

# ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КАРТОНА-ЛАЙНЕРА ПРИ ИЗГИБЕ

## BENDING DEFORMATION PROPERTIES OF LINERBOARD



**Я.В. Казаков**

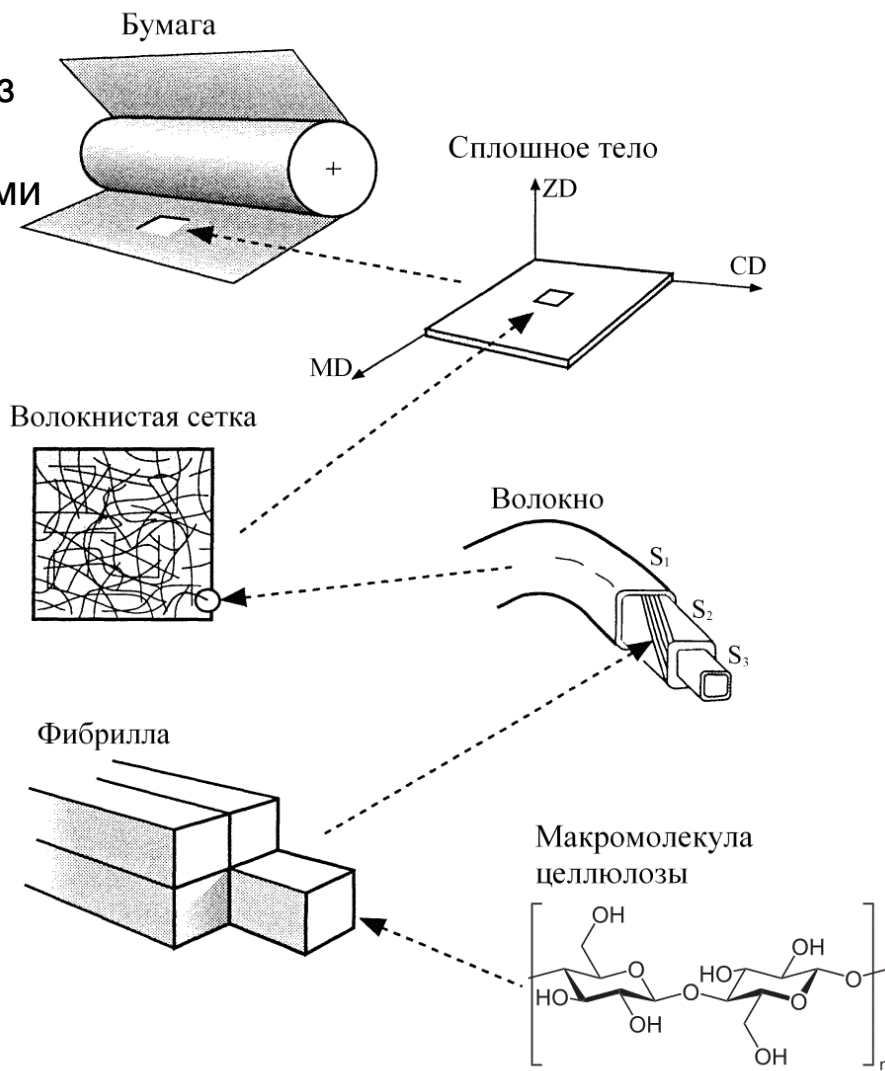
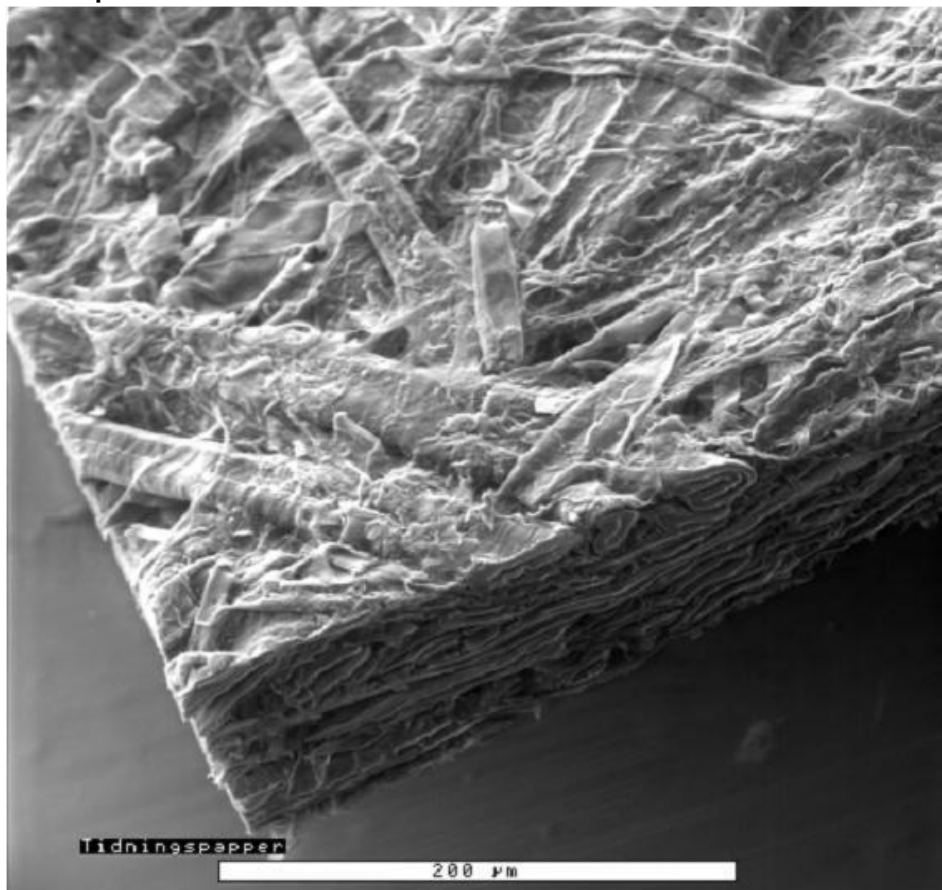
**Yakov Kazakov**

**СЕВЕРНЫЙ  
(АРКТИЧЕСКИЙ)  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**



# Бумага как материал

По принятому в отрасли определению, **бумага – это капиллярно-пористый материал в виде тонкого листа**, состоящий преимущественно из растительных волокон, беспорядочно переплетенных и связанных между собой силами поверхностного сцепления.



Деформативность картона-лайнера при изгибе

## Работы профессора В.И. Комарова по исследованию жесткости при изгибе бумаги и картона

- Комаров В.И. Исследование жесткости бумаги при изгибе: дис....канд. техн. наук. Л., 1972. 160 с.
- Комаров В.И. Деформативность целлюлозно-бумажных материалов при изгибе // Лесн. журн. 1994. №1. С. 96–103 (Изв. высш. учеб. заведений).
- Комаров В.И. Жесткость при изгибе целлюлозно-бумажных материалов. Анализ методов измерения и влияния технологических факторов // Лесн. журн. 1994. №3. С. 133–142 (Изв. высш. учеб. заведений).
- Комаров В.И. Деформативность целлюлозно-бумажных материалов: дис.... д-р. техн. наук / Комаров Валерий Иванович. С.Пб., 1999. 56 с.
- Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск: Изд-во Архан. гос. техн. ун-та, 2002. 440 с.
- Комаров В.И., Ларина Е.Ю. Расчет жесткости при изгибе волокнистых целлюлозно-бумажных материалов с учетом пластической деформации в сжатой зоне в плоскости листа // Лесн. журн. 2009. №4. с. 106–110. (Изв. высш. учеб. заведений)
- Ларина Е.Ю., Комаров В.И. Влияние пластических деформаций по толщине и в плоскости листа бумаги, возникающих при испытании на изгиб, на величину измеряемой характеристики // Лесн. журн. 2010. №4. с. 89–95. (Изв. высш. учеб. заведений)





# Жесткость картона при изгибе

Является важной характеристикой для предотвращения деформации картонной коробки под воздействием содержимого, за счёт чего снижается несущая способность картонной коробки.

