ.

Поверхностная впитываемость воды при одностороннем смачивании по методу Кобба у картона из стеблей хлопчатника не уступает по абсолютным значениям картонам промышленного изготовления, что свидетельствует о хорошей способности к проклейке гидрофобизирующим клеем АКД, используемым в лаборатории.

Толщина картонов из стеблей хлопчатника выше, чем картонов из вторичного и первичного волокон. Это можно объяснить условиями их получения в лаборатории без возможности моделирования процессов прессования и каландрирования.

Значимая разница более чем в 3 раза по прочности при растяжении образцов картона лабораторного изготовления в поперечном и машинном направлениях объясняется условиями формования листа на лабораторном динамическом листоотливном аппарате, который создает сильно анизотропные структуры с ориентацией волокна в машинном направлении. Подтверждение данного факта прослеживается по прочности при растяжении. Коэффициент анизотропии, выраженный как отношение MD/CD (разрывная длина / прочность при растяжении) у лабораторных образцов из хлопчатника составил 3,3–3,5, в то время как у образцов из вторичного волокна – 1,6. Рекомендованный уровень анизотропии для тароупаковочных материалов сегодня находится в диапазоне 1,5–2,5. Таким образом, высокий коэффициент обуславливает сильную анизотропию и, как следствие, низкую прочность в поперечном направлении для образцов картона из стеблей хлопчатника. Необходимо отметить большой коэффициент анизотропии (3,1) при измерении прочности при растяжении образцов АЦБК, что не согласуется с требованиями стандарта для плоских слоев гофрированного картона, в котором показатели качества нормируются в поперечном направлении.

Важно отметить, что кроме прочностных свойств для всех типов тары упаковочных картонов имеют особое значение деформационные характеристики, прежде всего способность к удлинению, что связано с условиями эксплуатации. Коробки из гофрированного картона подвергаются, в частно-

сти, растягивающим и изгибающим нагрузкам. Зависимости, продемонстрированные на рис. 3, помогают предсказывать поведение картона в реальных условиях эксплуатации. Из диаграмм растяжения видно, что образцы картона из стеблей хлопчатника имеют высокую способность к удлинению, как в машинном, так и в поперечном направлениях. Таким образом, можно предположить, что данные образцы картона будут пригодны для переработки на гофроагрегатах, где происходит удлинение бумаги при формировании гофр и коробок из гофрированного картона при нанесении на них линий рилевки и биговки.

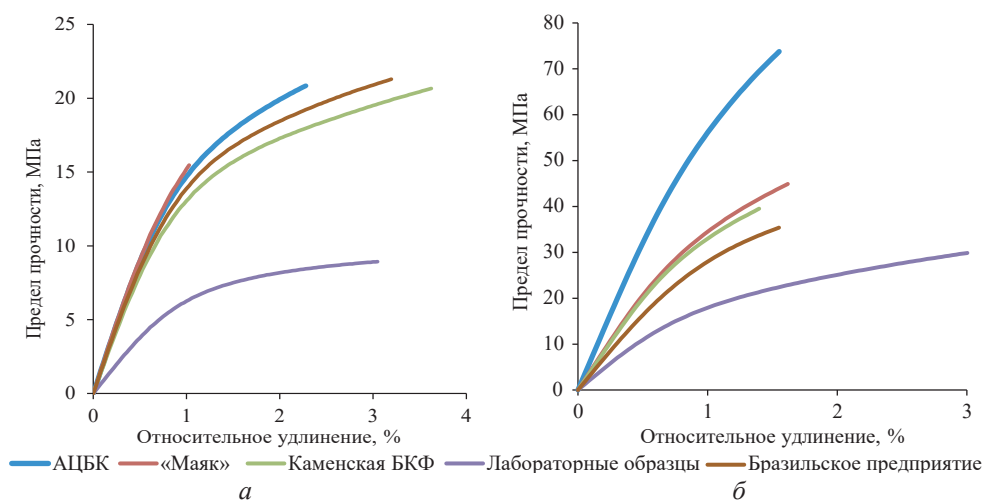


Рис. 3. Диаграммы растяжения в поперечном (а) и машинном (б) направлениях приложения нагрузки

Fig. 3. The stretching diagrams in the transverse (a) and machine (б) directions of the load application

Заключение

Изучение морфологического строения и структурно-размерных показателей волокон целлюлозы из стеблей хлопчатника позволило установить внешнюю схожесть морфологического строения волокон либриформа стеблей хлопчатника, обладающих бумагообразующими свойствами, с эвкалиптовой целлюлозой. Так, на стенках сосудов целлюлозы из стеблей хлопчатника присутствуют простые мелкие поры, располагающиеся продольными полосами. Эта целлюлоза по геометрическим параметрам также сопоставима с эвкалиптовой целлюлозой. Длина волокна целлюлозы из стеблей хлопчатника составила 0,75 мм, а у вторичных волокон из эвкалипта – 0,66 мм.

