

УДК 676.017.42

В. И. КОМАРОВ

Архангельский государственный технический университет

ЖЕСТКОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ И ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Изложены сведения об используемых в настоящее время методах определения жесткости при изгибе целлюлозно-бумажных материалов; расчета жесткости отдельных слоев многослойного картона и толщины слоя материалов, в котором возникает предельное состояние при сжатии в плоскости листа. Рассмотрено влияние основных технологических факторов на свойства получаемого материала.

Information of current methods of pulp and paper materials' flexural rigidity determination as well as calculation of some plies rigidity of multiply board and thickness of materials ply, in which ultimate condition at compression in the plane of a sheet occurs, has been presented. Influence of the main technological factors on the properties of a material obtained has been considered.

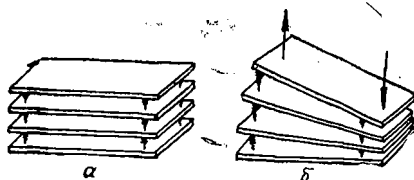
Целлюлозно-бумажные материалы при дальнейшей переработке или использовании в качестве конечного продукта должны обладать жесткостью при изгибе. В первую очередь, это относится к печатным видам бумаги; картону для производства тары и упаковки (особенно для упаковки жидких продуктов, так как упаковочные машины требуют высокой жесткости и стабильности его размеров); мешочной бумаге; некоторым видам высокопрочной бумаги; специальным видам бумаги. Эта весьма важная характеристика во многих случаях не регламентируется отечественными стандартами, что является отступлением от системного подхода к оценке механического поведения материала [36].

Изгиб — это деформация тела под действием внешних сил или моментов, сопровождающаяся изменением кривизны деформируемого объекта. Различают несколько видов изгиба: чистый, поперечный, косой, продольный. В дальнейшем нас будет интересовать самый распространенный вид — поперечный. Для того, чтобы ясно представить деформацию изгиба и ее связь с другими видами деформации, С. Э. Хайкин [43] предлагает использовать модель, представленную на рис. 1. Изгиб в данном случае моделируется наклоном верхней пластинки. При этом расстояния между соседними пластинками в разных местах изменяются по-разному: с одной стороны они увеличиваются, с другой — уменьшаются. Таким образом, деформация изгиба сводится к растяжениям и сжатиям, различным в различных частях тела, т. е. представляет неоднородный процесс.

Жесткость при изгибе изотропного материала определяется произведением модуля упругости материала E и момента инерции поперечного сечения образца I . В случае прямоугольного сечения (как у бумаги)

$$I = b\delta^3/12, \quad (1)$$

Рис. 1. Модель деформации изгиба без приложения (а) и с приложением нагрузки (б)



где b и δ — ширина и толщина образца.

Таким образом, жесткость при изгибе является комплексной характеристикой:

$$EI = E(b\delta^3/12). \quad (2)$$

Отметим, что E характеризует способность бумажного листа сопротивляться деформированию в зависимости от свойств этого листа, которые определяются природой исходных материалов и технологическими факторами производства. Величина I зависит от геометрических размеров поперечного сечения образца.

Для определения жесткости бумаги и картона при изгибе используют большое количество методов с применением приборов различных конструкций. В работе [18] эти методы условно разделены на следующие группы.

1. Статические или динамические методы при испытании образцов на растяжение.

2. Непосредственное испытание образцов на изгиб, который осуществляют под действием собственного веса; собственного веса совместно с сосредоточенной нагрузкой; специальной нагрузки без действия собственного веса.

3. Определение жесткости пространственно-изогнутых образцов (кольца, дуги).

4. Специальные методы.

Каждая группа методов имеет свои достоинства и недостатки.

К первой группе относится широко используемый в зарубежной практике метод определения жесткости по Кларку [9]. В этом случае жесткость S определяется по уравнению

$$S = EI/bW = E\delta^3/12W. \quad (3)$$

Здесь W — масса 1 м^2 образца.

Существует несколько способов определения δ и E (модуля Юнга), необходимых для вычисления жесткости по уравнению (3).

При рассмотрении механических свойств бумаги предметом дискуссии чаще всего становится толщина и рассчитываемая с ее применением плотность бумаги. Важнейшее значение имеет эта характеристика и в случае определения жесткости. Авторы работы [9] справедливо утверждают, что стандартная методика измерения толщины с использованием микрометра не обладает достаточной надежностью, так как в этом случае измеряется максимальная толщина ограниченной площади. Ими был проведен эксперимент по измерению толщины образцов лабораторного изготовления с массой 1 м^2 15...125 г стандартным способом и способом плавучести в ртути (рис. 2). Показано, что значения δ полученные стандартным способом, больше. По мере увеличения массы 1 м^2 образцов возрастает расхождение между величинами δ , измеренными разными способами. У отливок массой 125 г/м² это расхождение достигает 38 мкм, у образцов бумаги машинной выработки — 4...6 мкм. Очевидно, что измерение способом плавучести (вытеснения) в ртути дает результат, приближающийся к истинной,

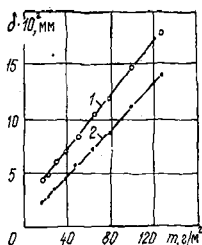


Рис. 2. Толщина бумаги δ , измеренная стандартным методом (1) и методом плавучести в ртути (2) (m — масса 1 м^2 образца)

усредненной по площади образца, δ . Однако высокая токсичность ртути не позволяет широко использовать этот метод на практике.

Значения модуля упругости, измеренные статическими и динамическими методами, в случае истинно упругого тела должны совпадать. Для не вполне упругих материалов величина модуля упругости будет зависеть от метода измерения. Автором данного обзора была проведена работа по количественной оценке различия величин модуля упругости, определенного динамическими и статическими методами [19]. Использовано четыре метода.

Первый метод (динамический) был разработан А. П. Рудаковым в Институте высокомолекулярных соединений (ИВС) АН СССР. Расчет производят по уравнению

$$E = f_0/x_0 (l/S), \quad (4)$$

где E — динамический модуль упругости, измеренный в режиме «растяжение — сжатие» при частоте 590 Гц;
 f_0 — амплитуда динамической силы;
 x_0 — амплитуда смещений;
 l — начальная длина образца;
 S — площадь поперечного сечения образца.

Деформация образца составляет примерно 0,03 %.

Второй метод (динамический, резонансный) основан на принципе продольного маятника [46]. Работа была проведена во ВНИИ им. Попова (ИРПА). Расчет производят по уравнению

$$E = 4\pi^2 v^2 (Ml/b\delta), \quad (5)$$

где E — динамический модуль упругости, измеренный резонансным методом;
 v — резонансная частота первой гармоники;
 M — масса сосредоточенного груза, на который действует возбуждающая гармоническая сила от генератора звуковой частоты;
 l — длина образца;
 δ, b — толщина и ширина образца.

Деформация образца составляет примерно 0,1 %.

Третий метод (статический) основан на экспериментальном получении зависимости «усилие — удлинение» с последующим превращением ее в зависимость «напряжение — деформация» при обработке на ПЭВМ [42].

Деформация образца при расчете модуля упругости составляет 0,2 ... 0,3 %. Расчет производят по уравнению

$$E = \sigma/\epsilon. \quad (6)$$

Здесь E — статический модуль упругости;
 σ — напряжение;
 ϵ — деформация.

Четвертый метод (статический) основан на фиксации стрелы прогиба вертикально закрепленной консоли, горизонтальная нагрузка на которую создается специальной рычажной системой [29]. Статический модуль упругости при изгибе рассчитывают по уравнению

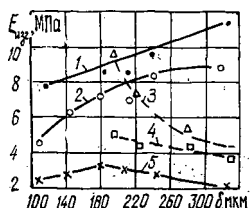
$$E_{изг} = 12EI/b\delta^3, \quad (7)$$

где EI — жесткость при изгибе;
 b, δ — ширина и толщина образца.

Стрела прогиба свободного конца образца составляет до 8% от испытываемой длины.

Для сравнительных испытаний использовали лабораторные образцы бумаги массой 75...240 г/м² из сульфатной небеленой целлюлозы, размолотой до 25 °ШР (плотность образцов 0,68...0,74 г/см³) и производственного картона для гладких слоев гофрированного картона с массой 125...200 г/м².

Рис. 3. Влияние толщины материала, обусловленной массой 1 м², на модуль упругости, определенный динамическим (1, 2) и статическим (3, 4, 5) методами: 1 — разработанный ИВС; 2 — ИРПА; 3 — при приложении растягивающей нагрузки; 4, 5 — изгибающей нагрузки (сплошная линия — лабораторные образцы сульфатной небеленой целлюлозы; пунктирная — картон машинного производства)



Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Для однородного изотропного упругого материала все эти зависимости должны представлять прямые, параллельные оси абсцисс, а при полной применимости закона Гука — единую прямую. Измеренный различными методами модуль упругости в этом идеальном случае — инвариантная характеристика упругих свойств материала.

По принятому определению [41] бумага является упругопластическим материалом, в некоторых работах ее рассматривают как упруговязкопластический или вязкоупругий материал [1, 2, 8]. Кроме того, в зависимости от условий формования листа, бумага, в большей или меньшей степени, является анизотропным материалом с неопределенным распределением напряжений внутри структуры. Поэтому фактически не наблюдается зависимости $E = f(\delta)$ в виде прямой линии, параллельной оси абсцисс.

Таким образом, величина модуля упругости бумаги зависит от методики определения. Модуль упругости, измеренный динамическим методом, имеет большую величину. Обращает на себя внимание различный ход кривых, отображающих изменение модуля упругости при испытаниях на растяжение и изгиб.

К старейшим способам второй группы методов определения жесткости при изгибе относится испытание бумаги, когда образец закреплен консольно (горизонтально), а изгиб происходит под действием собственного веса. В этом случае реализуются различные виды измерения: во-первых, фиксируется величина деформации конца образца; во-вторых, иногда определяют длину образца, при которой его свободный конец свисает вертикально; в-третьих, измеряют величину угла, составленного концом полоски бумаги с краем зажима [6, 14, 48, 53]. Наиболее характерны метод Кларка и метод, описанный Клейнертом [53].

Метод, предложенный Кларком, заключается в определении критической длины полоски тонкой бумаги, один конец которой помещен

в зажим. При повороте этого конца на 90° свободный конец изгибается и перекидывается с одной стороны на другую. Длина полоски увеличивается до тех пор, пока при повороте зажима образец не изогнется точно на 90° . Расчет жесткости производят по уравнению

$$S = L^3/100. \quad (8)$$

Здесь L — свободная (критическая) длина образца.

В работе [10] утверждается, что справедлива следующая зависимость:

$$S = L^3/100 = E\delta^3/12W. \quad (9)$$

Клейнерт дает описание прибора для определения длины l образца бумаги, под действием собственного веса изгибающегося на угол α , который жестко фиксирован и равен 43° . Сопротивление изгибу рассчитывают по уравнению

$$B = m_A l^3/8, \quad (10)$$

где m_A — масса 1 м^2 бумаги.

Эти методы просты и обеспечивают воспроизводимость результатов.

Из методов с использованием изгиба под действием сосредоточенной нагрузки наибольшее распространение нашли схемы приборов фирмы «Lorentzen and Wettre», представленные на рис. 4—6 и математически выраженные формулами (11) — (15).

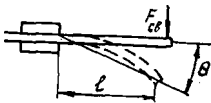


Рис. 4. Схема работы прибора для определения сопротивления изгибу

$$S^b = \frac{Fl^260}{\theta\pi b}, \quad (11)$$

где S^b — жесткость при изгибе, Н · м;
 F — сила, Н;
 l — длина, м;
 θ — угол (задается от 5 до 30° или фиксируется $5,0; 7,5; 15,0; 20,0; 25,0; 30,0^\circ$);
 b — ширина, м.

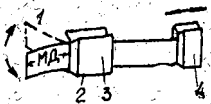


Рис. 5. Схема работы прибора для определения жесткости при изгибе резонансным методом: 1 — амплитуда колебания образца; 2 — вибрирующий зажим; 3 — приложение силы к зажиму; 4 — фиксирующий зажим (МД — машинное направление)

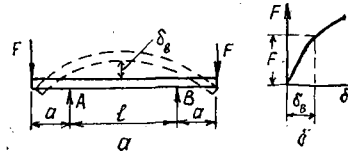
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{k^2}{l^2} \left(\frac{S^b}{w} \right)^{0,5}, \quad (12)$$

где f_r — резонансная частота, Гц;
 k — безразмерная константа, равная $1,875$;
 l — длина свободного конца полоски, м;
 S^b — жесткость при изгибе, мН · м;
 w — масса 1 м^2 образца, г.

Если $f_r = 25$, то уравнение приобретает вид

$$S^b = 2 \cdot 10^3 l^4 w. \quad (13)$$

Рис. 6. Схема работы прибора для определения жесткости при изгибе очень жестких материалов (а) и зависимость $F - \delta$ (б)



$$S^b = \frac{M}{bk}; \quad (14)$$

$$S^b = \frac{F}{b\delta} \frac{al^2}{8}, \quad (15)$$

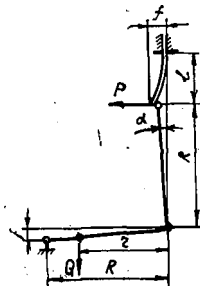
- где S^b — жесткость при изгибе, Н · м;
 M — изгибающий момент, Н · м;
 b — ширина образца, м;
 k — величина, обратная радиусу кривизны;
 F — нагружающая сила, Н;
 δ_g — стрела прогиба, м;
 a — расстояние от точки приложения силы до опоры, м;
 l — расстояние между точками опоры, м.

Схема с четырехточечной нагрузкой (см. рис. 6) используется для испытания очень жестких материалов типа гофрированного картона [48, 54].

Примером метода определения жесткости при изгибе под действием специальной нагрузки на образец, но без действия собственного веса, является прибор ЖБИ-1, нашедший широкое применение в отечественной практике [29]. На рис. 7 показана схема испытания вертикально закрепленного образца бумаги. Расчет жесткости при изгибе осуществляют по уравнению

$$EI = Qrl^3 / (3Rf), \quad (16)$$

Рис. 7. Схема работы прибора ЖБИ-1



- где EI — жесткость при изгибе;
 Q — масса дополнительного груза;
 r — плечо приложения груза;
 l — длина испытываемого образца;
 R — плечо маятника;
 f — стрела прогиба.

Стандартным в России служит метод [4], схема испытаний которого представлена на рис. 8. За результат испытания принимают силу изгиба $F_{изг}$ или момент изгиба $M_{изг}$. Расчет ведут по уравнению

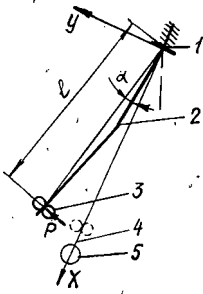


Рис. 8. Схема работы прибора ЖСК-2: 1 — зажимные губки для крепления образца; 2 — испытуемый образец; 3 — изгибающее устройство с роликовым захватом; 4 — маятниковый силоизмеритель; 5 — штырь для установки дополнительных грузов (P — деформирующая сила; l — испытуемая длина образца; α — заданный угол изгиба ($7,5$ или $15,0^\circ$); β — угол отклонения маятника от вертикали, определяющий изгибающий момент)

$$E_{\text{изг}} = M_{\text{изг}}/5. \quad (17)$$

К группе методов, определяющих жесткость пространственно-изогнутых образцов, относится используемый в России метод определения жесткости при сжатии кольца [5]. Метод основан на нахождении усилия, необходимого для смятия при осевом сжатии поставленной на ребро и свернутой в кольцо полоски бумаги или картона.

В этом случае, очевидно, нужно говорить не о жесткости, а о возникновении после достижения максимальной нагрузки условия стабильного равновесия. Это приводит к чрезмерной деформации путем бокового перемещения образца картона или бумаги, называемого потерей устойчивости. Потеря устойчивости зависит как от жесткости при изгибе материала, так и от ряда других факторов [35].

К группе специальных методов относят методы определения жесткости бумажных тарелок; стенок картонных коробок, защемленных по периметру и др. [50]. В работе [52] отмечается, что сопротивление сжатию — наиболее важная характеристика ящиков из гофрокартона, определяющая допустимую высоту штабелей при хранении и перевозках. На сопротивление сжатию влияют сопротивление гофрокартона торцевому сжатию, его толщина и жесткость при изгибе, периметр ящика, дефекты, возникающие при его изготовлении.

Сопротивление гофрокартона торцевому сжатию ECT (edgewise crush test) зависит от суммы прочностных характеристик всех компонентов. Этот показатель обычно оценивают по результатам экспериментального определения сопротивления картона для плоских слоев сжатию кольца RCT (ring crush test) и торцевого сопротивления гофров SST (corrugated crush test). Недавно введен новый метод испытания, при котором сжатию подвергается очень короткий участок материала и определяется показатель SCT (short span crush test). Для прогнозирования сопротивления гофрокартона торцевому сжатию можно пользоваться следующими уравнениями:
для трехслойного (один слой гофров)

$$ECT = 0,73(RST_1 + RST_2 + \alpha SST_r) + 1,60 \text{ (при } r = 0,95) \quad (18)$$

или

$$ECT = 0,53(SCT_1 + SCT_2 + \alpha_1 SCT_r) + 1,49 \text{ (при } r = 0,83); \quad (19)$$

для пятислойного (два слоя гофров)

$$ECT = 0,69(RCT_1 + RCT_2 + RCT_3 + \alpha_1 CCT_{r1} + \alpha_2 CCT_{r2}) + 2,27 \text{ (при } r = 0,92) \quad (20)$$

или

$$\text{ECT} = 0,45 (\text{RCT}_1 + \text{SCT}_2 + \text{SCT}_3 + \alpha_1 \text{SCT}_{r,1} + \alpha_2 \text{SCT}_{r,2}) + 2,74 \quad (\text{при } r = 0,88), \quad (21)$$

где α — коэффициент, определяемый несущей способностью гофров заданного профиля;

r — коэффициент корреляции принятой модели.

Индексы 1, 2, 3 соответствуют первому, второму (наружные) и третьему (средний) картонам для плоских слоев, а также первому и второму слоям гофров.

Хотя показатель SCT характеризует истинное сопротивление слоев сжатию, сочетание показателей RCT и SCT отражает влияние условий изготовления и переработки гофрокартона. Поэтому для уравнений (18) и (20) получены более высокие значения r , чем для уравнений (19) и (21).

Жесткость гофрокартона при изгибе обычно не контролируют, так как прибор «4-Point Bending Stiffness Tester» не нашел широкого пространства. При этом необходимо проводить расчеты по уравнению

$$D = \sum^n E_i I_i, \quad (22)$$

где D — жесткость гофрокартона при изгибе;

E_i — модуль упругости i -го слоя;

I_i — момент инерции i -го слоя.

Вычисления по этой формуле очень трудоемки в связи с тем, что момент инерции гофров нужно определять методами численного интегрирования по их профилю. Но теоретически доказано, что жесткость гофрокартона зависит, главным образом, от его суммарной толщины (жесткость пропорциональна квадрату толщины), а общая толщина гофрокартона — от профиля гофров и степени сохранения их высоты в процессах переработки. При неизменной общей толщине гофрокартона, т. е. при определенном профиле гофров главным фактором, влияющим на жесткость, является сумма значений массы 1 м^2 картона для плоских слоев.

Зависимость между сопротивлением ящиков сжатию и характеристиками гофрокартона можно описать эмпирической формулой Мак Ки

$$\text{BCT} = 375 \text{ECT}^{0,75} \text{FR}^{0,25} z^{0,50} \quad (\text{при } r = 0,96), \quad (23)$$

где BCT — сопротивление ящиков сжатию, Н;

ECT — сопротивление гофрокартона торцевому сжатию, кН/м;

$\text{FR} = \sqrt{D_m D_c}$ — среднее геометрическое значение жесткости гофрокартона при изгибе, Н · м;

D_m — жесткость гофрокартона при изгибе в машинном направлении (в ящике — в горизонтальном направлении), Н · м;

D_c — жесткость гофрокартона в поперечном направлении (в ящике — в вертикальном направлении), Н · м;

z — периметр ящика, м.

Поскольку жесткость гофрокартона при изгибе обычно неизвестна, формулу (23) использовать трудно. Поэтому выведены более удобные эмпирические формулы для ящиков из гофрокартона:

трехслойного

$$\text{BCT} = 17,7 \text{ECT}^{1,06} d^{0,85} (L + B)^{0,31} \quad (\text{при } r = 0,90); \quad (24)$$

пятислойного

$$ВСТ = 17,7 \text{ ЕСТ}^{0,85} d^{0,65} (L + B)^{0,38} \quad (\text{при } r = 0,95), \quad (25)$$

где d — толщина гофрокартона, мм;
 L — длина ящика, мм;
 B — ширина ящика, мм.

По этим формулам можно прогнозировать сопротивление сжатию любого ящика с учетом его размеров и свойств гофрокартона.

Анализ данных литературы показывает, что в зарубежной практике наибольшее распространение получили методы определения жесткости, представленные на рис. 4—6, а в отечественной — на рис. 7, 8.

Отметим, что, по данным справочника [54], для обеспечения требований стандарта [13] необходимы не только прочностные испытания целлюлозно-бумажных материалов, но и определение еще ряда характеристик деформативности (табл. 1).

При проведении испытаний целлюлозно-бумажных материалов на изгиб возникают две проблемы. Первая связана с выбором метода, который лучшим образом позволяет оценить потребительские свойства материала, вторая — обусловлена появлением в структуре материала, наряду с упругими, также вязких и пластических деформаций [17, 47—49]. Кроме того, целлюлозно-бумажные материалы отличаются анизотропией, поэтому использовать уравнения сопротивления материалов можно с известным приближением.

Прибор ЖБИ-1 (см. рис. 7), используемый отечественными исследователями, благодаря наличию оптической системы отсчета результатов позволяет весьма точно измерять малые деформации образца. На опытно-образце этого прибора были выявлены оптимальные условия испытаний и, в первую очередь, исследовано влияние испытываемой длины образца и деформирующей силы на рассчитываемую величину жесткости при изгибе [25, 43]. Результаты эксперимента представлены на рис. 9, 10. Для опытов применяли образцы с массой 240 г/м² и степенью помола волокна 25 °ШР. Было показано, что величина испытываемой длины образца оказывает влияние на измеряемую жесткость при изгибе. Для получения сравнимых результатов испытываемая длина должна быть одинаковой и, с целью уменьшения вероятности развития пластических



Рис. 9. Влияние изменения длины образца на измеряемую жесткость бумаги при изгибе для различных значений деформирующей силы: 1, 1' — 3,06; 2, 2' — 6,12; 3, 3' — 15,30 мН; 1, 2, 3 — образцы сульфатной небеленой целлюлозы; 1', 2', 3' — образцы сульфитной беленой целлюлозы

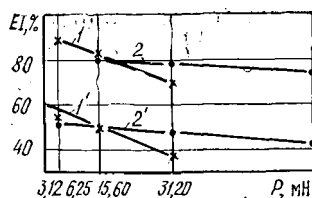


Рис. 10. Влияние изменения деформирующей силы на измеряемую жесткость бумаги при изгибе для различных значений длины образца: 1, 1' — 3,5; 2, 2' — 2,5 см; 1, 2 — образцы сульфатной небеленой целлюлозы; 1', 2' — образцы сульфитной беленой целлюлозы

Таблица 1

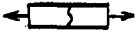


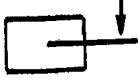

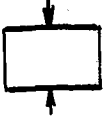
Образец	Деформация разрушения 	Поглощение энергии при растяжении 	Модуль упругости 	Сопротивление изгибу 	Жесткость при изгибе 	Прочность при сжатии 
Бумага для печати	+	+	+	+	+	-
Крафт-лайнер или флютинг	+	+	+	-	-	+
Мешочная и др. высокопрочные виды бумаги	+	+	+	+	+	-
Коробочный картон	-	-	+	+	+	+
Гофрированный картон	-	-	-	-	+	+

Таблица 2

Образец	Изгиб*			Растяжение σ , МПа
	P , мН	δ , см	$\sigma_{\text{раст}}$, кПа	
Картон машинного производства с массой 1 м ² , г/м ² :				
175	62,50	0,0295	2,16	19,0
200	62,50	0,0370	1,37	17,2
Сульфатная небеленая целлюлоза лабораторного изготовления (масса 75 г/м ²) со степенью помола, °ШР:				
16	3,12	0,0161	0,15	2,2
25	3,12	0,0124	0,25	10,3
40	3,12	0,1140	0,30	12,6
60	3,12	0,1020	0,38	13,3

* Длина образца при испытании составляла 2,5 см.

деформаций, длина образца должна быть минимально возможной. Увеличение деформирующей нагрузки приводит к снижению измеряемой величины жесткости.

В работе [17] показано, что упругопластические материалы (древесина, слоистые пластики, целлюлоза, бумага, картон и др.) при изгибе в растянутой зоне поперечного сечения работают упруго вплоть до разрыва крайних волокон, а в сжатой зоне — упругопластически. Справедливость данного утверждения в случае целлюлозно-бумажных материалов для растянутой зоны образца можно проверить, используя уравнение Навье:

$$\sigma = M/W, \quad (26)$$

где M — постоянно действующий изгибающий момент, $M = Pl$;

W — момент сопротивления сечения образца, $W = b\delta^3/6$.

Из табл. 2 видно, что напряжение $\sigma_{\text{раст}}$, возникающее в крайнем слое подвергнутого изгибу образца, на 3—4 порядка ниже предела упругости σ_1 материала при испытании на растяжение.

В зоне сжатия механическое поведение целлюлозно-бумажных материалов гораздо сложнее. Экспериментально установлено, что величина начального модуля упругости E_1 при испытании материала на растяжение выше модуля упругости при изгибе $E_{\text{изг}}$. Можно предположить, что

$$E_{\text{изг}} = (E_1 + E_{\text{сж}})/2, \quad (27)$$

где $E_{\text{сж}}$ — модуль упругости при сжатии материала в плоскости листа.

Необходимо отметить парадоксальность поведения целлюлозно-бумажных материалов при сжатии в плоскости листа. Под действием напряжений, примерно на четыре порядка меньших предела упругости при растяжении в зоне сжатия, по всей видимости, возникает предельное состояние.

В работах [17, 38, 45] показана возможность расчета слоя структуры материала, в котором возникает предельное состояние. Принимае-

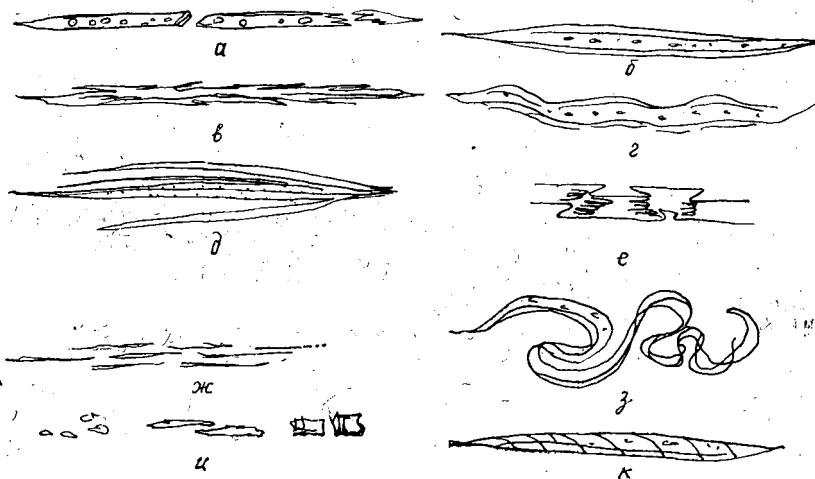
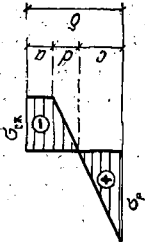


Рис. 11. Влияние процесса размола на волокно целлюлозы: а — укорочение волокна; б — уменьшение люмена; в — увеличение поверхности; г — размягчение; д — расслоение; е — продольное сжатие; жс — фибриллирование; з — изменение формы; и — образование мелких частиц; к — изменение структуры

Таблица 3

Коеф-фици-ент	n_0														
	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	3.5	4.2	4.6	5.0	5.4	5.8	6.2	6.6	7.0
K_1	0,17	0,28	0,38	0,44	0,50	0,54	0,58	0,62	0,64	0,67	0,69	0,71	0,72	0,74	0,75
K_2	0,35	0,26	0,20	0,15	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
K_3	0,48	0,46	0,42	0,41	0,38	0,36	0,33	0,31	0,30	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22



* $E_{сж} = 2E_{иг} + E_1$ (28); $a = \delta \frac{n_0 - 1}{n_0 + 1} = K_1 \delta$ (29); $d = \delta \frac{2}{(n_0 + 1)^2} = K_2 \delta$ (30); $c = \delta \frac{2n_0}{(n_0 + 1)^2} = K_3 \delta$ (31);

$n_0 = \frac{\sigma_{раст}}{\sigma_{сж}} = \frac{E_1}{E_{сж}}$ (32)

Таблица 4

Вла-жност цел-люлозы, %	Массо-вая доля лигни-на в целлю-лозе, %	Жесткость при изгибе отдельного волокна $E_l \cdot 10^4$, мН · см ²		Физико-механические показатели бумаги				
		до суш-ки	после 1 мин сушки при температуре 110 °C	Толщина $\delta \cdot 10^3$, м	Плот-ность, г/см ³	Жест-кость при из-гибе, мН · см ²	Модуль упруго-сти при изгибе, МПа	Межво-локон-ные силы связи, МПа
43,0	3,40	6,34	8,42	154	0,65	120	2630	0,63
43,4	4,60	6,55	10,00	154	0,61	154	2800	0,64
46,4	6,40	7,25	11,60	154	0,58	188	2940	0,73
49,6	9,25	8,58	13,80	154	0,53	223	2590	0,67

мые вид эпюры нормальных напряжений и уравнения для расчетов представлены в табл. 3.

Предельное состояние в данном случае может возникать не только в результате достижения предела упругости при сжатии, но и при потере устойчивости отдельных волокон, т. е. возникновении бокового перемещения. Величина критической силы, вызывающей потерю устойчивости, зависит от жесткости волокна, его длины и способа закрепления в структуре материала. Жесткость отдельного волокна зависит от многих факторов — природы, анатомического строения, способа получения технической целлюлозы, химического состава, механического воздействия, длины и др. Наглядное представление об изменениях волокна в процессе размола дает рис. 11.

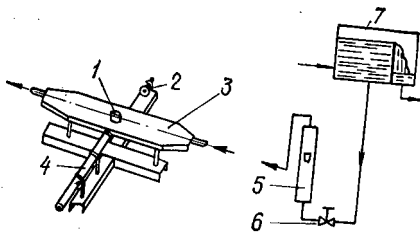


Рис. 12. Прибор для определения жесткости при изгибе индивидуального волокна: 1 — держатель волокна; 2 — окуляр; 3 — водная камера; 4 — источник света; 5 — расходомер; 6 — вентиль; 7 — резервуар с водой

Определить жесткость отдельного волокна достаточно сложно. В лабораторной практике нашел применение метод Самуэльсона [55], сущность которого заключается в следующем: волокно фиксируется консольно в стенке канала, по которому течет вода в ламинарном режиме (рис. 12). Изгиб волокна, вызванный протекающей водой, наблюдается через монокулярную лупу. Нагрузка на волокно может изменяться в зависимости от скорости воды в канале. Жесткость при изгибе волокна EI_b , $\text{Н} \cdot \text{м}^2$, определяется по уравнению

$$EI_b = (11/80)[\mu k / (1 - 0,63b/a)] \times \\ \times (Q/4ab)(1/y)(l^5/b)(1 - 13l/33b), \quad (33)$$

где μ — абсолютная вязкость воды, $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$;
 k — коэффициент, $k = 20$;
 a, b — половины сторон прямоугольного канала, $a = 0,03$ м;
 $b = 0,02$ м;
 Q — скорость потока в канале, определяемая расходом воды, $\text{м}^3/\text{с}$;
 y — деформация волокна, м;
 l — испытываемая длина волокна, м.

Жесткость может быть рассчитана, если известна деформация y , соответствующая скорость потока Q и испытываемая длина волокна l .

В работе [16] показано влияние жесткости при изгибе исходных волокон на жесткость бумаги при изгибе. Данные эксперимента представлены в табл. 4. Образцы изготавливали из сульфатной небеленой целлюлозы массой $100 \text{ г}/\text{м}^2$. Из анализа данных табл. 4 следует, что с повышением содержания в волокне лигнина возрастает его жесткость, причем сушка волокна при достаточно высокой температуре (110°C) значительно увеличивает эту характеристику. Жесткость бумаги при изгибе линейно возрастает с увеличением жесткости исходных волокон.

В работе [32] для расчета жесткости при изгибе отдельных слоев картона хром-эрзац (в этом материале свойства отдельных слоев и

их толщина изменяются в широких пределах) предложено использовать зависимости теории многослойных композитов.

Эксперименты с лабораторными и промышленными образцами многослойного картона показали, что жесткость картона при изгибе S удовлетворительно описывается известным уравнением С. П. Тимошенко.

$$S = D - B^2/A. \tag{34}$$

Здесь A, B, D — матрицы жесткости, вычисляемые с помощью уравнений

$$A = \sum_{k=1}^N E_k (Z_k - Z_{k-1}); \tag{35}$$

$$B = 1/2 \sum_{k=1}^N E_k (Z_k^2 - Z_{k-1}^2); \tag{36}$$

$$D = 1/3 \sum_{k=1}^N E_k (Z_k^3 - Z_{k-1}^3), \tag{37}$$

где E_k — модуль упругости k -го слоя;
 Z_k — координаты слоев (рис. 13),

$$Z_0 = -\delta/2 \quad (k=0); \tag{38}$$

$$Z_0 = Z_{k-1} + \delta_k \quad (k=1, 2, \dots, N), \tag{39}$$

δ — толщина картона;
 δ_k — толщина k -го слоя.

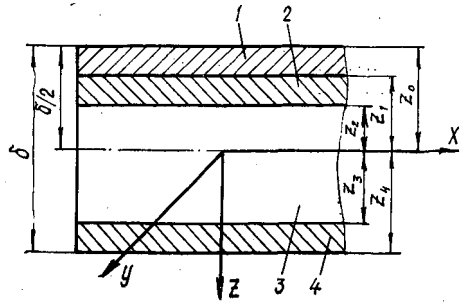
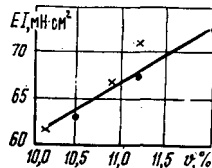


Рис. 13. Расположение слоев в четырехслойном картоне хром-эрац: 1 — поверхностный; 2 — подкладочный; 3 — средний; 4 — нижний

При определении жесткости при изгибе, равно как и других характеристик механических свойств, необходимо учитывать взаимосвязь средних значений показателей с неоднородностью структуры материала. В работе [22] показано, что с увеличением среднего значения жесткости при изгибе у образцов сульфатной небеленой целлюлозы коэффициент вариации этой характеристики возрастает (рис. 14). Это указывает на важность статистической обработки экспериментальных данных.

Рис. 14. Связь жесткости при изгибе с коэффициентом вариации v для образцов целлюлозы, полученной непрерывным способом варки (·) и периодическим (x)



Резюмируя вышеизложенное, отметим, что для практических целей наибольший интерес представляют методы определения жесткости при изгибе, которые в данном обзоре отнесены ко второй группе, так как методы, отнесенные к первой группе, дают завышенные результаты, не учитывающие поведение материала при сжатии в плоскости листа, а методы третьей и четвертой групп характеризуются большей специфичностью. Предлагаемый способ измерения жесткости при изгибе бумаги и картона по методу консольно закрепленной в вертикальном положении балки предельно прост и универсален (прибор ЖБИ-1) [29]. Он дает воспроизводимые результаты, учитывая неоднородность испытываемых материалов. Показанный в [17] способ расчета слоя материала, в котором возникает предельное состояние, может быть полезен при оценке характера процессов производства, решении задачи улучшения свойств материала проведением поверхностной проклейки и др.

Таблица 5

Образец	СП, °ШР	EI , мН·см ²	$E_{изг}$, МПа	δ , см	$F_{св}$, МПа	
Полумасса: льняная	25	116	20,8	0,0164	0,75	
	35	110	23,8	0,0155	1,14	
	45	104	30,2	0,0140	1,49	
	60	98	35,7	0,0130	1,61	
	75	92	38,0	0,0125	1,75	
хлопковая	15	95	29,6	0,0137	0,99	
	25	85	29,6	0,0132	1,21	
	35	85	32,8	0,0128	1,38	
	45	87	35,8	0,0125	1,58	
	60	87	38,7	0,0122	1,70	
Сульфитная целлюлоза: небеленая	14	109	16,9	0,0174	0,20	
	25	106	26,6	0,0147	1,38	
	35	101	28,9	0,0141	1,50	
	45	93	28,6	0,0137	1,57	
	60	97	32,3	0,0134	2,02	
	75	74	27,0	0,0129	2,24	
	беленая	14	100	17,0	0,0167	0,22
		25	103	24,0	0,0150	1,38
		35	98	28,0	0,0141	1,48
		45	100	32,0	0,0136	1,75
60		100	30,8	0,0137	1,79	
25	76	27,0	0,0132	2,11		
Сульфатная целлюлоза: небеленая	15	119	10,9	0,0206	0,57	
	25	99	26,5	0,0144	1,75	
	35	84	21,7	0,0146	1,73	
	45	80	20,4	0,0142	2,02	
	60	86	25,6	0,0140	2,14	
	75	86	25,6	0,0140	2,47	
	беленая	15	103	8,2	0,0216	0,21
		25	103	18,0	0,0166	1,40
		35	90	21,8	0,0149	1,42
		45	105	24,0	0,0152	1,61
60		98	27,0	0,0143	1,78	
75		85	28,1	0,0133	2,30	
Сульфатная беленая ли- ственная целлюлоза	13	162	30,4	0,0162	0,48	
	25	156	56,5	0,0133	1,18	
	35	150	60,0	0,0126	1,88	
	45	148	65,9	0,0122	2,18	
	60	140	65,0	0,0120	2,30	
	75	133	73,9	0,0113	2,40	

Вопрос о влиянии различных технологических факторов на жесткость бумаги при изгибе освещен в литературе недостаточно. В доступной автору литературе удалось обнаружить только один обзор по данному вопросу [10], причем жесткость при изгибе определялась по методу Кларка. В качестве факторов, оказывающих влияние на жесткость при изгибе, рассмотрены природа волокнистого материала и способы получения полуфабрикатов; качество сырья; процессы производства целлюлозы; фракционный состав по длине волокна; размол; мокрое прессование; сушка; влияние химических добавок; процессы производства на КДМ.

Вид волокнистого материала и степень помола. Результаты изучения влияния вида волокнистого материала и степени помола (СП) на жесткость бумаги при изгибе представлены в табл. 5 [28]. С повышением степени помола бумажной массы до 75 °ШР при постоянной массе образцов (100 г/м²) уменьшается жесткость при изгибе, что объясняется понижением величины момента инерции поперечного сечения образца вследствие уменьшения его толщины, вызванной повышенной усадкой материала.

Большей жесткостью при изгибе обладают образцы из сульфатной лиственной беленой целлюлозы, которые обнаружили высокие значения модуля упругости при изгибе.

Проблема расширения сырьевой базы целлюлозно-бумажного производства за счет более полного использования различного вида древесных отходов с каждым годом становится более актуальной. Опилки, являясь многотоннажными отходами лесопиления, могут быть применены для производства сульфатной целлюлозы.

Показатели физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы из различных видов сырья представлены в табл. 6 [26]. Целлюлоза, полученная из опилок, имела примерно в 2 раза меньшую сред-

Таблица 6

Образец целлюлозы	$l_{\text{ср}}$, мм	СП, °ШР	EI , мН·см ²	$E_{\text{изг}}$, МПа	δ , см	$F_{\text{св}}$, МПа
Из опилок древесины: сосны	1,07	18	168	1340	0,0216	0,58
		21	183	3122	0,0167	1,32
		30	149	3742	0,0147	1,46
		60	106	3621	0,0133	1,67
кедра	1,20	17	100	853	0,0211	0,58
		22	125	3639	0,0140	1,46
		30	115	3588	0,0137	2,08
		61	94	3406	0,0130	1,56
лиственницы	1,06	15	159	1049	0,0230	0,28
		21	165	3217	0,0160	1,07
		32	110	2953	0,0144	1,46
		61	94	3406	0,0130	1,56
Из смеси опилок древесины сосны, кедра, лиственницы	1,03	17	161	872	0,0245	0,39
		21	149	3255	0,0154	1,24
		31	128	3055	0,0150	1,61
		60	96	3747	0,0127	2,06
Из смеси щепы древесины сосны, кедра, лиственницы	2,49	17	184	1753	0,0203	0,46
		22	133	3371	0,0147	1,35
		31	136	3849	0,0141	1,47
		58	114	4049	0,0131	1,36
Лиственная небеленая	0,89	19	212	2573	0,0187	0,32
		21	172	3363	0,0160	0,69
		30	135	4977	0,0129	1,48
		63	88	3930	0,0121	1,70

ную длину волокна по сравнению с целлюлозой из щепы и повышенную способность к размолу. Величина межволоконных сил связи у образцов с невысокой степенью помола целлюлозы из опилок значительно выше, чем из лиственной целлюлозы, и практически равна (кроме целлюлозы из опилок лиственницы) величине межволоконных сил связи у образцов целлюлозы из щепы. При размоле целлюлозы до 30 °ШР и выше величина межволоконных сил связи у целлюлозы, полученной из опилок, в ряде случаев, больше, чем у целлюлозы из щепы или лиственной целлюлозы, что свидетельствует о более высокой степени разработки волокон целлюлозы из опилок в процессе размола. Деформационные свойства целлюлозы из опилок ниже, чем из щепы, но сравнимы с показателями лиственной целлюлозы.

При производстве бумаги в композиции по волокну часто в различных соотношениях используют смеси лиственной и хвойной беленой целлюлозы. Влияние этих соотношений на величину жесткости при изгибе представлено на рис. 15. Каждый компонент композиции размалывали отдельно до 25 °ШР, масса 1 м² образца составляла 100 г.

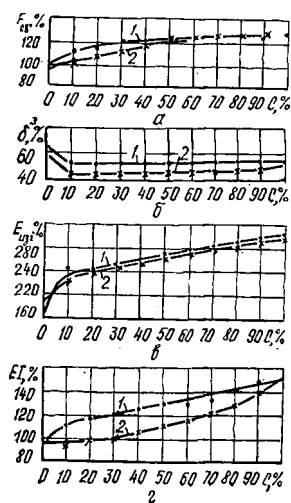
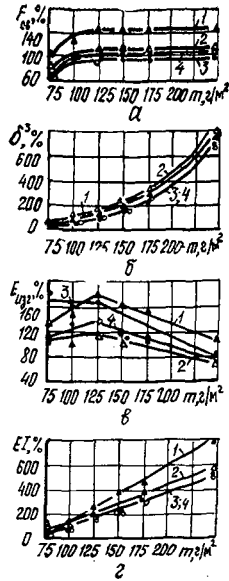


Рис. 15. Влияние композиции по волокну на физико-механические свойства бумаги: а — F ; б — δ^2 ; в — $E_{изг}$; г — EI (те же обозначения на рис. 16—19); 1 — сульфатная хвойная беленая целлюлоза + сульфатная лиственная беленая целлюлоза; 2 — сульфитная хвойная беленая целлюлоза + сульфатная лиственная беленая целлюлоза

Увеличение доли лиственной целлюлозы C в образце приводит к возрастанию жесткости бумаги при изгибе. Короткие волокна лиственной целлюлозы способствуют получению более однородной бумаги с равномерной структурой, что ведет к значительному возрастанию модуля упругости. Именно этот показатель в данном случае решающим образом влияет на величину жесткости бумаги при изгибе.

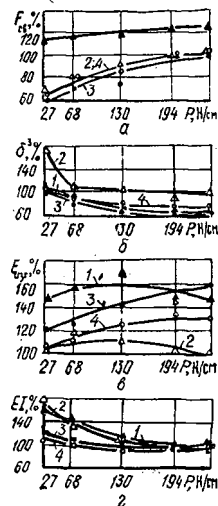
Масса 1 м² материала. Влияние этого фактора на жесткость при изгибе показано на рис. 16. В этом случае волокнистые материалы размалывали до 25 °ШР, а бумагу изготавливали с массой от 75 до 240 г/м². Как и следовало ожидать, с увеличением массы 1 м² жесткость бумаги при изгибе возрастает [40]. В данном случае это обуславливается значительным увеличением толщины бумаги, а значит и возрастанием момента инерции поперечного сечения. Снижение величины модуля упругости у образцов с массой от 150 до 240 г/м² объясняется изменяющимися условиями формования листа на сетке. Увеличение концентрации массы в напорном устройстве вызывает флокуляцию волокон, что приводит к неравномерному распределению отдельных фракций с различной длиной волокна по площади и толщине листа бумаги. Это влияет на величину модуля упругости при изгибе.

Рис. 16. Влияние массы 1 м^2 бумаги m на ее физико-механические свойства: 1 — сульфатная небеленая целлюлоза; 2 — сульфатная беленая; 3 — сульфитная небеленая; 4 — сульфитная беленая



Мокрое прессование. Влияние линейного давления P на жесткость бумаги при изгибе показано на рис. 17. Увеличение линейного давления при мокром прессовании в исследованном интервале незначительно уменьшает жесткость при изгибе бумаги, изготовленной из сульфитной белой и небеленой целлюлозы, в то время как жесткость при изгибе бумаги из сульфатной целлюлозы снижается значительно. В этом случае обращает на себя внимание характер изменения модуля упругости. Если у образцов бумаги из сульфитных видов целлюлозы он непрерывно возрастает с увеличением линейного давления, то у образцов из сульфатной целлюлозы величина модуля упругости имеет максимум, после которого она уменьшается. Можно предположить, что природа волокна оказывает влияние на структуру листа, а следовательно и на величину модуля упругости.

Рис. 17. Влияние мокрого прессования на физико-механические свойства бумаги: 1 — сульфатная небеленая целлюлоза; 2 — сульфатная беленая; 3 — сульфитная небеленая; 4 — сульфитная беленая



Параметры бумаги, изготовленной из сульфатной беленой целлюлозы, размолотой до 25 °ШР, приняты за 100 % (см. рис. 14—16) имеют следующие значения: $EI = 101 \text{ мН} \cdot \text{см}^2$; $E_{\text{изг}} = 1763 \text{ МПа}$; $\delta^3 = 4,56 \cdot 10^6 \text{ см}^3$; $F_{\text{св}} = 1,38 \text{ МПа}$.

Жесткость исходных волокон. При работе образца на изгиб подвергаются деформации изгиба и отдельные волокна, образующие лист бумаги. Однако, говоря о взаимосвязи деформационных свойств бумаги и исходных волокон, следует иметь ввиду существующее различие в свободной длине (не связанной поперечными связями) отдельных волокон и волокон, связанных между собой на сопряженных поверхностях в структуре бумажного листа. Известно, что в бумажном листе, изготовленном из неразмолотой целлюлозы, 20...33 % длины волокна свободны, в то время как в бумажном листе, изготовленном из хорошо размолотой целлюлозы, свободная длина волокна составляет 5 % от всей длины. Таким образом, взаимное закрепление волокон имеет принципиальное значение. Оно приводит к появлению нового качества — волокна перестают быть индивидуальными, образуют единую систему.

✓ Число факторов, влияющих на жесткость при изгибе отдельного волокна, весьма велико. Можно отметить следующие: толщина клеточной стенки; структура и состав; форма и площадь поперечного сечения; деформации волокон (изгибы, сплющивания и т. д.); влажность волокон. На жесткость отдельного волокна влияют не только морфологические особенности волокна и его химический состав (особенно содержание лигнина), но и технологические факторы изготовления бумаги, такие, как размол и сушка. Влияние вида волокна, химического состава и процесса размола показано выше. Здесь отметим, что при размоле изменяется геометрия поперечного сечения волокна, что ведет, как правило, к уменьшению момента инерции. Любое повреждение стенки волокна снижает модуль упругости. Однако, при проведении эксперимента чрезвычайно трудно количественно проследить взаимосвязь между жесткостью отдельного волокна и жесткостью материала.

Качественную оценку связи этих характеристик позволяет дать эксперимент по влиянию температуры сушки на физико-механические свойства материала. Известно, что под воздействием повышенной температуры растительные волокна становятся более жесткими, как вследствие их ороговения, так и из-за снижения относительного содержания пластифицирующей волокна влаги. В табл. 7 представлены результаты эксперимента по исследованию влияния температуры поверхности цилиндра при сушке бумаги на ее физико-механические свойства [18]. Как видно из табл. 7 (где C — сухость бумаги после сушки), с увеличением температуры сушки t , уже начиная с 94 °С, жесткость бумаги при изгибе возрастает, что обусловлено увеличением как момента инерции, так и модуля упругости бумаги. Величина межволоконных сил

Таблица 7

Целлюлоза	t , °С	C , %	δ , см	ρ , г/см ³	EI , мН · см ²	$E_{\text{изг}}$, МПа	$F_{\text{св}}$, МПа
Сульфатная небеленая	80	87,0	0,0137	0,73	88,4	2750	1,385
	94	93,5	0,0138	0,73	90,3	2770	1,385
	110	98,0	0,0144	0,70	97,2	2500	1,719
	130	99,0	0,0146	0,69	126,8	3250	1,650
Сульфитная беленая	80	87,0	0,0130	0,77	80,5	2996	0,825
	94	93,5	0,0130	0,77	77,5	2860	0,864
	110	98,0	0,0134	0,75	100,0	3340	1,345
	130	99,0	0,0135	0,74	119,0	3850	1,080

связи у образцов бумаги, подвергавшихся воздействию повышенной температуры при сушке, снижалась, в то время как модуль упругости повышался. Это можно объяснить только возрастанием модуля упругости отдельного волокна.

Авторами работы [11] изучено влияние процесса ускоренного термического старения ($t = 120^\circ\text{C}$) на жесткость бумаги при изгибе (степень помола 60 °ШР и масса 100 г/м²). Результаты исследования представлены в табл. 8, из которой видно, что при возрастании продолжительности воздействия повышенной температуры на бумагу, наряду с процессами старения, наблюдается увеличение жесткости при изгибе материалов, изготовленных из различных волокнистых полуфабрикатов.

Таблица 8

Белая целлюлоза	Продолжительность старения, сут	$1/EI$, мН·см ²	$E_{изг}$, МПа
Хлопковая	0,00	36,4	491
	0,75	38,2	510
	1,50	40,0	540
	3,00	43,0	570
	4,50	44,0	580
	6,00	46,0	608
Сульфатная: из сосны	0,00	51,0	2020
	0,75	53,0	2160
	1,50	57,0	2285
	3,00	58,0	2302
	4,50	67,7	2720
	6,00	83,4	2935
из березы	0,00	47,1	1885
	0,75	50,0	1982
	1,50	51,0	2035
	3,00	54,0	2160
	4,50	56,0	2390
	6,00	64,7	2590

На жесткость бумаги при изгибе оказывают влияние степень ориентации волокон в бумажном листе и разносторонность бумажного листа [27]. Образцы бумаги для испытаний изготавливали на лабораторной бумагоделательной машине и аппарате ЛОА-2 из целлюлозы, размолотой до 25 °ШР. Масса образцов постоянна и составляла 100 г/м². Степень ориентации волокон определяли отношением разрывной длины образца, измеренной в машинном и поперечном направлениях. Результаты исследования приведены в табл. 9.

Увеличение ориентации волокон в продольном направлении бумаги приводит к значительному возрастанию ее жесткости при изгибе в этом же направлении. При деформировании образцов на лицевую сторону листа бумаги наблюдалась во всех случаях большая величина жесткости при изгибе по сравнению с деформированием на сеточную сторону. Известно, что волокнистый материал при сжатии вдоль волокон, оказывается более слабым, чем при растяжении. Под сжимающей нагрузкой одно или несколько волокон теряют устойчивость, образуется складка, а все остальные волокна следуют за ней. Отсюда возрастание числа волокон, работающих на сжатие, уменьшение пористости (в случае лицевой стороны листа) приводят к увеличению прочности при сжатии и, как результат, повышению жесткости при изгибе.

Таблица 9

Целлюлоза	Образец	Степень ориентации волокон	δ , см	EI , мН·см ²		$E_{изг}$, МПа	
				при деформации на сторону			
				сеточную	лицевую	сеточную	лицевую
Сульфатная небеленая	Отливка с листоотливного аппарата	1,00	0,0141	98,1	108,0	2790	3060
	Бумага машинного изготовления	1,67	0,0143	117,9	157,0	3200	4270
			0,0143	106,0	127,5	2890	3475
	То же	2,82	0,0143	175,0	192,0	4760	5240
0,0143			66,6	82,5	1830	2240	
Сульфитная беленая	Отливка с листоотливного аппарата	1,00	0,0139	74,6	98,1	2210	2905
		2,24	0,0141	127,5	161,0	3670	4560
	То же		3,00	0,0141	114,0	149,0	3230
		0,0141		143,0	165,0	4060	4690
	0,0141	60,0	89,3	1700	2530		

Примечание. В числителе представлены данные для продольного направления испытания образцов; в знаменателе — поперечного.

Различные по длине фракции целлюлозных полуфабрикатов, имеющие различные когезионную способность и жесткость отдельного волокна, в различной степени определяют жесткость бумаги (табл. 10).

Таблица 10

Образец	$l_{ср}$, мм	СП, °ШР	EI , мН × см ²	$E_{изг}$, МПа	δ , см	$F_{св}$, МПа	
Сульфатная небеленая целлюлоза:	нефракционированная	1,90	13	94	1840	0,0160	0,38
		1,20	25	71	4292	0,0110	1,59
		0,56	35	60	3617	0,0110	1,39
		0,51	45	68	4081	0,0110	1,61
	фракция 1	2,20	12	90	1465	0,0170	0,41
		1,60	25	77	4628	0,0110	1,10
		0,51	35	59	4720	0,0110	1,30
	фракция 2	0,44	45	68	5440	0,0110	1,30
		1,72	14	73	1187	0,0170	0,16
		1,71	25	76	4552	0,0110	1,21
	фракция 3	0,49	35	63	3811	0,0113	1,46
		0,39	45	65	3895	0,0110	1,48
		1,20	16	66	1067	0,0170	0,18
1,01		25	60	2787	0,0120	1,27	
0,38		35	64	3865	0,0110	1,47	
0,25	45	68	5456	0,0100	1,56		
Дефибрерная древесная масса:	нефракционированная (100 %)	—	—	161	1490	0,1205	0,60
		—	—	269	667	0,0318	0,13
		—	—	215	834	0,0274	0,15
		—	—	236	1000	0,0267	0,36
		—	—	140	1050	0,0220	0,39

Примечание. В скобках приведено относительное содержание фракций.

У дефибрерной древесной массы наибольшей жесткостью при изгибе обладают образцы, изготовленные из грубодисперсной фракции 1. Эти образцы характеризуются значительным моментом инерции поперечного сечения, который в данном случае обуславливает большую жесткость при изгибе. В случае сульфатной небеленой целлюлозы закономерности формирования жесткости при изгибе другие. Она определяется величиной модуля упругости при изгибе. Причем наиболее длиноволокнистая фракция 1' имеет более высокие значения модуля упругости при изгибе образцов, изготовленных как из неразмолотого, так и размолотого волокна. В работах [37] высказывается предположение, что в процессе размола жесткие целлюлозные волокна (фракция 1, как правило, содержит более жесткие волокна) преимущественно фибриллируются. Этим, очевидно, можно объяснить повышенные значения модуля упругости при изгибе фракции 1 волокна сульфатной небеленой целлюлозы.

В работах [12, 30], показано, что у образцов термомеханической массы (ТММ) наблюдаются те же закономерности влияния длины волокна на жесткость при изгибе, что и у дефибрерной механической массы (ДДМ). Единственное отличие заключается в том, что у образцов ДДМ жесткость при изгибе выше.

Авторы работы [32] исследовали жесткость при изгибе картона с высоким содержанием в композиции макулатуры. Установлено, что при изготовлении многослойного картона с повышением степени помола волокна относительное уменьшение момента инерции поперечного сечения выше, чем возрастание модуля упругости, что приводит к снижению жесткости при изгибе. Наибольшую величину имели те виды макулатуры, в композиции которых древесная масса и наполнитель отсутствуют вообще или их содержание минимально. Показано, что максимальное значение жесткости картона может быть достигнуто, если слои с высоким модулем упругости расположены снаружи, а слои с большим моментом инерции поперечного сечения — внутри полотна картона. При постоянной массе 1 м² картона существует оптимальное соотношение массы наружных и внутренних слоев, при котором величина жесткости достигает максимального значения. Соотношение масс слоев регламентируется разностью плотностей наружных и внутреннего слоев.

Химические добавки. При выработке видов бумаги, для которых важна определенная жесткость при изгибе, в ее композицию

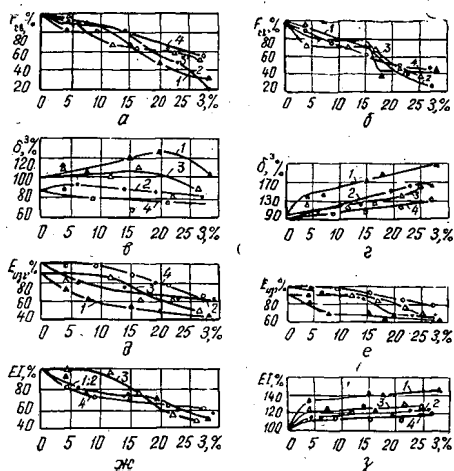


Рис. 18. Влияние наполнителей на физико-механические свойства бумаги из сульфатной (1, 3) и сульфитной (2, 4) беленой целлюлозы с постоянной (а, в, д, ж) и переменной (б, г, е, з) массой 1 м²: а, б — E; в, г — δ³; д, е — E_{иг}; ж, з — EI; 1, 2 — наполнитель гипс; 3, 4 — каолин (3 — зольность)

часто вводят различные добавки. В работе [18] была предпринята попытка количественно оценить характер воздействия некоторых вспомогательных веществ на жесткость бумаги при изгибе. В опытах использовали сульфитную и сульфатную беленые виды целлюлозы, которые размалывали до 25 °ШР. При выполнении графиков, отражающих результаты исследования, по оси ординат в процентах отложены характеристики исследуемых образцов. За 100 % приняты значения параметров бумаги с массой 100 г/м², изготовленной из сульфатной беленой целлюлозы без добавок (рис. 17, 18, 20): $EI = 98,1 \text{ мН} \cdot \text{см}^2$; $E = 3240 \text{ МПа}$; $\delta^3 = 2,74 \cdot 10^6 \text{ см}^3$; $F_{св} = 1,37 \text{ МПа}$.

Результаты исследования влияния наполнителей на жесткость бумаги при изгибе представлены на рис. 18. В качестве наполнителей применяли каолин (наиболее распространенная добавка) и гипс, о котором в литературе имеются сведения, что он придает бумаге повышенную жесткость (не указано какую). Известно, что введение наполнителя влияет на физико-механические свойства листа бумаги. При этом они зависят как от свойств наполнителя, так и уменьшения количества волокнистого материала на 1 м² бумаги, если ее масса остается постоянной. Чтобы учесть влияние этих факторов, изготавливали отливки двух видов:

с постоянной массой 1 м² (100 г), т. е. введение наполнителя (увеличение зольности) сопровождалось соответствующим уменьшением количества волокнистого материала;

с переменной массой 1 м², т. е. количество волокнистого материала оставалось постоянным, а увеличивалась масса 1 м² бумаги.

С повышением зольности модуль упругости, как и межволоконные силы связи, уменьшались у всех испытанных образцов бумаги. Толщина, а следовательно, и момент инерции поперечного сечения у образцов с постоянной массой 1 м² изменялись мало, в то время как у образцов с переменной массой 1 м² эти параметры значительно увеличивались. Это и обусловило характер изменения жесткости бумаги при изгибе с увеличением зольности. У образцов бумаги с постоянной массой 1 м² возрастание зольности вызвало снижение жесткости при изгибе, а с переменной массой — увеличение. Отметим, что гипс, как более грубодисперсный наполнитель, вызывает большее снижение модуля упругости бумаги и жесткости при изгибе в случае постоянной массы 1 м². В случае переменной массы гипс с увеличением зольности образцов способствует значительному возрастанию их толщины, а в результате — жесткости при изгибе. Фракционный состав использованных наполнителей представлен в табл. 11.

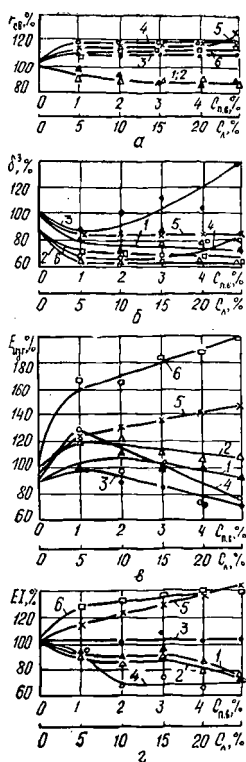
Результаты исследования влияния проклеивающих веществ на жесткость бумаги при изгибе представлены на рис. 19. Для проклейки использовали наиболее широко применяемые вещества — белый канифольный клей, крахмал и хлоропреновый латекс Л-7.

С увеличением концентрации белого канифольного клея в бумаге жесткость ее при изгибе уменьшается, при этом несколько снижается момент инерции поперечного сечения образцов. Величина модуля упругости имеет максимум при массовой доле клея в бумажной массе

Таблица 11

Наполнитель	Фракционный состав наполнителей, %, при диаметре частиц, мкм				
	> 20	10...20	5...10	1...5	< 1
Каолин	2,0	8,2	10,8	27,4	51,4
Гипс	4,0	18,3	24,0	34,7	19,0

Рис. 19. Влияние проклеивающих веществ на физико-механические свойства бумаги из сульфатной (1, 3, 5) и сульфитной (2, 4, 6) беленой целлюлозы; 1, 2 — белый канифольный клей; 3, 4 — латекс Л-7; 5, 6 — картофельный крахмал ($C_{п.в}$ — массовая доля проклеивающего вещества в бумажной массе; $C_{л}$ — доля латекса)



1...2 %, несмотря на то, что межволоконные силы связи с ростом концентрации клея постоянно уменьшаются. Очевидно, это можно объяснить структурными изменениями, связанными с наличием проклеивающего вещества в макро- и микропорах бумаги.

Введение крахмального клейстера способствует увеличению жесткости бумаги при изгибе, что обусловлено значительным возрастанием модуля упругости.

Влияние латекса, который по своей природе является эластомером, на жесткость бумаги при изгибе зависело от вида использованного волокнистого полуфабриката. Жесткость при изгибе бумаги, изготовленной из сульфатной беленой целлюлозы, практически не изменилась даже при введении 25 % латекса. У образцов бумаги из сульфитной беленой целлюлозы жесткость при изгибе снижалась при введении до 10 % латекса, а затем оставалась постоянной.

В работе [3] представлены результаты исследований, которые позволили уточнить и расширить представления об эффективности добавок сульфатного лигнина для упрочнения бумаги. Образцы изготавливали из сульфатной целлюлозы марки НС-2, размолотой до 28 °ШР. Проклейка сульфатным лигнином сопровождалась ростом межволоконных сил связи в бумаге и образованием более плотной структуры бумажного листа. Введение 2 % лигнина обеспечило в данном случае максимальную жесткость при изгибе, определяемую в большей степени величиной модуля упругости при изгибе (рис. 20).

Авторы работы [44] исследовали влияние соединений алюминия на физико-механические свойства бумаги, в том числе и на жесткость при изгибе. Было показано, что введение 5 % алюмината натрия при контактно-конвективной сушке ($t = 200$ °С) в течение 1 мин повышает жесткость при изгибе на 29 %, а в течение 10 мин — на 46 %.

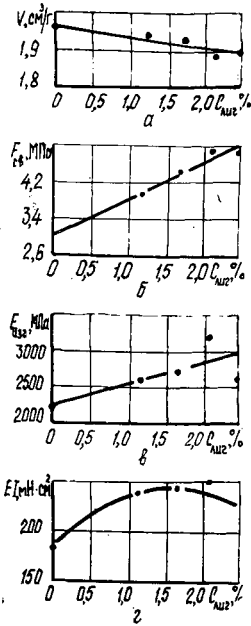


Рис. 20. Влияние сульфатного лигнина на физико-механические свойства бумаги: а — пухлость V ; б — $F_{\text{св}}$; в — $E_{\text{изг}}$ г — EI ($C_{\text{лиг}}$ — массовая доля лигнина)

Для получения некоторых видов бумаги, обладающих пониженной жесткостью, часто применяют пластификаторы. В качестве пластификаторов бумаги обычно используют водные растворы глицерина, сорбита, гликолей и др. Глицерин часто применяют для изготовления упаковочных видов бумаги. На рис. 21 приведены результаты эксперимента по установлению влияния глицерина на жесткость бумаги при изгибе. Пластификаторы уже давно используются в бумажной промышленности, но точный механизм их воздействия на бумагу еще неясен. Однако очевидно, что пластификация является результатом распределения вводимого вещества по границам раздела элементов надмолекулярной структуры. Повышение содержания пластификатора приводит

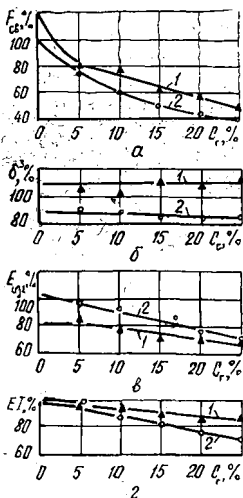


Рис. 21. Влияние пластификатора на физико-механические свойства бумаги из сульфатной небеленой (1) и белой (2) целлюлозы: а — F ; б — δ^3 ; в — $E_{\text{изг}}$; г — EI ($C_{\text{г}}$ — массовая доля глицерина)

к разделению фаз. Такая неоднородность системы должна способствовать понижению механических свойств материала.

С введением пластификатора снижается жесткость бумаги при изгибе, при этом уменьшаются модуль упругости и межволоконные силы связи. Момент инерции поперечного сечения образцов практически остается постоянным.

В работе [39] приведены сведения о влиянии различных видов смол, применяемых для придания бумаге влагопрочности, на жесткость бумаги при изгибе (табл. 12). В ходе испытаний изготавливали образцы бумаги с массой 75 г/м² и степенью помола 35 ± 2 °ШР. Из данных табл. 12 видно, что наибольшее увеличение жесткости наблюдалось у образцов сульфатной небеленой целлюлозы.

Всякое изменение влажности бумаги, изготовленной из растительных волокон, сопровождается изменением ее размеров, что определенным образом должно влиять на жесткость при изгибе. В работе [51] рассмотрена зависимость жесткости картона от влажности. Жесткость при изгибе определяли при помощи динамического резонансного метода. Испытывали 14 видов коробочного картона французского производства, начиная с низкосортного серого макулатурного и кончая высококачественным мелованным. Эксперимент показал, что при изменении относительной влажности воздуха от 30 до 80 % влажность картона возрастает в 2 раза (от 6 до 12 %), толщина образцов повышается в среднем на 6 %, а жесткость уменьшается в среднем на 20 %, в том числе в машинном и поперечном направлениях соответственно на 15 и

Таблица 12

Мас- совая доля смо- лы, %	Жесткость бумаги при изгибе, мН · см ² , при добавке смолы		
	мочевиноформаль- дегидной		мела- мино- формаль- дегид- ной
	анион- ной	катион- ной	
0	41,7	41,7	41,7
	43,6	43,6	43,6
1	49,5	42,7	47,5
	46,6	50,5	59,2
2	50,5	39,8	52,4
	55,4	57,3	56,3
3	49,5	40,8	46,6
	58,2	52,5	72,9
4	56,3	46,6	43,6
	60,0	58,2	75,7
5	51,5	39,8	46,6
	67,0	66,0	74,9
6	53,4	40,8	54,4
	71,8	73,8	80,6
8	55,4	41,7	52,5
	77,6	63,1	76,7
10	57,2	47,6	51,5
	71,1	—	—

Таблица 13

СП, °ШР	t, °C	F _{св'} МПа	δ, см	E _l × мН × см ²	E _{изг.} МПа
12	60	0,19	0,0154	93	2050
	70	0,26	0,0152	106	2416
	80	0,35	0,0150	105	2468
	90	0,29	0,0144	71	1922
25	60	1,52	0,0102	58	4335
	70	1,28	0,0108	62	3953
	80	1,57	0,0122	53	2348
	90	1,88	0,0110	59	5384
35	60	1,46	0,0089	36	4096
	70	1,38	0,0108	58	3667
	80	1,59	0,0127	55	2131
	90	1,54	0,0102	57	4238
60	60	1,24	0,0099	58	4849
	70	1,44	0,0092	60	6066
	80	1,57	0,0095	54	5103
	90	1,53	0,0087	46	5515

Примечание. В числителе приведены данные для сульфитной беленой целлюлозы; в знаменателе — для сульфатной.

24 %. Исследованию подвергали также образцы картона, которые предварительно кондиционировали при 80 % относительной влажности и температуре 20 °С. Затем их выдерживали при той же относительной влажности, начиная с большей. Авторы приходят к следующим выводам: при снижении влажности воздуха уменьшаются влажность и толщина картона и повышается его жесткость; при ее повышении увеличиваются толщина и влажность картона, но при этом снижается его жесткость. Резкое повышение влажности воздуха делает процесс изменений необратимым. При установлении первоначальной влажности физические свойства картона несколько изменятся, т. е. не будут идентичны начальным.

В работе [20] оценено влияние комплекса факторов изготовления образцов бумаги в лабораторных условиях, в том числе продолжительности взаимодействия целлюлозы с водой. Сульфатную небеленую целлюлозу концентрацией около 20 % хранили при температуре 20 °С в течение 240 ч. Пробы для изготовления образцов и испытаний отбирали через каждые 24 ч. Кривые, характеризующие изменение жесткости при изгибе, имеют положительный экстремум в области 120...192 ч взаимодействия, а их ход зависит от степени помола волокна.

Технологические процессы. Получение товарной сульфатной небеленой целлюлозы включает производственные процессы, при реализации которых сырье, а затем целлюлозная суспензия подвергаются активным физико-химическому, механическому и тепловому воздействиям [21, 23, 34]. В работе [34] показана зависимость характеристик деформативности и прочности целлюлозы от размеров (длина, толщина) щепы различных фракций. Если расположить характеристики физико-механических свойств целлюлозы в порядке возрастания воздействия на них характеристик качества щепы, то получим следующий ряд: сопротивление продавливанию; сопротивление раздиранию; жесткость при изгибе; начальный модуль упругости при испытании на растяжение; разрушающее усилие; разрушающее напряжение; разрывная длина. Отмечено, что вариация длины щепы оказывает большое воздействие на изменение жесткости при изгибе.

Известно, что охлаждение массы в нижней части варочного котла непрерывного действия, которое прекращает или сильно тормозит химические реакции перед дальнейшим механическим воздействием при выгрузке, позволяет сохранить физико-механические свойства целлюлозы. В табл. 13 представлены результаты эксперимента, при проведении которого температура массы, выгружаемой из аппарата «Камюр», составляла 90, 80, 70, 60 °С [23]. Наибольшая величина жесткости при изгибе для всех исследуемых степеней помола наблюдалась у образцов сульфатной небеленой целлюлозы из массы, выгруженной при температуре 70 °С. Отмечена следующая тенденция — величина межволоконных сил связи в образцах снижается с уменьшением температуры выгружаемой массы. Это является косвенным свидетельством увеличения прочности (очевидно и жесткости) отдельных волокон целлюлозы, которое можно объяснить меньшей деструкцией последних при выгрузке из варочного аппарата. Интеграция двух факторов — жесткости волокна и достаточной величины межволоконных сил связи, обуславливают в этом случае максимальную жесткость при изгибе.

В табл. 14 представлены экспериментальные данные изменения жесткости при изгибе образцов сульфатной небеленой целлюлозы в технологическом потоке ее производства [21]. Закономерность изменения жесткости при изгибе в этом случае определяется степенью помола волокна. Для образцов со степенью помола 60 °ШР закономерность изменения жесткости при изгибе была подтверждена и в более поздней работе [24]. Процессы промывки, сортирования и сушки оказывают

Таблица 14

Место отбора пробы	$l_{\text{ср}}$, мм	СП, °ШР	$F_{\text{св}}$, МПа	δ , см	EI , мН·см ²	$E_{\text{изг}}$, МПа
После варки	2,51	15	0,95	0,0175	212	3165
		25	2,14	0,0131	98	3470
		35	2,36	0,0122	87	3841
		60	2,48	0,0119	110	5246
После промывки	2,74	15	0,76	0,0158	135	2732
		25	1,89	0,0115	99	5197
		35	2,24	0,0120	82	3810
		60	2,50	0,0122	138	6070
После сортирования	2,16	15	0,96	0,0161	174	3341
		25	2,08	0,0133	116	3908
		35	2,38	0,0140	97	2834
		60	2,52	0,0128	101	3834
После сушки	1,71	15	0,56	0,0192	169	1925
		25	2,00	0,0115	87	4586
		35	2,16	0,0135	126	4101
		60	2,33	0,0132	129	4483

Таблица 15

Материал	Образец	EI , мН·см ²	$E_{\text{изг}}$, МПа
Полуфабрикат	Основного слоя	664	2450
	Двухслойный	1043	2700
Бумажная масса после РПО	Основного слоя	671	3000
	Двухслойный	1083	3750
Масса из напорного ящика КДМ	Основного слоя	646	3200
	Двухслойный	1037	3800
Картон: машинного направления поперечного »	Двухслойный	1675	3250
	Двухслойный	565	1750

Таблица 16

Температура обработки отходов, °С	Процент отходов в композиции	Массовая доля, %	
		ТММ	ДММ
80	10	27 ... 30/25 ... 40	63 ... 60/65 ... 50
80	20	— /24 ... 34	— /56 ... 46
80	30	— /35	— /35
130	10	23 ... 30/3 ... 13	67 ... 60/87 ... 77
130	20	15 ... 23/3 ... 35	65 ... 57/77 ... 45
130	30	13 ... 60/85 ... 44	57 ... 10/35 ... 26

Примечание. В числителе приведены данные оптимизации по прочности, в знаменателе — по деформативности.