Это может произойти:

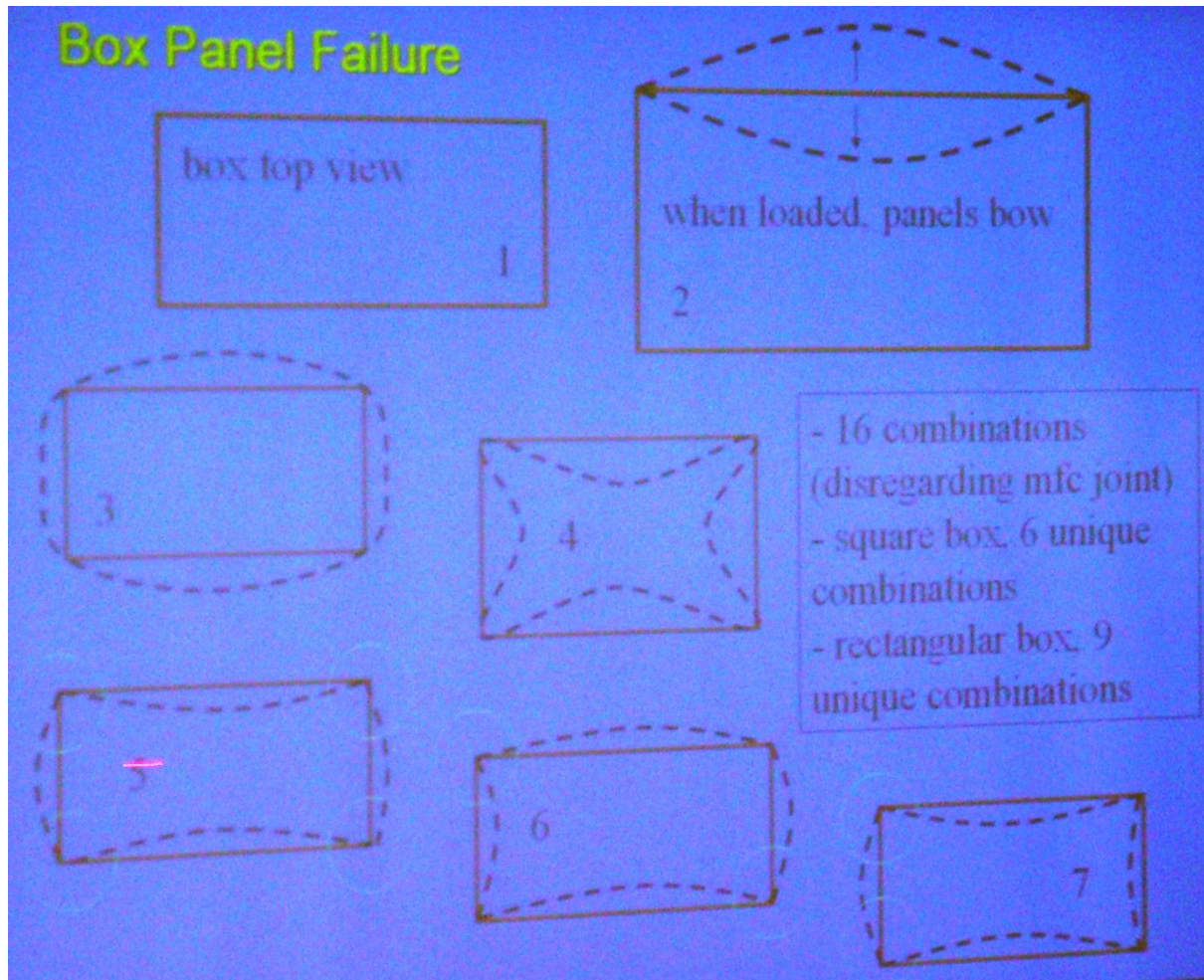
- при затаривании продукции;
- при укладке коробок в штабеля;
- при хранении затаренной продукции в штабелях;
- прогиб стенки ящика может вызвать трудности при автоматизированном складировании.

В целом жесткость картонной тары – одно из основных требований, выполнение которого является важным условием эксплуатации картонной и бумажной тары



Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Деформация изгиба стенок гофроящика под действием сжимающей нагрузки



## DEPENDENCIES OF CORRUGATED CONTAINER LIFETIME ON COMPONENT PROPERTIES

Roman E. Popil, Michael K. Schaepe\*

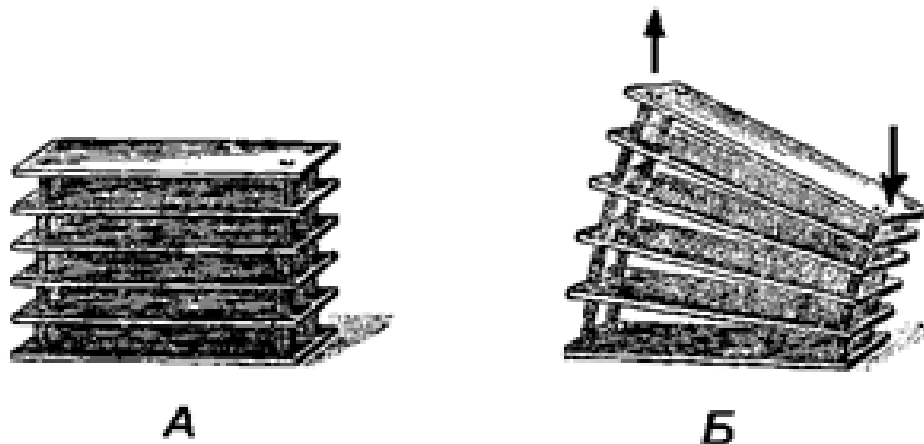
*Institute for Paper Science and Technology*

*Georgia Institute of Technology  
 Atlanta, Georgia 30332*

*Progress in Paper Physics Seminar,  
 2008  
 Helsinki*

Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Деформация изгиба

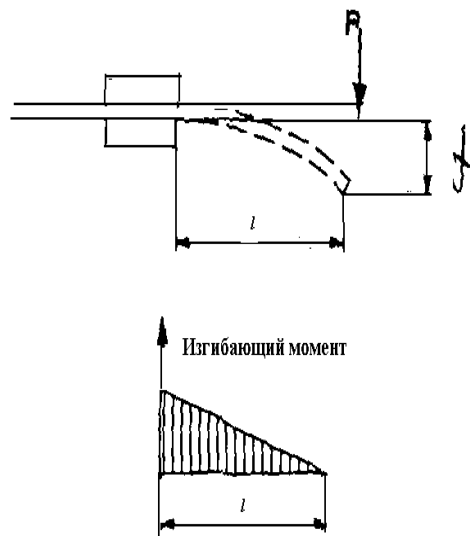


Изгиб получаем, наклонив верхнюю пластину (Б). При этом расстояния между соседними пластинами в различных местах изменяются по-разному. С одной стороны они увеличиваются, с другой - уменьшаются. Таким образом, **деформация изгиба сводится к растяжениям и сжатиям, различным в разных частях тела – неоднородному растяжению и сжатию.**

Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск: Изд-во Архан. гос. техн. ун-та, 2002. 440 с.

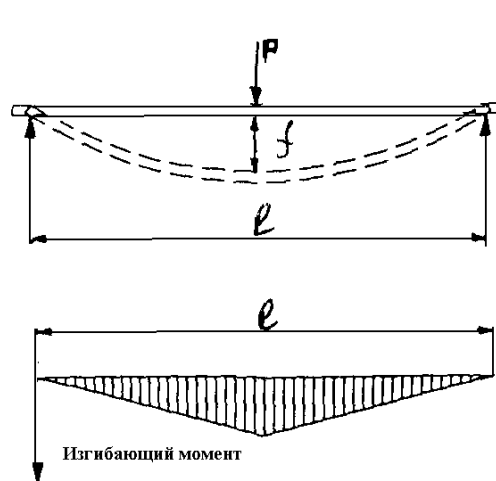
# Методы испытания на изгиб

Двухточечный



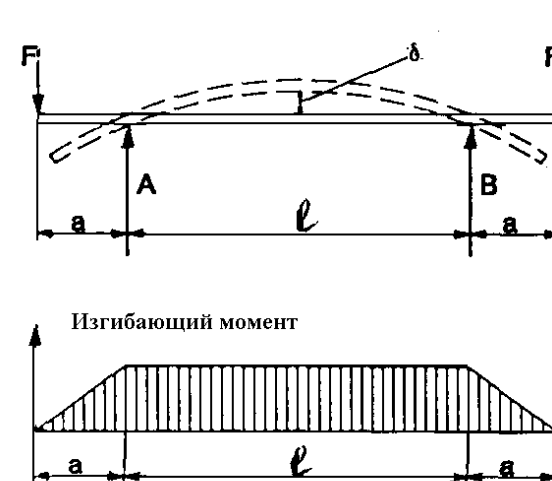
$$S_b = \frac{Pl^3}{3 \cdot f \cdot b}$$

Трехточечный



$$S_b = \frac{Fl^3}{48 \cdot \gamma \cdot b}$$

Четырехточечный



$$S_b = \frac{P \cdot a \cdot l^2}{8 \cdot f \cdot b}$$

Принцип нагружения и распределения изгибающего момента



# Испытание на изгиб

Определение сопротивления бумаги изгибу ГОСТ ISO 2493–96.

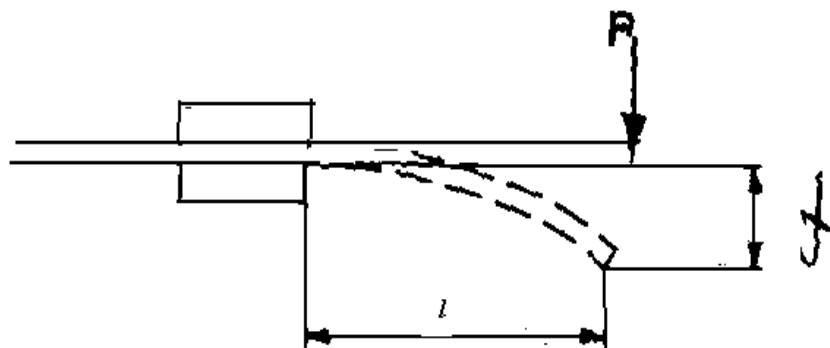
**Стандартный метод:** определение силы, приложенной к свободному концу консольно-закрепленного образца и изгибающей его на определенный угол

При выполнении испытаний и обработке результатов используются следующие определения:

- **сопротивление изгибу** – сила, необходимая для сгибания под углом  $15^\circ$  прямоугольного консольно закрепленного образца, приложенная вблизи свободного конца испытуемого образца на расстоянии 50 мм от линии его закрепления перпендикулярно к плоскости, определяемой закрепленным концом образца и точкой или линией приложения силы, в ньютонах (Н) или миллиньютонах (мН);
- **длина изгиба** – постоянное радиальное расстояние между линией закрепления образца и точкой приложения силы к нему;
- **угол изгиба** – угловое расстояние между начальным положением плоскости, проходящей через линию закрепления и линию приложения силы, и положением той же плоскости в конце испытания;
- **свободная длина** – начальная длина части испытуемого образца, выступающего из зажимного устройства.



# Принцип нагружения и распределения изгибающего момента для двухточечного метода

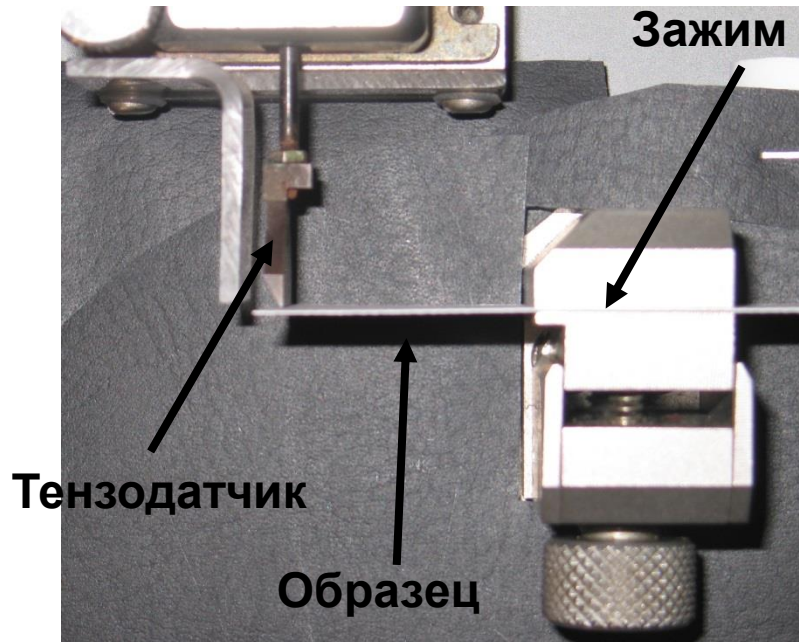
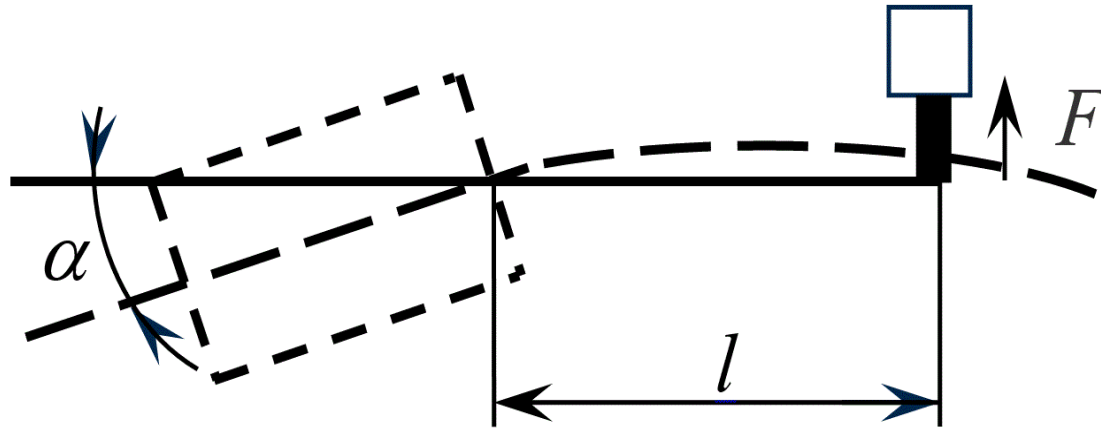


Сущность метода заключается в измерении силы, приложенной к свободному концу консольно закрепленного образца на постоянном расстоянии от линии закрепления и изгибающей его на определенный угол.



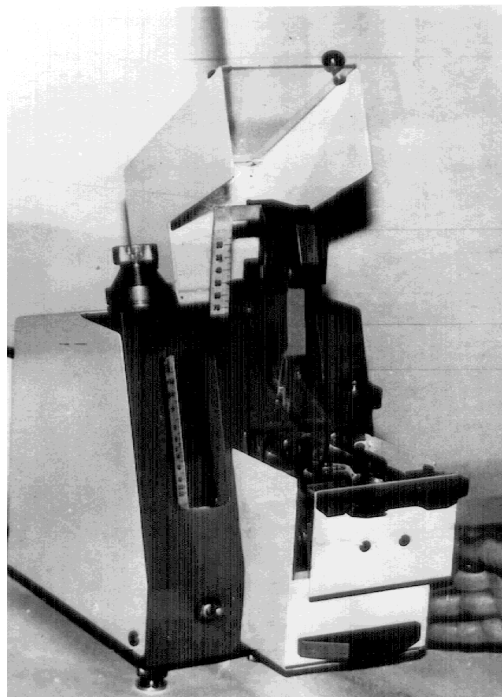
Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Принцип приложения нагрузки при 2-х точечном методе испытания на изгиб



Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Приборы для измерения жесткости при изгибе бумаги и картона по двухточечному методу



ЖБИ-1



«Messmer Buchel Stiffness Tester 116-BD»



Модернизированный «Messmer Buchel Stiffness Tester 116-BD»



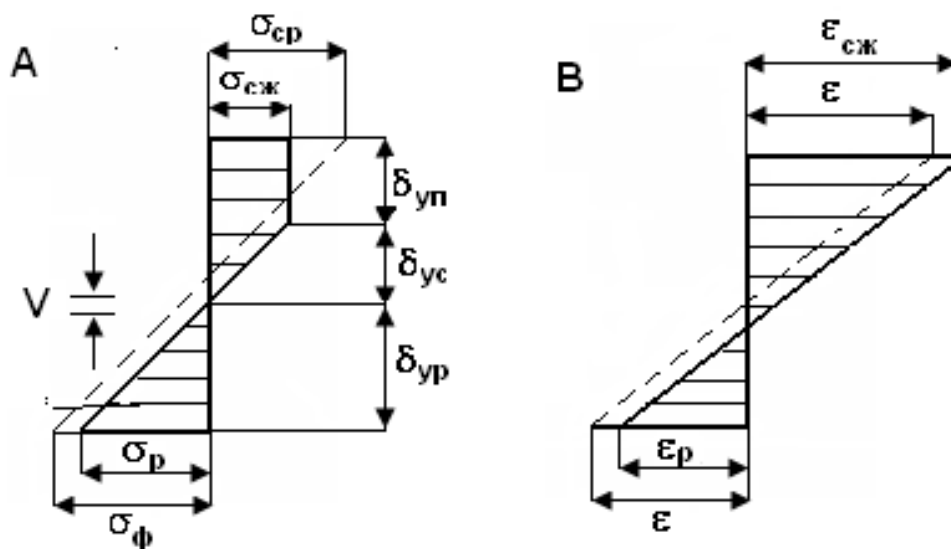
прибор для определения сопротивления изгибу «ИТС 7003»

Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Бумага как упруго-вязко-пластический материал

Бумага является упруго-вязко-пластическим материалом, в котором при приложении нагрузки возникают не только упругие, но и пластические деформации, которые при испытании образцов на жесткость при изгибе не учитываются

Известно, что такой материал при изгибе в растянутой зоне поперечного сечения стержня работает упруго вплоть до разрыва крайних волокон, а в сжатой зоне - упруго-пластически

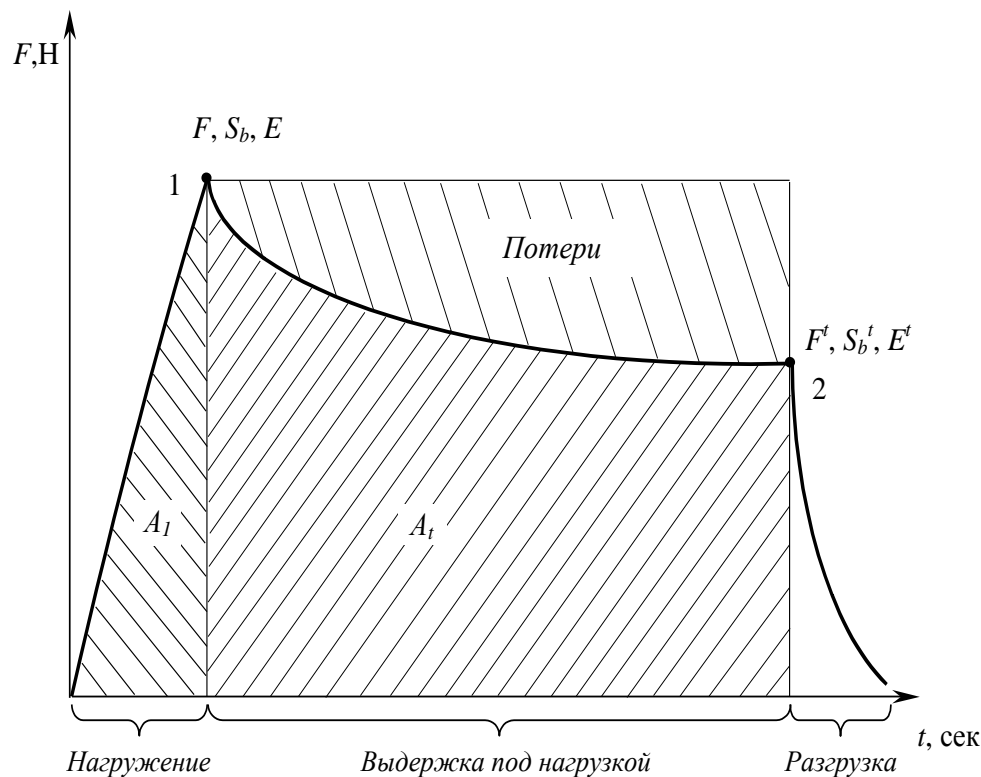


Графоаналитический метод определения деформаций при изгибе с учетом пластических деформаций

Комаров В.И. Жесткость при изгибе целлюлозно-бумажных материалов. Анализ методов измерения и влияния технологических факторов // ИВУЗ. Лесной журнал. 1994. №3. С. 133–142.



# Принцип определения характеристик вязкоупругости бумаги и картона при изгибе



Прибор регистрирует кривую изменения нагрузки на датчик во времени.

При обработке кривой рассчитываются:

- нагрузка  $F$ ;
  - жесткость при изгибе  $S_b$ ;
  - модуль упругости  $E$ ;
- в точке максимальной нагрузки (т.1)  
в точке снятия нагрузки (т.2),
- работа нагружения  $A_1$ ;
  - работа релаксации  $A_t$ ;
  - потери  $Q$ .

Деформативность картона-лайнера при изгибе

Казиков Я.В., Комаров В.И. Математическая обработка кривых зависимости "напряжение - деформация", полученных при испытании целлюлозно-бумажных материалов на растяжение // Лесн. журн. – 1995. – №1. – С.109-114. (Изв. высш. учеб. заведений).

# Вычисления производятся по формулам

**Жесткость при изгибе  $S_b$ , Н·м:**

$F$  – регистрируемая датчиком нагрузка, мН;  
 $l$  – активная длина образца, мм;  
 $\alpha$  – угол изгиба образца, град;  
 $b$  – ширина образца мм.

$$S_b = \frac{F \cdot l^2}{3 \sin \alpha \cdot b}$$

**Модуль упругости  $E$ , МПа:**

$\delta$  – толщина образца, мкм

$$E = \frac{S_b \cdot 12}{\delta^3}$$

**Работа нагружения  $A_1$**

$$A_1 = \int_0^{t_1} F dt$$

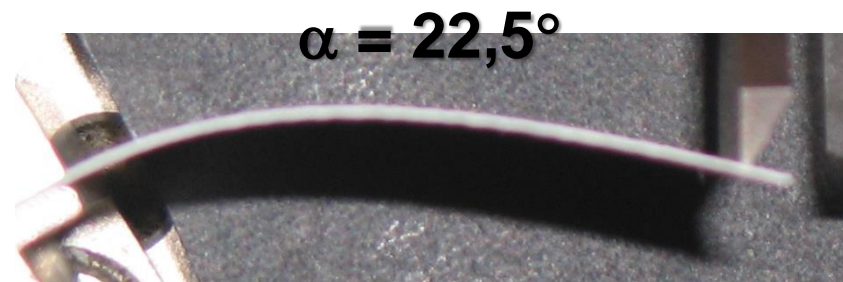
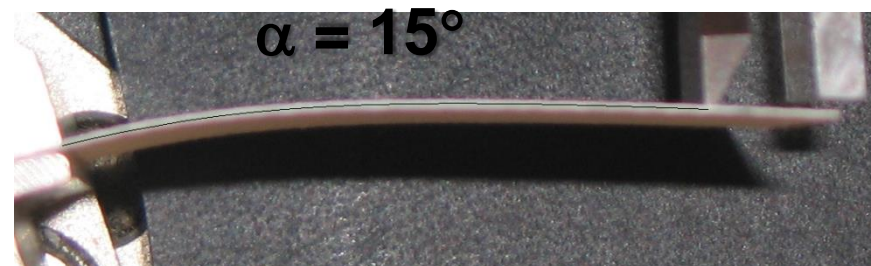
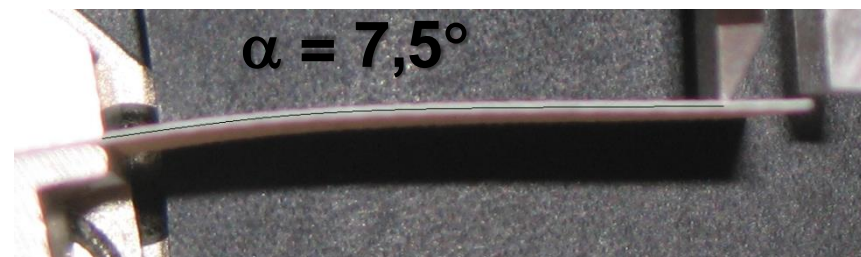
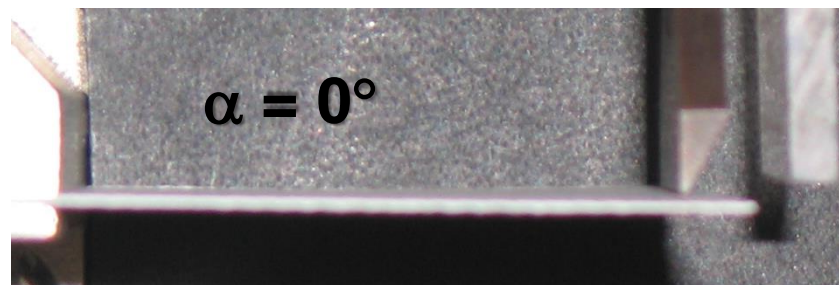
**Работа при выдержке  $A_t$ :**

$$A_t = \int_{t_1}^{t_2} F dt$$

**Потери жёсткости  $Q$ , %:**

$$Q = \frac{F(t_2 - t_1) - A_t}{F(t_2 - t_1)} \cdot 100 \%$$

# Изгиб образца в процессе испытания



Длина образца – 25 мм



Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Долговременная (усталостная) жесткость

Применяемые в отрасли стандартные методы измерения жесткости картона и бумаги при изгибе предусматривают **кратковременное нагружение** образца, при котором его деформация не превышает предела упругости при изгибе

При эксплуатации изделий из картона, реальные нагрузки могут быть существенно выше и действовать длительное время, например, при транспортировке и хранении затаренной в коробки продукции.

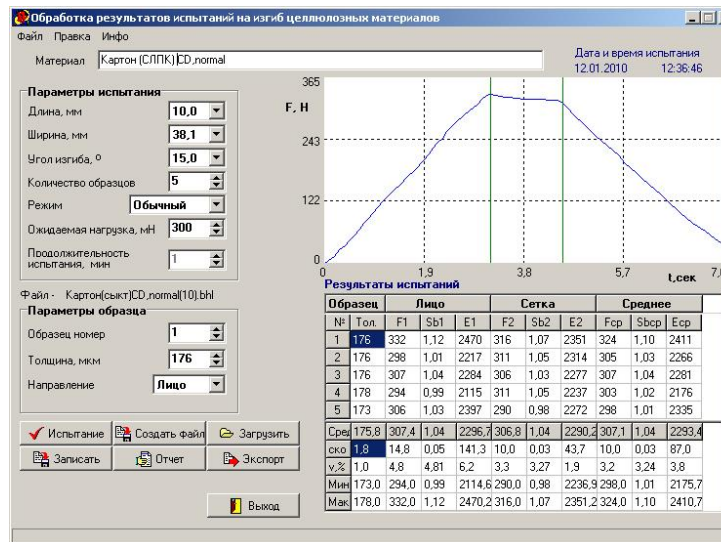
В этих условиях речь должна идти уже о **долговременной или усталостной жесткости** и о необходимости учета релаксационных процессов в структуре картона как вязкоупругопластического материала, поскольку на результат оказывают влияние пластические деформации, возникающие в образце при его изгибе.