Морфологическое строение и геометрические размеры целлюлозы из стеблей хлопчатника обосновывают качество изготовленных образцов картона: повышенную способность к удлинению, удовлетворительную прочность при растяжении и сжатии кольца.

Ввиду экологической и экономической целесообразности переработки недревесного сырья технология производства картона из стеблей хлопчатника представляет собой важный шаг к созданию более устойчивых и конкурентоспособных материалов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование переработки и повышение эксплуатационных характери-

стик продукта для расширения его промышленного применения. Проведенные исследования показали рентабельность получения целлюлозы высокого выхода из стеблей хлопчатника с ее последующим применением для изготовления та- роупаковочных видов бумаги и картона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Васильева Е.Р. Современное состояние мирового рынка хлопка и перспективы развития хлопководства в Узбекистане // Гуманитарная миссия обществознания на пороге нового индустриального общества: сб. ст. Междунар. науч. форума. Уфа: Ин-т стратегич. исслед. Респ. Башкортостан, 2020. С. 502–506.

Vasilyeva E.R. Current State of the World Cotton Market and Prospects for the Development of Cotton Production in Uzbekistan. *Humanitarian Mission of Social Science on the Threshold of a New Industrial Society: Collection of Articles from the International Scientific Forum*. Ufa: Institute for Strategic Studies of the Republic of Bashkortostan, 2020, pp. 502–506. (In Russ.).

2. Гурьев А.В., Дубовый В.К., Комаров В.И., Казаков Я.В. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона. СПб.: Политехн. ун-т, 2006. 229 с.

Gur'ev A.V., Duboviy V.K., Komarov V.I., Kazakov Ya.V. *Laboratory Practical Training on Paper and Cardboard Technology*. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2006. 229 p. (In Russ.).

3. Джанбекова Л.Р. Особенности волокнистого сырья, используемого в производстве картонов // Вестн. Казанск. технол. ун-та. 2010. № 11. С. 562–564.

Dzhanbekova L.R. Features of Fibrous Raw Materials Used in Cardboard Production. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2010, no. 11, pp. 562–564. (In Russ.).

4. Отраслевой информационный портал. Режим доступа: https://sbo-paper.ru/news/archive_rus/5448/ (дата обращения: 28.10.25).

Industry Information Portal. Available at: https://sbo-paper.ru/news/archive_rus/5448/ (accessed 28.10.25). (In Russ.).

5. Содииков И.С., Щербак Н.В. Получение волокнистого полуфабриката из стеблей хлопчатника для упаковочных видов бумаг // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. им. проф. В.И. Комарова. Архангельск: САФУ, 2023. С. 286–289.

Sodikov I.S., Shcherbak N.V. Production of Fibrous Semi-Finished Products from Cotton Stems for Packaging Paper. *Problemy mekhaniki tsellulozno-bumazhnykh materialov* = The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference named after Prof. V.I. Komarov. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University, 2023, pp. 286–289. (In Russ.).

6. Чавчавадзе Е.С., Брянцева З.Е., Гончарова Е.В., Нехлюдова М.В., Горбачева Г.Н., Коржицкая З.А. Атлас древесины и волокон для бумаги / ЦНИИ бумаги; под ред. Е.С. Чавчавадзе. М.: Ключ, 1992. 329 с.

Chavchavadze E.S., Bryantseva Z.E., Goncharova E.V., Nekhlyudova M.V., Gorbacheva G.N., Korzhitskaya Z.A. *Atlas of Wood and Paper Fibers*. Central Research Institute of Paper, ed. by E.S. Chavchavadze. Moscow, Klyuch Publ., 1992. 329 p. (In Russ.).

7. Шлейхер А.И., Шафрин А.Н., Соколов А.Ф., Нармухамедов Н.Н., Нерозин А.Е., Казиев М.З., Панфилова Л.А., Колдаев А.А., Черникова А.Н., Автономов А.И., Автономов В.А. Хлопководство. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1983. 334 с.

Shleikher A.I., Shafrin A.N., Sokolov A.F., Narmukhamedov N.N., Nerozin A.E., Kaziev M.Z., Panfilova L.A., Koldaev A.A., Chernikova A.N., Avtonomov A.I., Avtonomov V.A. *Cotton Growing*: 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Kolos Publ., 1983. 334 p. (In Russ.).