сильное влияние на относительное содержание фракции с различной длиной волокна и на состояние поверхности волокна, что и обуславливает величину жесткости при изгибе.

В работе [7] проанализировано влияние процессов производства в технологическом потоке картоноделательной машины на деформатив-

ность и прочность картона для гладких слоев гофрированного картона. В табл. 15 показано изменение жесткости при изгибе образцов, отобранных в технологическом потоке. Авторы делают вывод, что свойства покровного слоя, несмотря на относительно невысокую его массовую долю, во многом определяют деформативность картона.

В работе [31] показано, что при оптимизации свойств газетной бумаги по характеристикам прочности или деформативности (в том числе и жесткости при изгибе) композиция по волокну должна быть разной (табл. 16).

Результаты исследований влияния различных факторов на жесткость целлюлозно-бумажных материалов при изгибе можно обобщить следующим образом.

1. Изменение модуля упругости при изгибе и момента инерции поперечного сечения образца оказывают конкурирующее влияние на величину жесткости при изгибе.

2. Величина жесткости при изгибе определяется в большей степени модулем упругости образца при изгибе в случаях использования целлюлозы различного вида; увеличения зольности бумаги; проклейки связующими веществами; введения пластификатора; сушки; увеличения степени ориентации волокна и степени дисперсности фракций с различной длиной волокна у целлюлозы.

3. Момент инерции поперечного сечения образца оказывает решающее значение на жесткость при изгибе в случаях размола волокна; увеличения массы 1 м^2 , давления мокрого прессования, зольности бумаги при постоянном содержании волокна в композиции; проклейки гидрофобными материалами; повышения жесткости отдельного волокна; увеличения степени дисперсности фракции с различной длиной волокна у механических масс.

4. Установлено, что технологические факторы по разному влияют на характеристики деформативности и прочности.

В заключение отметим, что нами в 1993 г. [15] был опубликован обзор по вопросам механических свойств целлюлозно-бумажных материалов, в котором главное внимание уделялось статическим характеристикам, определяющим свойства материала при приложении растягивающей нагрузки. На практике бумага часто испытывает и деформации изгиба. В данном случае нами была предпринята попытка изложить в обобщенном виде сведения об используемых в настоящее время методах определения жесткости при изгибе технической целлюлозы, бумаги и картона и влиянии основных технологических факторов на величину этой характеристики.

Использование бумаги сопровождается многими сложными явлениями, для понимания которых необходимы исследования динамических свойств материала (ползучести, релаксации напряжений, способности выдерживать ударные и повторяющиеся нагрузки и др.). Для их изучения и интерпретации настоящая работа может принести определенную пользу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аким Э. Л. Обработка бумаги.— М.: Лесн. пром-сть, 1979.— 232 с. [2]. Бабурин С. В., Киприанов А. И. Реологические основы процессов целлюлозно-бумажного производства.— М.: Лесн. пром-сть, 1983.— 192 с. [3]. Влияние проклейки сульфатных лигнинов на физико-механические свойства бумаги / А. Ф. Троянская, А. А. Соколова, И. П. Барабанова, В. И. Комаров // Бум. пром-сть.— 1984.— № 11.— С. 18—19. [4]. ГОСТ 9582—75. Бумага и картон. Метод определения жесткости при статическом изгибе.— Введ. 01.01.77; Продлен до 01.01.97. [5]. ГОСТ 10711. Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца.— Введ. 01.01.74; Продлен до 01.01.2001. [6]. Грант Ю. Лабораторный справочник по производству целлюлозы и бумаги.— М.: Лесн. пром-сть, 1965.— 421 с. [7]. Гурьев А. В., Комаров В. И., Чижов Г. И. Формирование характеристик деформатив-

ности и прочности в технологическом потоке КДМ // Лесн. журн.—1994.—№ 1.—С. 86—91.—(Изв. высш. учеб. заведений). [8]. Ерыхов Б. П. Неразрушающие методы исследования целлюлозно-бумажных и древесных материалов.—М.: Лесн. пром-сть, 1977.—246 с. [9]. Жесткость бумаги. Часть 1. Субъективные оценки жесткости и определение жесткости по Кларку / М. Ода, Т. Кадоя, М. Усуда, М. Кимура // Ками па гикеси.—1979.—Т. 33, № 3.—С. 35—40. [10]. Жесткость бумаги. Часть 2. Влияние различных факторов на жесткость / М. Ода, Т. Кадоя, М. Усуда, М. Кимура // Ками па гикеси.—1979.—Т. 33, № 4.—С. 76—82. [11]. Иванов Г. А. Исследование изменений свойств бумаги в процессе ускоренного термического старения: Дис. ... канд. техн. наук.—Л.: ЛТА, 1973.—148 с. [12]. Изменение свойств древесных волокон в процессе производства термомеханической массы / Г. И. Чижов, Е. П. Елкина, С. С. Пузырев и др. // Лесн. журн.—1988.—№ 4.—С. 84—89.—(Изв. высш. учеб. заведений). [13]. ИСО 9001—87. Системы качества. Модель для обеспечения качества при проектировании и (или) разработке, производстве, монтаже и обслуживании.—М.: Изд-во стандартов, 1988.—С. 13—25. [14]. Казаровицкий Л. А. Бумага и краска в процессе печатанья.—М.: Книга, 1965.—240 с. [15]. Комаров В. И. Анализ зависимости напряжение—деформация при испытании на растяжение целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн.—1993.—№ 2—3.—С. 123—131.—(Изв. высш. учеб. заведений). [16]. Комаров В. И., Дьяков Н. А. Влияние жесткости при изгибе исходных волокон на жесткость бумаги при изгибе / Химическая переработка древесины: Науч. тр.—Л.: РИО ЛТА, 1972.—152.—С. 39—43. [17]. Комаров В. И. Деформативность целлюлозно-бумажных материалов при изгибе // Лесн. журн.—1994.—№ 1.—С. 96—103.—(Изв. высш. учеб. заведений). [18]. Комаров В. И. Исследование жесткости бумаги при изгибе: Дис. ... канд. техн. наук.—Л., ЛТА.—1972.—160 с. [19]. Комаров В. И. К вопросу измерения модуля упругости бумаги // Химическая переработка древесины: Науч. тр. № 152.—Л.: ЛТА, 1972.—С. 62...66. [20]. Комаров В. И., Личутина Т. Ф. Лабораторная оценка физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы // Лесн. журн.—1985.—№ 6.—С. 85—90.—(Изв. высш. учеб. заведений). [21]. Комаров В. И., Личутина Т. Ф., Легкодух Н. Г. Изменение физико-механических свойств целлюлозы в производственных процессах ее получения // Хим. переработка древесины: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: РИО ЛТА, 1982.—С. 64—68. [22]. Комаров В. И., Личутина Т. Ф. Оценка качества сульфатной небеленой целлюлозы // Бум. пром-сть.—1984.—№ 8.—С. 11—12. [23]. Комаров В. И., Личутина Т. Ф., Пахтусова В. П. Влияние температуры целлюлозы, выгружаемой из аппарата «Камюр», на ее физико-механические свойства // Химическая переработка древесины: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: РИО ЛТА, 1982.—С. 61—64. [24]. Комаров В. И., Личутина Т. Ф. Формирование физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы в процессе производства // Бум. пром-сть.—1985.—№ 3.—С. 15—17. [25]. Комаров В. И. Опыт по уточнению методики работы на приборе ЖБИ-1 // Химия и технология бумаги: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: РИО ЛТИ ЦБП, 1975.—Выпуск 3.—С. 7—9. [26]. Комаров В. И., Прокшин Г. Ф. Бумагообразующие свойства сульфатной целлюлозы из опилок древесины // Прокшин Г. Ф. Основы теории варки целлюлозы: Конспект лекций.—Л.: РИО ЛТА, 1979.—С. 35—41. [27]. Комаров В. И., Фляте Д. М. Влияние степени ориентации волокон и разносторонности бумаги на ее жесткость при изгибе // Целлюлоза, бумага и картон.—1972.—№ 18.—С. 8—9. [28]. Комаров В. И., Фляте Д. М. Жесткость бумаги при изгибе // Бум. пром-сть.—1973.—№ 6.—С. 3—4. [29]. Комаров В. И., Фляте Д. М. Определение жесткости бумаги при изгибе // Целлюлоза, бумага и картон.—1971.—№ 30.—С. 11—13. [30]. Комаров В. И., Чижов Г. И., Пузырев С. С. Деформативность механической массы // Бум. пром-сть.—1989.—№ 10.—С. 14—15. [31]. Комаров В. И., Чижов Г. И., Пузырев С. С. Оптимизация композиции по волокну газетной бумаги для получения заданных величин характеристик деформативности и прочности // Бум. пром-сть. Специальное приложение.—1990.—С. 62—67. [32]. Король П. В. Увеличение содержания макулатуры в коробочном картоне хром-эрац: Дис. ... канд. техн. наук.—Л.: ЛТА, 1986.—180 с. [33]. Легоцкий С. С., Лаптев Л. Н. Размол бумажной массы.—М.: Лесн. пром-сть, 1981.—93 с. [34]. Личутин А. Ф., Комаров В. И. Влияние размеров щепы на стабильность физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы // Целлюлоза, бумага и картон: Экспресс-инф.—М.: ВНИПИЭИлеспром, 1988.—Вып. 10.—С. 2—15. [35]. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов.—М.: Мир, 1970.—443 с. [36]. Маркочев В. М. Испытания материалов и системный подход к проблеме прочности // Завод. лаборатория.—1987.—№ 6.—С. 57—63. [37]. Основные представления о волокнах, применяемых в бумажной промышленности: Материалы симпозиума в г. Кембридж, 1957.—М.: Гослесбумиздат, 1962.—500 с. [38]. Пановко Я. Г. К расчету деревянных изгибаемых элементов с учетом пластических деформаций в сжатой зоне // Тр. МАДИ.—1937.—№ 7.—С. 78—91. [39]. Смирнова Е. А. Исследование условий применения мочевино-фирмально-дегидных смол для приготовления влагопрочной бумаги: Дис. ... канд. техн. наук.—Л.: ЛТА, 1973.—160 с. [40]. Фляте Д. М., Комаров В. И. Влияние некоторых