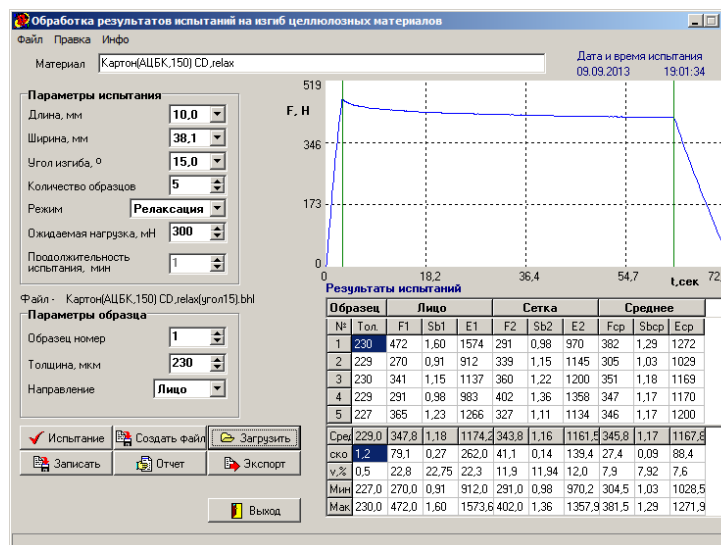
# ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для оценки деформативности целлюлозно-бумажных материалов при изгибе

Результат единичного испытания в стандартном режиме



Результат единичного испытания в режиме релаксации



Деформативность картона-лайнера при изгибе

Свид. № 2010612795 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для обработки результатов испытаний на изгиб целлюлозно-бумажных материалов (Stiffness). / Я.В. Казаков, Д.Г. Чухчин, Е.Ю. Ларина, В.И. Комаров; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ (RU). – № 2010610990; заявл. 02.03.2010; опубл. 23.04.2010, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с..

# Отчет о результатах испытания на изгиб

Результаты испытаний

Результаты испытания образцов на изгиб на приборе Messmer Buchel

Образец - Картон (АЦБК, 125) CD, normal  
 Дата и время - 05.09.2021 ; 23:31:25  
 Размеры образца: Длина - 10 мм, Ширина - 38,1 мм  
 Угол изгиба - 15,0 град  
 Режим испытания - Обычный  
 Данные хранятся в файле - Картон(АЦБК,125) CD,normal(10).bhl

Направ- ление	Характе- ристика	Образец					Статистика					
		1	2	3	4	5	Среднее	Ско	v, %	Мин.	Макс.	
	Толщ, мм	165	171	173	173	167	169,8	3,6	2,1	165,0	173,0	
Лицо	F, Н	183	219	170	234	191	199,4	26,4	13,2	170,0	234,0	
	Sb, Н*м	0,62	0,74	0,57	0,79	0,65	0,67	0,09	13,23	0,57	0,79	
	Eи, МПа	1652	1777	1332	1833	1663	1651,5	194,3	11,8	1331,8	1833,2	
	A1, мДж	236	323	241	383	297	295,8	61,1	20,6	235,8	382,9	
	At, мДж	388	389	309	287	260	327	59,1	18,1	260	389	
	Ft, Н	178	212	165	227	182	192,8	25,7	13,3	165,0	227,0	
	Sbt, Н*м	0,60	0,72	0,56	0,77	0,62	0,65	0,09	13,34	0,56	0,77	
	Et, МПа	1607	1720	1293	1778	1585	1596,7	187,7	11,8	1292,7	1778,4	
	Потери, %	----	----	----	18,8	9,5	14,1	6,6	46,7	----	18,8	
	Tau	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Сетка	F, Н	181	146	154	134	160	155,0	17,5	11,3	134,0	181,0	
	Sb, Н*м	0,61	0,49	0,52	0,45	0,54	0,52	0,06	11,29	0,45	0,61	
	Eи, МПа	1634	1184	1206	1050	1394	1293,7	226,4	17,5	1049,8	1634,4	
	A1, мДж	248	237	238	206	233	232,4	16,1	6,9	205,5	248,2	
	At, мДж	179	198	196	182	280	207	41,6	20,1	179	280	
	Ft, Н	175	138	147	129	154	148,6	17,5	11,8	129,0	175,0	
	Sbt, Н*м	0,59	0,47	0,50	0,44	0,52	0,50	0,06	11,78	0,44	0,59	
	Et, МПа	1580	1120	1152	1011	1341	1240,7	224,1	18,1	1010,6	1580,2	
	Потери, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Save
Print
OK

Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Текущие характеристики кривой – количественные параметры кинетики деформирования при изгибе

Картон(АЦБК,125) CD,normal(10).txt — Блокнот

Файл П\_равка Ф\_ормат В\_ид С\_правка

Данные, полученные при испытании образцов на изгиб на приборе Messmer Buchel

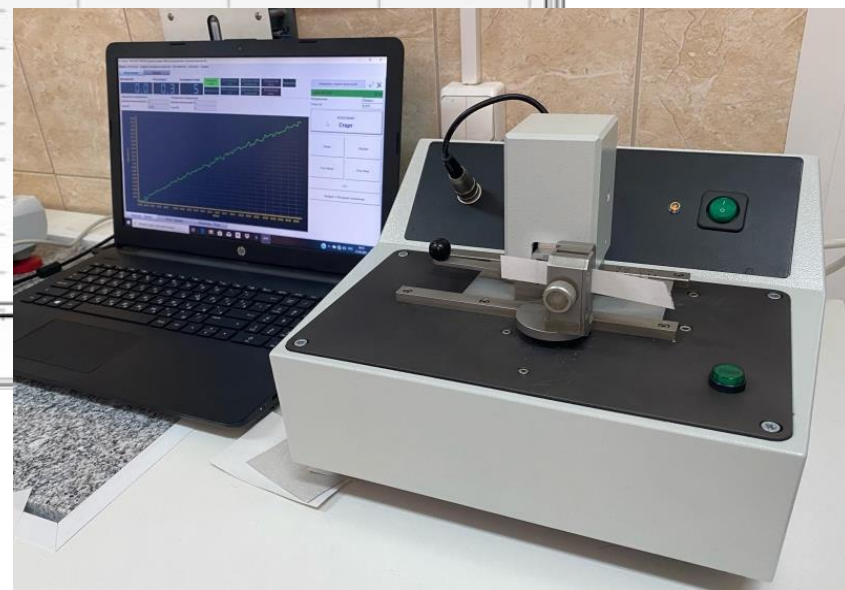
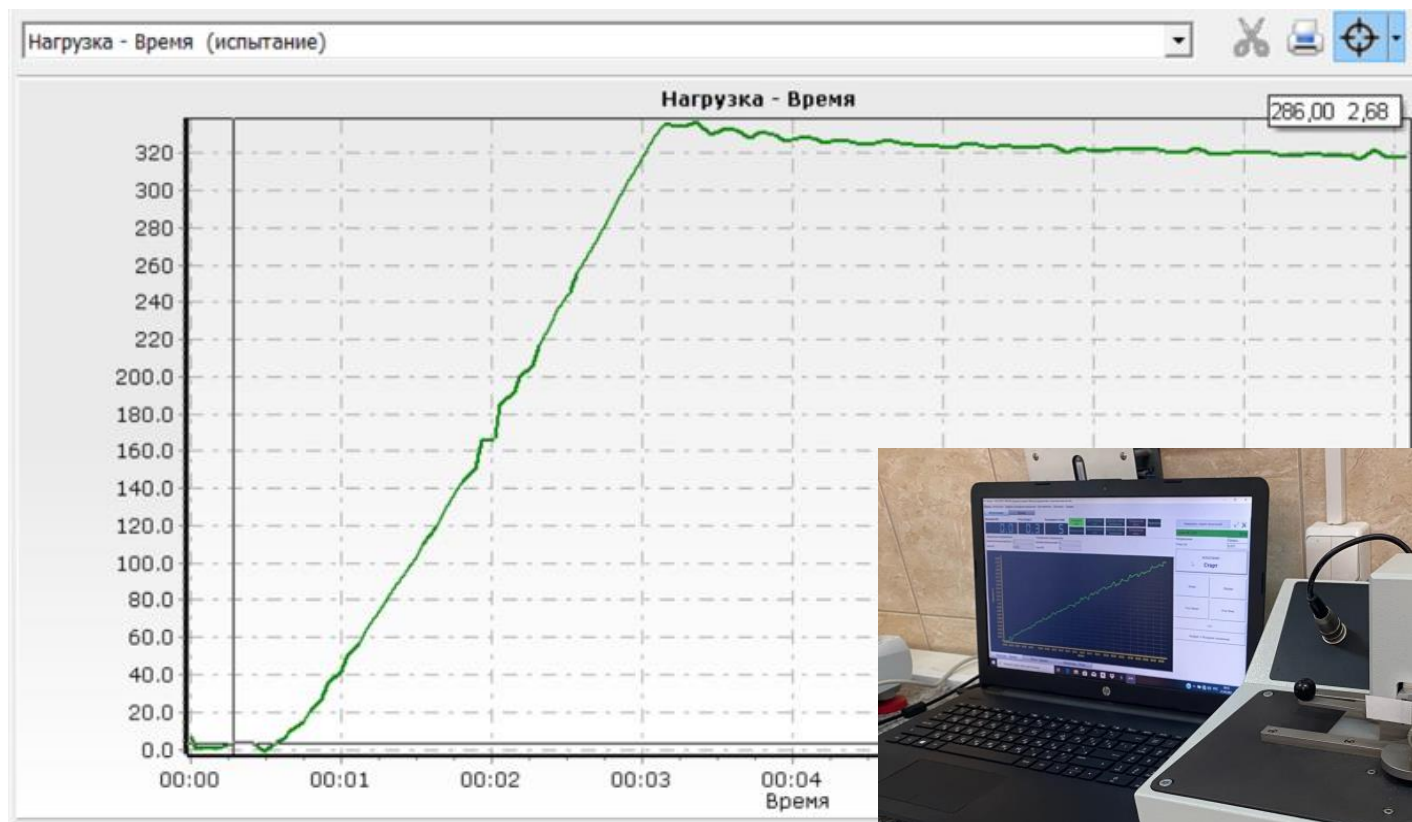
Образец - Картон(АЦБК,125)CD,normal  
 Длина образца - 10; мм  
 Ширина образца - 38,1; мм  
 Угол изгиба - 15,0; град  
 Режим испытания - Обычный  
 Число образцов - 5  
 Данные хранятся в файле - Картон(АЦБК,125) CD,normal(10).bhl

---

Направление;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Лицо ;	Сетка ;	Сетка ;	Сетка ;	Сетка ;	Сетка ;	Сетка ;	Сетка ;	Сетка ;	Сетка ;			
№ образца ;	1 ;	1 ;	2 ;	2 ;	3 ;	3 ;	4 ;	4 ;	5 ;	5 ;	5 ;	1 ;	1 ;	2 ;	2 ;	3 ;	3 ;	4 ;	4 ;	5 ;	5 ;		
Харак-тика ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;	t,сек ;	F,H ;
1 ;	0,2 ;	6 ;	0,2 ;	9 ;	0,2 ;	8 ;	0,0 ;	3 ;	0,0 ;	1 ;	0,0 ;	1 ;	0,0 ;	1 ;	0,1 ;	5 ;	0,0 ;	4 ;	0,1 ;	6 ;			
2 ;	0,4 ;	16 ;	0,3 ;	17 ;	0,3 ;	13 ;	0,1 ;	11 ;	0,2 ;	4 ;	0,1 ;	6 ;	0,1 ;	5 ;	0,3 ;	15 ;	0,1 ;	12 ;	0,3 ;	14 ;			
3 ;	0,5 ;	23 ;	0,4 ;	25 ;	0,5 ;	24 ;	0,2 ;	18 ;	0,4 ;	14 ;	0,2 ;	11 ;	0,3 ;	13 ;	0,4 ;	21 ;	0,2 ;	16 ;	0,4 ;	20 ;			
4 ;	0,6 ;	34 ;	0,6 ;	37 ;	0,6 ;	32 ;	0,4 ;	30 ;	0,5 ;	20 ;	0,4 ;	21 ;	0,5 ;	19 ;	0,6 ;	30 ;	0,3 ;	21 ;	0,6 ;	29 ;			
5 ;	0,8 ;	44 ;	0,7 ;	44 ;	0,8 ;	42 ;	0,5 ;	39 ;	0,7 ;	29 ;	0,6 ;	32 ;	0,6 ;	26 ;	0,7 ;	35 ;	0,4 ;	26 ;	0,7 ;	38 ;			
6 ;	0,9 ;	59 ;	0,7 ;	52 ;	0,9 ;	53 ;	0,6 ;	47 ;	0,8 ;	35 ;	0,8 ;	43 ;	0,8 ;	32 ;	0,8 ;	41 ;	0,5 ;	30 ;	0,9 ;	49 ;			
7 ;	1,1 ;	70 ;	0,9 ;	63 ;	1,0 ;	59 ;	0,7 ;	55 ;	0,9 ;	45 ;	0,8 ;	50 ;	1,0 ;	39 ;	0,9 ;	49 ;	0,6 ;	35 ;	1,0 ;	54 ;			
8 ;	1,2 ;	80 ;	1,1 ;	74 ;	1,2 ;	69 ;	0,7 ;	63 ;	1,0 ;	55 ;	0,9 ;	57 ;	1,0 ;	44 ;	1,0 ;	55 ;	0,7 ;	40 ;	1,2 ;	62 ;			
9 ;	1,4 ;	90 ;	1,3 ;	84 ;	1,4 ;	78 ;	0,8 ;	70 ;	1,2 ;	69 ;	1,1 ;	67 ;	1,1 ;	48 ;	1,2 ;	63 ;	0,8 ;	45 ;	1,3 ;	67 ;			
10 ;	1,5 ;	99 ;	1,5 ;	100 ;	1,5 ;	84 ;	0,9 ;	78 ;	1,3 ;	79 ;	1,2 ;	75 ;	1,2 ;	53 ;	1,3 ;	69 ;	0,9 ;	53 ;	1,5 ;	78 ;			
11 ;	1,7 ;	109 ;	1,7 ;	115 ;	1,7 ;	95 ;	1,0 ;	86 ;	1,5 ;	89 ;	1,3 ;	82 ;	1,3 ;	58 ;	1,4 ;	74 ;	1,0 ;	58 ;	1,6 ;	88 ;			
12 ;	1,7 ;	118 ;	1,8 ;	130 ;	1,7 ;	100 ;	1,1 ;	93 ;	1,7 ;	101 ;	1,4 ;	88 ;	1,4 ;	63 ;	1,5 ;	79 ;	1,1 ;	62 ;	1,7 ;	93 ;			
13 ;	1,8 ;	123 ;	1,9 ;	136 ;	1,8 ;	108 ;	1,2 ;	100 ;	1,8 ;	113 ;	1,5 ;	94 ;	1,5 ;	68 ;	1,7 ;	90 ;	1,3 ;	72 ;	1,8 ;	98 ;			
14 ;	1,9 ;	129 ;	2,0 ;	144 ;	2,0 ;	118 ;	1,3 ;	112 ;	2,0 ;	126 ;	1,6 ;	101 ;	1,7 ;	77 ;	1,8 ;	95 ;	1,4 ;	76 ;	2,0 ;	105 ;			
15 ;	2,0 ;	135 ;	2,2 ;	157 ;	2,1 ;	124 ;	1,4 ;	120 ;	2,1 ;	131 ;	1,7 ;	107 ;	1,8 ;	81 ;	1,9 ;	105 ;	1,5 ;	81 ;	2,1 ;	110 ;			
16 ;	2,1 ;	140 ;	2,3 ;	163 ;	2,3 ;	135 ;	1,5 ;	126 ;	2,3 ;	142 ;	1,7 ;	113 ;	1,9 ;	86 ;	2,1 ;	110 ;	1,6 ;	86 ;	2,2 ;	115 ;			
17 ;	2,2 ;	145 ;	2,3 ;	170 ;	2,4 ;	140 ;	1,6 ;	133 ;	2,4 ;	147 ;	1,9 ;	125 ;	2,0 ;	91 ;	2,1 ;	114 ;	1,7 ;	90 ;	2,3 ;	121 ;			
18 ;	2,3 ;	151 ;	2,4 ;	176 ;	2,5 ;	146 ;	1,7 ;	147 ;	2,6 ;	158 ;	2,0 ;	131 ;	2,2 ;	99 ;	2,2 ;	118 ;	1,8 ;	94 ;	2,4 ;	126 ;			
19 ;	2,4 ;	161 ;	2,5 ;	181 ;	2,6 ;	156 ;	1,8 ;	154 ;	2,7 ;	168 ;	2,2 ;	142 ;	2,2 ;	103 ;	2,4 ;	127 ;	1,9 ;	103 ;	2,5 ;	133 ;			
20 ;	2,5 ;	167 ;	2,6 ;	188 ;	2,7 ;	161 ;	1,9 ;	161 ;	2,9 ;	178 ;	2,3 ;	147 ;	2,3 ;	109 ;	2,6 ;	132 ;	2,0 ;	106 ;	2,6 ;	140 ;			
21 ;	2,6 ;	173 ;	2,7 ;	197 ;	2,8 ;	169 ;	2,0 ;	168 ;	3,0 ;	183 ;	2,4 ;	158 ;	2,4 ;	114 ;	2,7 ;	138 ;	2,1 ;	111 ;	2,7 ;	146 ;			
22 ;	2,7 ;	183 ;	2,9 ;	209 ;	2,9 ;	170 ;	2,2 ;	181 ;	3,2 ;	191 ;	2,5 ;	164 ;	2,5 ;	118 ;	2,7 ;	142 ;	2,2 ;	115 ;	2,8 ;	153 ;			
23 ;	3,0 ;	182 ;	2,9 ;	215 ;	3,0 ;	170 ;	2,3 ;	187 ;	3,3 ;	190 ;	2,6 ;	170 ;	2,6 ;	121 ;	2,8 ;	147 ;	2,4 ;	123 ;	3,0 ;	160 ;			
24 ;	3,1 ;	182 ;	3,0 ;	219 ;	3,1 ;	169 ;	2,3 ;	193 ;	3,3 ;	189 ;	2,7 ;	176 ;	2,8 ;	129 ;	3,0 ;	151 ;	2,5 ;	128 ;	3,1 ;	160 ;			
25 ;	3,2 ;	181 ;	3,1 ;	219 ;	3,2 ;	169 ;	2,4 ;	199 ;	3,5 ;	188 ;	2,8 ;	181 ;	2,9 ;	133 ;	3,0 ;	154 ;	2,6 ;	132 ;	3,2 ;	159 ;			
26 ;	3,4 ;	181 ;	3,3 ;	217 ;	3,4 ;	168 ;	2,5 ;	207 ;	3,6 ;	187 ;	2,9 ;	181 ;	3,1 ;	140 ;	3,2 ;	153 ;	2,8 ;	134 ;	3,2 ;	159 ;			
27 ;	3,5 ;	180 ;	3,5 ;	216 ;	3,5 ;	167 ;	2,6 ;	214 ;	3,7 ;	187 ;	3,0 ;	180 ;	3,1 ;	145 ;	3,4 ;	152 ;	3,0 ;	133 ;	3,3 ;	159 ;			
28 ;	3,7 ;	180 ;	3,6 ;	216 ;	3,6 ;	167 ;	2,7 ;	219 ;	3,9 ;	186 ;	3,1 ;	180 ;	3,2 ;	146 ;	3,6 ;	151 ;	3,0 ;	133 ;	3,5 ;	168 ;			
29 ;	3,9 ;	179 ;	3,7 ;	215 ;	3,8 ;	167 ;	2,8 ;	225 ;	4,0 ;	186 ;	3,2 ;	179 ;	3,3 ;	145 ;	3,8 ;	151 ;	3,1 ;	132 ;	3,7 ;	167 ;			
30 ;	4,0 ;	179 ;	3,8 ;	215 ;	4,0 ;	166 ;	2,9 ;	232 ;	4,1 ;	185 ;	3,3 ;	179 ;	3,5 ;	144 ;	3,9 ;	150 ;	3,2 ;	132 ;	3,8 ;	167 ;			
31 ;	4,2 ;	179 ;	3,9 ;	214 ;	4,2 ;	166 ;	3,0 ;	234 ;	4,2 ;	185 ;	3,4 ;	179 ;	3,6 ;	144 ;	4,0 ;	150 ;	3,4 ;	132 ;	3,9 ;	167 ;			
32 ;	4,3 ;	178 ;	4,0 ;	214 ;	4,4 ;	165 ;	3,1 ;	233 ;	4,3 ;	185 ;	3,4 ;	179 ;	3,7 ;	144 ;	4,0 ;	150 ;	3,4 ;	132 ;	4,0 ;	167 ;			
33 ;	4,4 ;	178 ;	4,2 ;	213 ;	4,6 ;	157 ;	3,2 ;	232 ;	4,4 ;	184 ;	3,5 ;	178 ;	3,8 ;	143 ;	4,1 ;	149 ;	3,5 ;	131 ;	4,2 ;	167 ;			

Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Регистрация кривой нагружения при испытании на изгиб

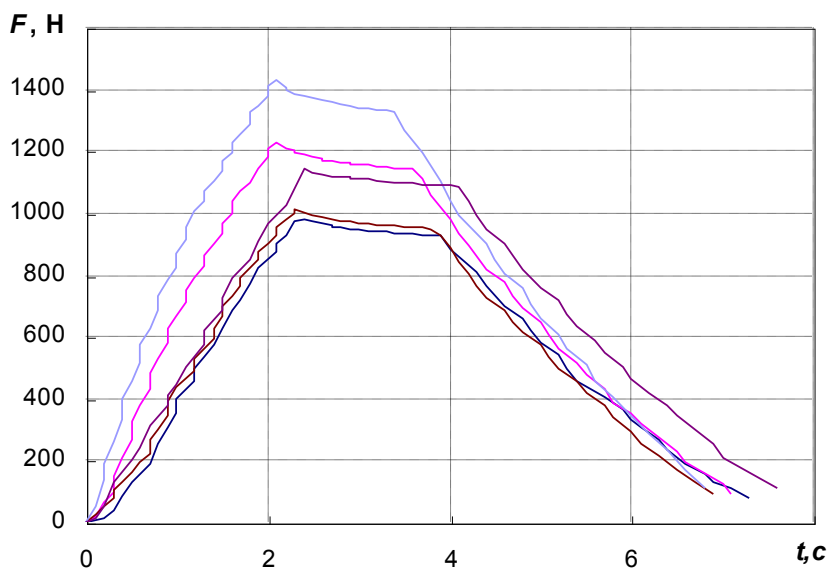


Деформативность картона-лайнера при изгибе

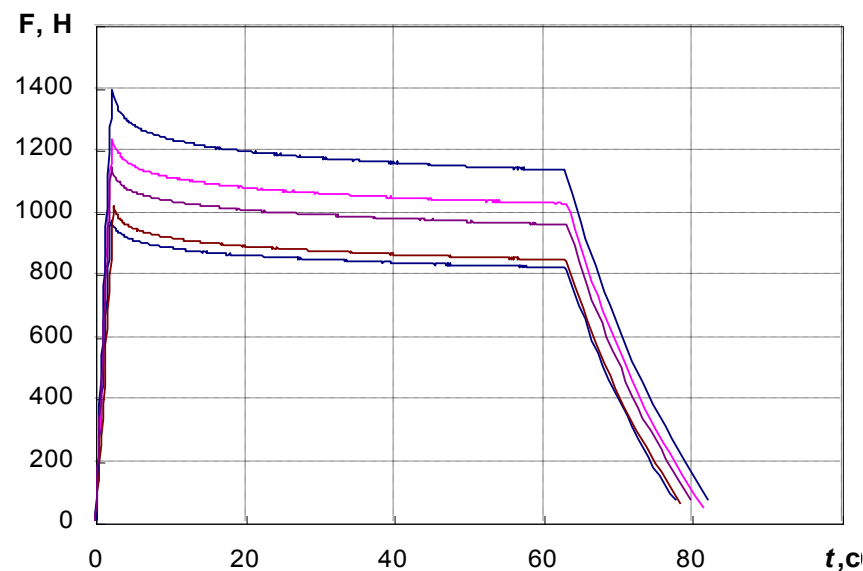


# Зависимости, получаемые при испытании серии параллельных образцов картона

в стандартном режиме



в режиме релаксации

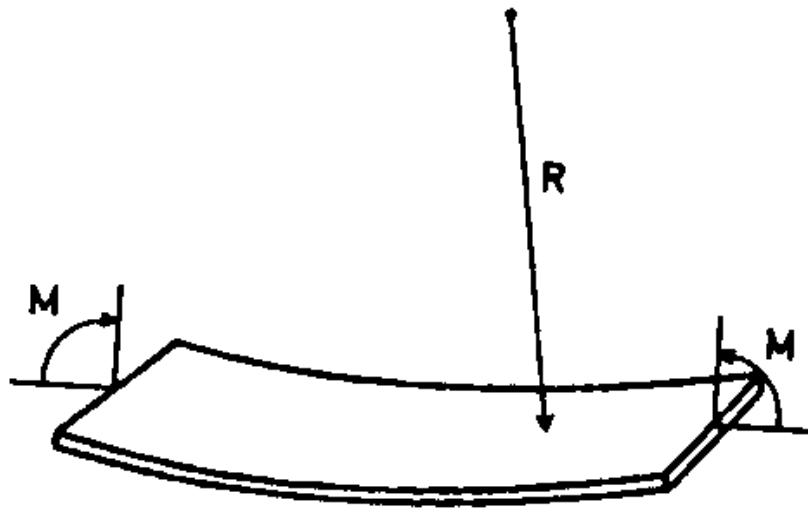


## Факторы, влияющие на сопротивление образца изгибу:

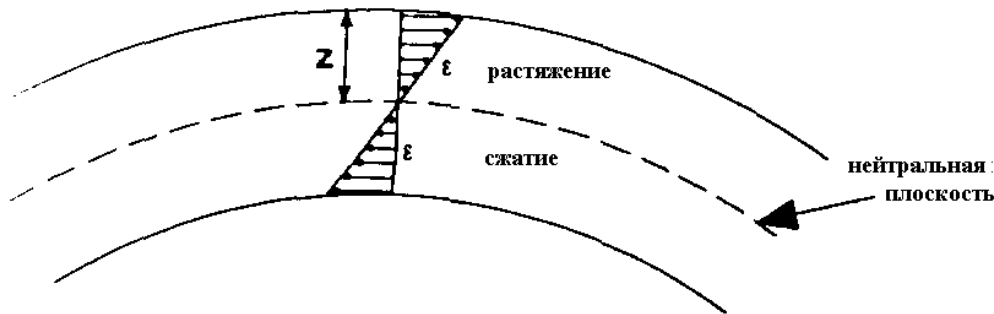
- лицевая/сеточная сторона – разносторонность;
- скручиваемость образца до начала нагружения;
- коробление образца;
- неоднородность структуры из-за флокуляции;

Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Изгиб балки в упругой области, где существует пропорциональность между нагрузкой и деформацией



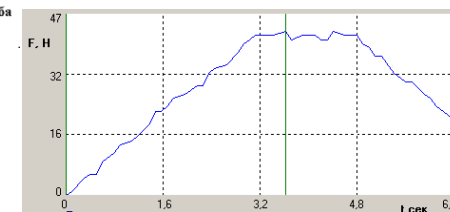
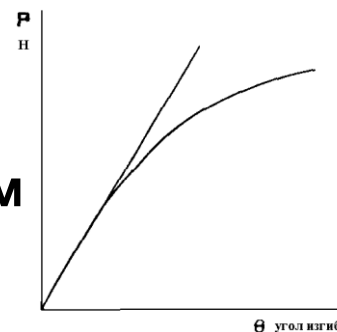
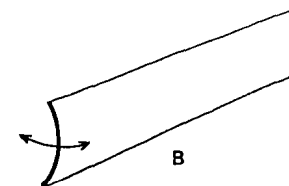
Чистый изгиб балки с прямоугольным поперечным сечением – Радиус кривизны  $R$  также является постоянным вдоль балки и плоскость поперечного сечения остается перпендикулярной к нейтральной плоскости вдоль изгиба. Изгибающий момент  $M$  пропорционален кривизне