8. Biyada S., Merzouki M., Urbonavičius J. New Resources for Sustainable Thermal Insulation Using Textile and Agricultural Waste in a New Circular Economy Approach. *Processes*, 2023, vol. 11, no. 9, art. no. 2683. <https://doi.org/10.3390/pr11092683>
9. Ding Y., Pang Z., Lan K., Yao Y., Panzarasa G., Xu L., Ricco M.L., Rammer D.R., Zhu J.Y., Hu M., Pan X., Li T., Burgert I., Hu L. Emerging Engineered Wood for Building Applications. *Chemical Reviews*, 2023, vol. 123, iss. 5, pp. 1843–1888. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00450>
10. Duque-Acevedo M., Lancellotti I., Andreola F., Barbieri L., Belmonte-Ureña L.J., Camacho-Ferre F. Management of Agricultural Waste Biomass as Raw Material for the Construction Sector: an Analysis of Sustainable and Circular Alternatives. *Environmental Sciences Europe*, 2022, vol. 34, art. no. 70. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00655-7>
11. Eugenio M.E., Ibarra D., Martín-Sampedro R., Espinosa E., Bascón I., Rodríguez A. Alternative Raw Materials for Pulp and Paper Production in the Concept of a Lignocellulosic Biorefinery. *Cellulose*. IntechOpen Publ., 2019, pp. 1–26. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90041>
12. Fahmy Y., Fahmy T.Y.A., Mobarak F., El-Sakhawy M., Fadl M.H. Agricultural Residues (Wastes) for Manufacture of Paper, Board, and Miscellaneous Products: Background Overview and Future Prospects. *International Journal of ChemTech Research*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 424–448.
13. Ibrahim R.A., Inan H., Fahim I.S. A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Three Cotton Stalk Waste Sustainable Applications. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, art. no. 20781. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47817-y>
14. Jiménez L., Rodríguez A. Valorization of Agricultural Residues by Fractionation of Their Components. *The Open Agriculture Journal*, 2010, vol. 4, pp. 125–134. <https://doi.org/10.2174/1874331501004010125>
15. Kanipandian N., Thirumurugan R. A Feasible Approach to Phyto-Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles Using Industrial Crop *Gossypium hirsutum* (Cotton) Extract as Stabilizing Agent and Assessment of its *in vitro* Biomedical Potential. *Industrial Crops and Products*, 2014, vol. 55, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.042>
16. Li H., Sun H., He Z. *Achnatherum inebrians* Straw as a Potential Raw Material for Pulp and Paper Production. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 101, pp. 193–196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.061>
17. Maxwell J.M., Gordon S.G., Huson M.G. Internal Structure of Mature and Immature Cotton Fibers Revealed by Scanning Probe Microscopy. *Textile Research Journal*, 2003, vol. 73, iss. 11, pp. 1005–1012. <https://doi.org/10.1177/004051750307301111>
18. Moore G. *Non Wood Fiber Applications in Papermaking*. UK, Surrey, Pira International, 1996. 208 p.
19. Pandirwar A.P., Khadatkar A., Mehta C.R., Majumdar G., Idapuganti R., Mageshwaran V., Shirale A.O. Technological Advancement in Harvesting of Cotton Stalks to Establish Sustainable Raw Material Supply Chain for Industrial Applications: a Review. *BioEnergy Research*, 2023, vol. 16, pp. 741–760. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10520-3>
20. Press Release 1: Fibe Accelerates Sustainable Fashion Possibilities with Investment Funding and Potato Yarn Breakthrough. *Fibe*. Available at: <https://www.fibe.uk/media> (accessed 31.10.24).
21. Rehman A., Farooq M. Morphology, Physiology and Ecology of Cotton. *Cotton Production*, 2019, chapt. 2, pp. 23–46. <https://doi.org/10.1002/9781119385523.ch2>
22. Rizal S., Abdul Khalil H.P.S., Oyekanmi A.A., Gideon O.N., Abdullah C.K., Yahya E.B., Alfatah T., Sabaruddin F.A., Rahman A.A. Cotton Wastes Functionalized Biomaterials from Micro to Nano: A Cleaner Approach for a Sustainable Environmental Application. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 7, art. no. 1006. <https://doi.org/10.3390/polym13071006>

23. Savio L., Pennacchio R., Patrucco A., Manni V., Bosia D. Natural Fibre Insulation Materials: Use of Textile and Agri-Food Waste in a Circular Economy Perspective. *Materials Circular Economy*, 2022, vol. 4, art. no. 6. <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00043-1>

24. Sigoillot C., Camarero S., Vidal T., Record E., Asther M., Pérez-Boada M., Martínez M.J., Sigoillot J.-C., Asther M., Colom J.F., Martínez A.T. Comparison of Different Fungal Enzymes for Bleaching High-Quality Paper Pulps. *Journal of Biotechnology*, 2005, vol. 115, iss. 4, pp. 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.09.006>

25. Soni B., Hassan E.B., Mahmoud B. Chemical Isolation and Characterization of Different Cellulose Nanofibers from Cotton Stalks. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 134, pp. 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.031>

26. Suomela J., Viljanen M., Svedström K., Wright K., Lipkin S. Research Methods for Heritage Cotton Fibres: Case Studies from Archaeological and Historical Finds in a Finnish Context. *Heritage Science*, 2023, vol. 11, art. no. 175. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01022-2>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest