

4 Свид. № 2001610526. Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (KOMPLEX). / Я.В. Казаков, В.И. Комаров; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ (RU). – № 2001610250; заявл. 11.03.2001; опубл. 10.05.2001, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

5 Казаков Я.В., Романова А.Н., Чухчин Д.Г. Влияние анизотропии ориентации волокна на деформационные свойства бумаги / В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. (Архангельск, 9–11 сентября 2015 г.) // Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2015. С. 298–303.

УДК 676.2.004.12

А.С. Смолин, проф., д-р техн. наук  
[smolin@gturp.spb.ru](mailto:smolin@gturp.spb.ru) (СПбГУПТиД, г. Санкт-Петербург)

### **ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ КАРТОНА-ЛАЙНЕРА**

Специалистам, работающим в области тароупаковочных материалов на основе растительных волокон, хорошо известно, что прочность и жесткость материалов – это различные понятия. Прочность материала определяется напряжением, необходимым для того, чтобы этот материал разрушить. При оценке качества целлюлозно-бумажных материалов наиболее значимым является испытание на растяжение.

При этом допускается определение прочности по трем связанным между собой, различным характеристикам: разрушающему усилию  $P$ , в ньютонах (Н), разрывной длины  $L$  в метрах (м), пределу прочности при растяжении  $\sigma$ , в мегапаскалях (МПа). Показатели  $L$  и  $\sigma$  являются расчетными, зависящими от массы  $1\text{ м}^2$  и площади поперечного сечения образца бумаги или картона. Для потребителя продукции важнее разрушающее усилие  $P$ , характеризующее прочность конкретного вида бумаги или картона. Для картона-лайнера в стандартах и технических условиях чаще всего используется показатель сопротивления продавливанию  $P$ , в килопаскалях (кПа). Абсолютное сопротивление продавливанию также характеризует прочность конкретного вида продукции и, в зависимости от различных технологических факторов, изменяется симбатно с разрушающим усилием. Кроме того, сопротивление продавливанию в большей степени, чем нагрузка при растяжении, соответствует реальным воздействиям на картон-лайнер в процессе эксплуатации.

Жесткость определяет реологические свойства материала, относящиеся к линейно-упругим деформациям. Жесткость картона-лайнера относится к его деформационным характеристикам наряду с разрушающим усилием при сжатии кольца RCT, (H) и сопротивлением сжатия короткого участка образца SCT (кН/м). [1]

Наиболее значимой характеристикой картона-лайнера, обеспечивающей во многом каркасность и штабелируемость гофроящика, является жесткость при изгибе. Гофрокартон и ящики из него при внешних нагрузках испытывают главным образом деформацию изгиба боковых стенок ящика, проявляющегося в виде вертикальных и горизонтальных линий излома, изгиба стенок, деформации углов между вертикальными стенками. Чем выше жесткость при изгибе, тем выше каркасность ящика и способность сопротивляться вышеуказанным деформациям [2].

Жесткость при изгибе определяется произведением модуля упругости материала  $E$  и момента инерции  $I$ . В случае прямоугольного сечения, как у картона

$$I = \frac{b\delta^3}{12}, \quad (1)$$

где  $b$  – ширина образца,  $\delta$  - толщина образца.

Модуль упругости  $E$  определяется из кривой зависимости «напряжение-деформация» ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ), получаемой путем обработки диаграммы «нагрузка-удлинение» ( $P - \Delta l$ ) при статистических испытаниях на растяжение [1]. Единица измерения  $E$  – мегапаскаль (МПа). Жесткость при изгибе

$$EI = E \cdot \frac{b\delta^3}{12}, \quad (\text{МН}\cdot\text{см}^2) \quad (2)$$

Практически чаще всего  $EI$  определяется на приборе ЖБИ – 1 и модуль упругости находится из формулы (3)

$$E = \frac{EI \cdot 12}{b\delta^3}, \quad (\text{МПа}) \quad (3)$$

Для производства картона-лайнера на основе первичных волокнистых полуфабрикатов (крафт-лайнера) используется, как правило сосновая небеленая сульфатная целлюлоза высокого выхода (54–56%) с содержанием лигнина 10–12%. Степень делигнификации такой целлюлозы 52–55 ед. Каппа, и подобный полуфабрикат определяется как жесткая целлюлоза. Ранее степень делигнификации оценивалась напрямую в единицах жесткости ( $^0$  Бьеркмана). Очевидно, следует предполагать, что совпадение терминов (жесткость целлюлозы – жест-

кость волокон – жесткость картона – жесткость гофроящика) не может быть случайным и характеризует определенные свойства материала.

Волокна, состоящие из целлюлозы с высоким содержанием лигнина, безусловно, будут более жесткими, менее гибкими и пластичными, чем волокна из целлюлозы нормального выхода. Лигнин является трехмерным сетчатым термопластичным полимером. Пластификация лигнина – переход из застеклованного в высокоэластическое состояние – происходит при температуре свыше 130<sup>0</sup>С (во влажных образцах – от 80 до 130<sup>0</sup>С) [3]. Это означает, что в лигнофицированных волокнах (сульфатная целлюлоза высокого выхода, нейтрально-сульфитная полуцеллюлоза) лигнин в процессе производства картона находится в застеклованном состоянии, что и определяет жесткость таких волокон и значительно снижает их способность к межволоконному связеобразованию.

**Таблица 1 – Влияние степени делигнификации сульфатной небеленой хвойной целлюлозы на ее свойства [1]**

Степень делигнификации, ед. Каппа	39,1	48,0	51,8	58,0
Нулевая разрывная длина $L_0$ , м	1150	1260	3260	2640
Сопротивление продавливанию, $\Pi$ , кПа	156	236	341	238
Модуль упругости, $E$ , МПа	2540	3310	5000	4150
Жесткость при изгибе, $EI$ , мН·см <sup>2</sup>	96	109	144	124

Представленные в таблице 1 образцы в соответствии со степенью делигнификации являются жесткой сульфатной небеленой целлюлозой и целлюлозой высокого выхода ЦВВ (выход образцов 50–56%). Определялись показатели неразмолотых образцов.

Нулевая разрывная длина  $L_0$  является косвенной характеристикой прочности волокон. Чем мягче условия варки и, соответственно, выше число Каппа, менее разрушены волокна целлюлозы, что и показано в таблице 1. Снижение  $L_0$  для образца с числом Каппа 58 связано с необходимостью полумассного размола для ЦВВ.

Модуль упругости  $E$  и сопротивление продавливанию  $\Pi$  отражают прочность материала, которая зависит от прочности волокон и межволоконных связей. В отсутствии размола межволоконные связи

слаборазвиты, поэтому показатели  $E$  и  $\Pi$  определяются прочностью волокон. Жесткость при изгибе  $EI$  связана с величиной модуля упругости  $E$  [1].

Таким образом, исходя из роли лигнина в формировании прочности и жесткости лигнофицированных волокон и данных таблицы 1, следует считать установленным, что жесткость целлюлозы (химический показатель), жесткость и прочность волокон (физико-химическая характеристика) во многом определяют свойства образцов бумаги и картона (физико-механические показатели).

В таблице 2 представлено изменение основных показателей для образца ЦВВ (число Каппа 57) в зависимости от степени помола.

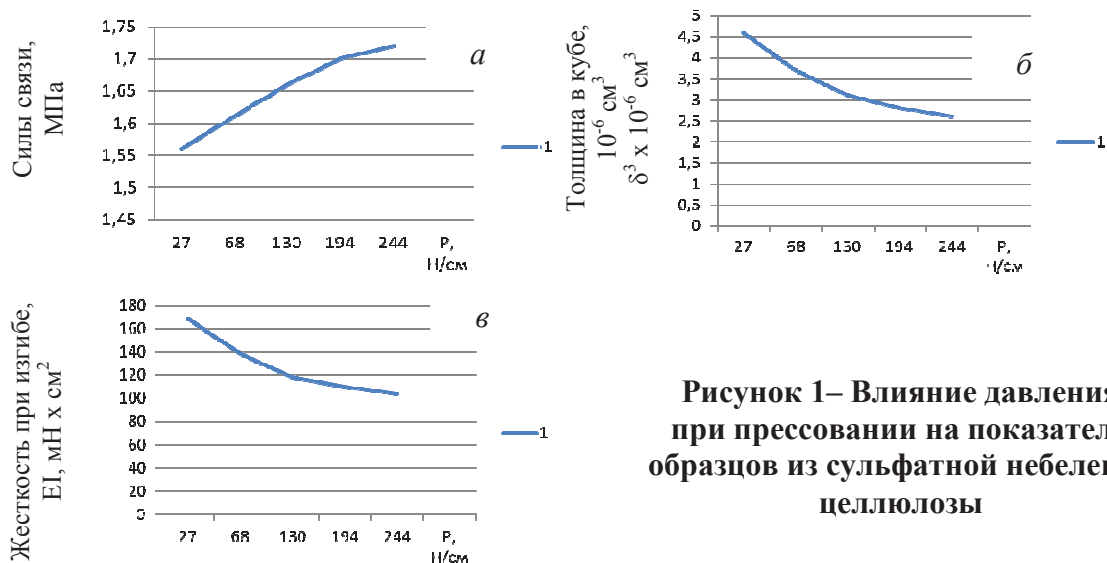
Увеличенное значение нулевой разрывной длины по сравнению с таблицей 1 связано с использованием стандартных, а не специальных зажимов. Из данных таблицы 2 хорошо прослеживается влияние на модуль упругости и сопротивление продавливанию сил связи (в отличие от таблицы 1), а также влияние пухлости (т.е. толщины) на жесткость при изгибе.

**Таблица 2 – Влияние процесса размола ЦВВ на прочностные и деформационные (жесткостные) показатели [1]**

Степень помола ° ШР	13	17	20	25	30
Нулевая разрывная длина, $L_0$ , м	7150	10290	11090	9800	9950
Пухлость $V$ , $\text{см}^3/\text{г}$	2,58	1,54	1,43	1,45	1,31
Силы связей $F_{\text{св}}$ , МПа	0,154	0,994	1,203	1,351	1,653
Сопротивление продавливанию $\Pi$ , кПа	26	351	412	396	475
Модуль упругости $E$ , МПа	1320	5600	7910	6150	9830
Жесткость, $EI$ , $\text{мН}\cdot\text{см}^2$	96	104	83	76	77

Так, жесткость при изгибе неразмолотой целлюлозы при низком модуле упругости достаточно велика за счет толщины образца (см. формулы (1), (2)). Данные таблицы 2 также показывают, что оптимальным для прочности является степень помола 25–30°ШР, для жесткости – 17–20°ШР. Как правило, выбирают среднее, но это отличная иллюстрация различия в понятиях прочности и жесткости картона-лайнера.

Влияние линейного давления в прессовой части КДМ на прочность и жесткость образцов из сульфатной небеленой целлюлозы представлено на рис. 1.



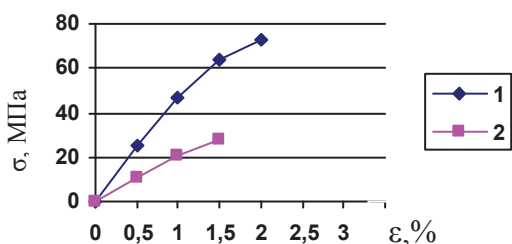
**Рисунок 1– Влияние давления при прессовании на показатели образцов из сульфатной небеленой целлюлозы**

Показано, что незначительно увеличиваются силы связи (лигнин мешает) и значительно снижается жесткость, главным образом из-за снижения толщины [4]. При этом хорошо известно, что прочность (сопротивление продавливанию) закономерно возрастает с увеличением интенсивности прессования. Практикам-бумажникам хорошо известно, что если есть запас по сопротивлению продавливанию, то для увеличения сопротивления плоскостному сжатию (для флютинга) и росту сжатия по кольцу и на коротком расстоянии следует немного разгрузить мокрые пресса.

В настоящее время в секторе гофро материалов российской ЦБП объемы производства крафт-лайнера и тест-лайнера практически одинаковы. При этом они достаточно различны композиционно. Крафт-лайнер, в зависимости от предприятия, содержит 60-100 % жесткой сульфатной целлюлозы и 0-40% нейтрально-сульфитной лиственной полуцеллюлозы. Тест-лайнер содержит в основном 100% ящичной макулатуры, в редких случаях до 20% свежего волокна сульфатной небеленой хвойной целлюлозы либо химико-термомеханической массы. Ящичная макулатура МС-5Б имеет сложный состав, однако в основе непременно волокна сульфатной хвойной небеленой целлюлозы и полуцеллюлозы, нейтрально-сульфитной лиственной либо бисульфитной хвойной, так как в состав ящичной макулатуры помимо картона-лайнера входит флютинг, имеющий свои композиционные особенности. В связи с этим в макулатуре МС-5Б больше полуфабрикатов высокого выхода (полуцеллюлозы), чем в композиции крафт-лайнера. По-

этому в тест-лайнере волокна более лигнофицированные, однако, следует учитывать явление цикличности вторичных волокон.

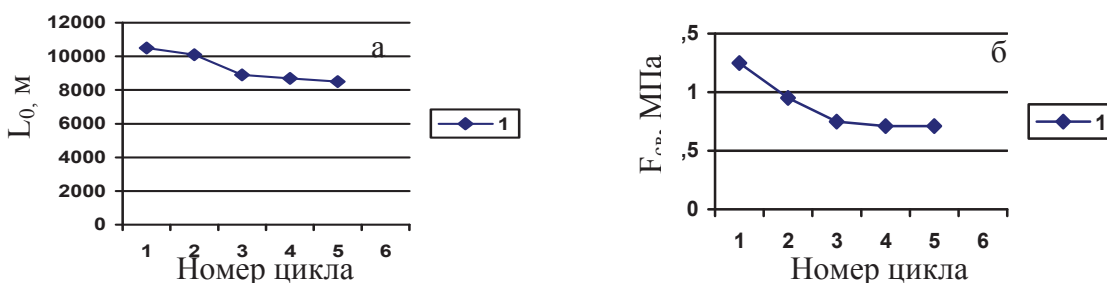
В процессе нескольких циклов переработки волокна деструктируются, меняется их гидратация, пластичность, способность к межволоконному связеобразованию. Таким образом, существует необходимость оценки формирования показателей прочности и жесткости для тест-лайнера на основе вторичного волокна.



**Рисунок 2** – Кривые зависимости «σ- ε»  
1- СФА хв. н/ б;  
2 - макулатура МС-5

На рис. 2 представлены кривые зависимости «напряжение-деформация» для образцов крафт-лайнера и тест-лайнера. Налицо существенное различие по модулю упругости в пользу крафт-лайнера [5].

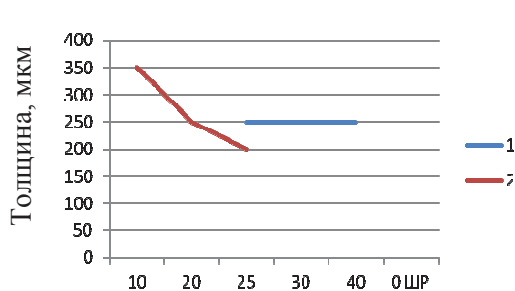
На рис. 3 (а, б) показано влияние цикличности использования вторичного волокна на основе сульфатной хвойной небеленой целлюлозы на фундаментальные показатели – прочность волокон, выраженную через  $L_0$  и силы связи, что характеризует существенные различия в формировании показателей материалов из свежего и вторичного волокна [6].



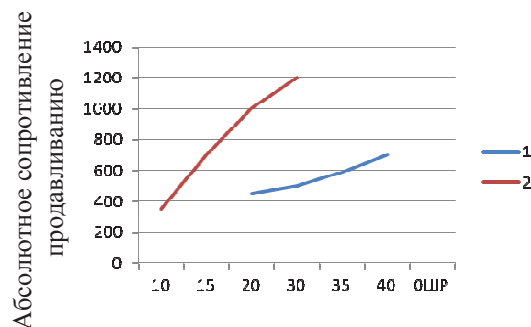
**Рисунок 3** – Влияние количества циклов повторной переработки на нулевую разрывную длину ( $L_0$ , м) (а) и силы связи ( $F_{св}$ , МПа) между волокнами (б)

На рис. 4–6 представлены изменения показателей прочности и жесткости в зависимости от степени помола для макулатуры МС-5Б и сульфатной хвойной небеленой целлюлозы. Анализ кривых показывает существенное различие в формировании показателей – гораздо более высокий уровень прочности сульфатной небеленой целлюлозы по сравнению с макулатурой МС-5Б что естественно, и практически противоположное развитие жесткости при изгибе от степени помола, а такие вполне сравнимые цифровые значения этого показателя. Иными способами, жесткие макулатурные волокна обеспечивают жесткость

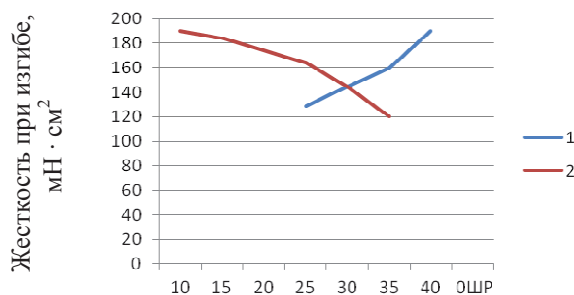
картона, но значительно уступают целлюлозным волокнам по прочности волокон и межволоконному связеобразованию.



**Рисунок 4 – Влияние степени помола на толщину: 1 –сульфатная хвойная небеленая целлюлоза; 2 – макулатура МС-5Б**



**Рисунок 5 – Влияние степени помола на абсолютное сопротивление продавливанию: 1 –сульфатная хвойная небеленая целлюлоза; 2 – макулатура МС-5Б**



**Рисунок 6 – Влияние степени помола на жесткость при изгибе: 1 –сульфатная хвойная небеленая целлюлоза; 2 – макулатура МС-5Б**

### Заключение

Исходя из вышеизложенного, представляется возможность сформулировать следующие выводы.

1. Прослеживается достаточно тесная связь между жесткостью целлюлозы, жесткостью волокон, жесткостью картона-лайнера и жесткостью гофрокартона и гофротары, во многом определяемая наличием лигнина в материалах.

2. Установлены существенные различия в формировании показателей прочности и деформативности (жесткости) картона-лайнера и разноплановость изменения этих показателей в зависимости от основных технологических процессов.

3. Сравнительный анализ показателей крафт-лайнера и тест-лайнера подтверждает значительное преимущество крафт-лайнера по



прочности и близкие значения жесткости крафт-лайнера и тест-лайнера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов /В.И. Комаров – Архангельск: АГТУ, 2002. – 440 с.

2 Исаев Б.П. Прогнозирование жесткости гофрощиков при эксплуатации / Б.П. Исаев. // Packaging. 2009. – №3 (22). – С. 37–41.

3 Азаров В.И. Химия древесины и синтетических полимеров /В.И. Азаров, А.В. Буров, А.В. Оболенская – Санкт-Петербург: «Лань», 2010. – 627с.

4 Комаров В.И. Механика деформирования целлюлозных тароупаковочных материалов В.И. Комаров, А.В. Гурьев, В.П. Елькин – Архангельск: АГТУ, 2002. – 170 с.

5 Комаров В.И. Формирование свойств тест-лайнера в процессе производства / В.И. Комаров, М.Н. Яблочкин, Д.А. Дулькин, И.Н. Ковернинский – Архангельск: АГТУ, 2005. – 161 с.

6 Кулешов А.В. Изменение основных характеристик целлюлозных волокон, при их циклическом использовании/А.В. Кулешов, А.С. Смолин, В.И. Комаров, Я.В. Казаков // Целлюлоза, бумага, картон. 2008. – №3 – С. 48–50.

УДК 676.1.054.1

Д.В. Иванов<sup>1</sup> [ivanov.dv.sib@mail.ru](mailto:ivanov.dv.sib@mail.ru);

Н.А. Петрушева<sup>2</sup>, доц., канд. техн. наук [petrusheva-n@mail.ru](mailto:petrusheva-n@mail.ru);

Ю.Д. Алашкевич<sup>3</sup>, член-корр. РАО, проф., д-р техн. наук

(<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск; <sup>2</sup>филиал СибГАУ в г. Лесосибирске;

<sup>3</sup>СибГАУ, г. Красноярск, Россия)

### **ВЛИЯНИЕ РИСУНКА ГАРНИТУРЫ НА СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ ПЛИТ С ПОНИЖЕННОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТЬЮ**

Теоретические и экспериментальные исследования по вопросам снижения пожарной опасности древесных плит, ведутся в нашей стране и за рубежом уже на протяжении шестидесяти лет [1 - 4]. За это время были разработаны и предложены различные способы снижения пожарной опасности древесноволокнистых плит [1, 3, 4], наиболее эффективным из которых является направленный на равномер-