Растягивающее и сжимающее напряжения по отношению к нейтральной плоскости симметричны

# Источники ошибок при измерении жесткости при изгибе

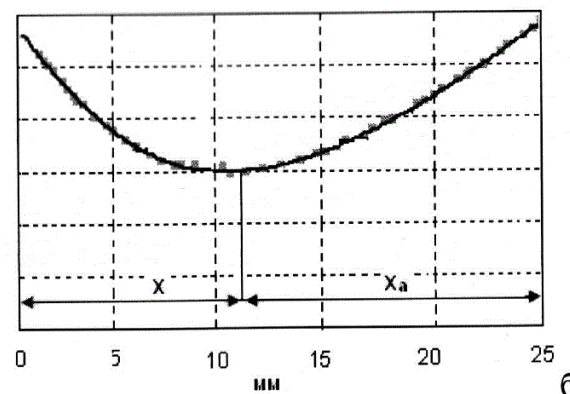
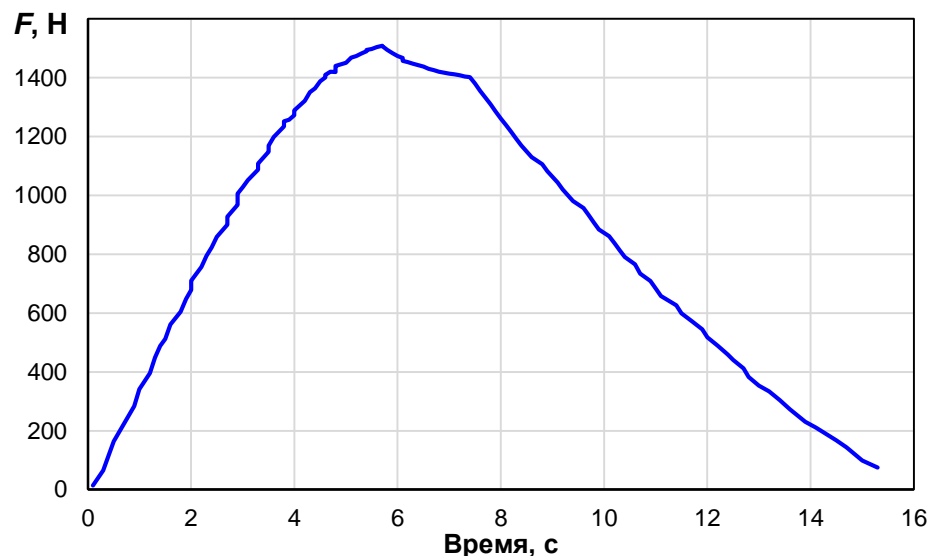
- лицевая/сеточная сторона – разносторонность;
- скручиваемость образца до начала нагружения;
- коробление образца;
- неоднородность структуры из-за флокуляции;
- испытания образца с использованием усилия, создающего деформацию превышающую зону упругости;
- Величина регистрируемой нагрузки сопоставима с погрешностью датчика



Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Проявление упруго-пластических свойств бумаги при изгибе

- Загиб кривой нагружения образца, отклонение хода кривой от прямолинейности;
- Релаксация напряжения при выдерживании образца при нагрузке;
- Отклонение кривизны изгиба от окружности;



Деформативность картона-лайнера при изгибе



# Исследованные образцы

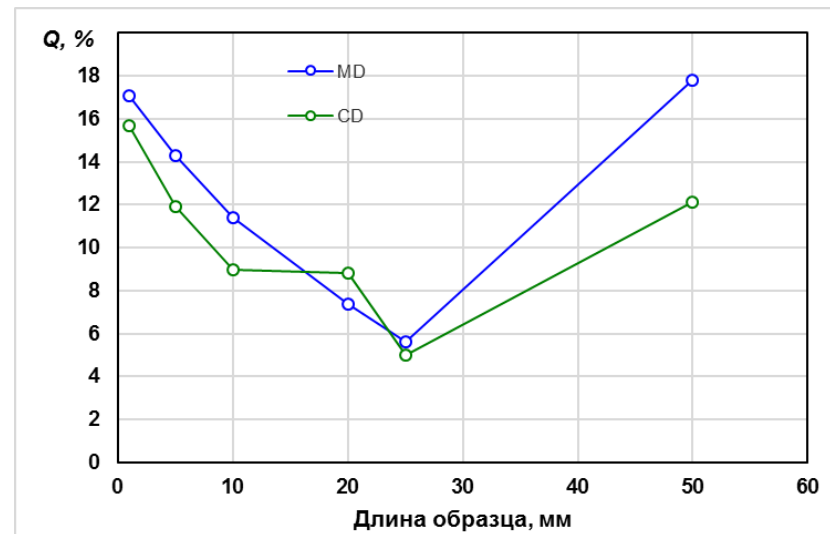
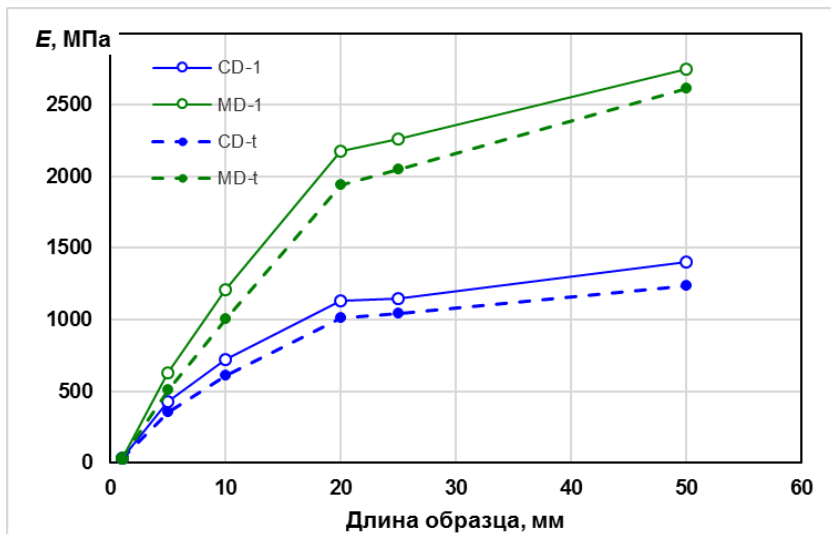
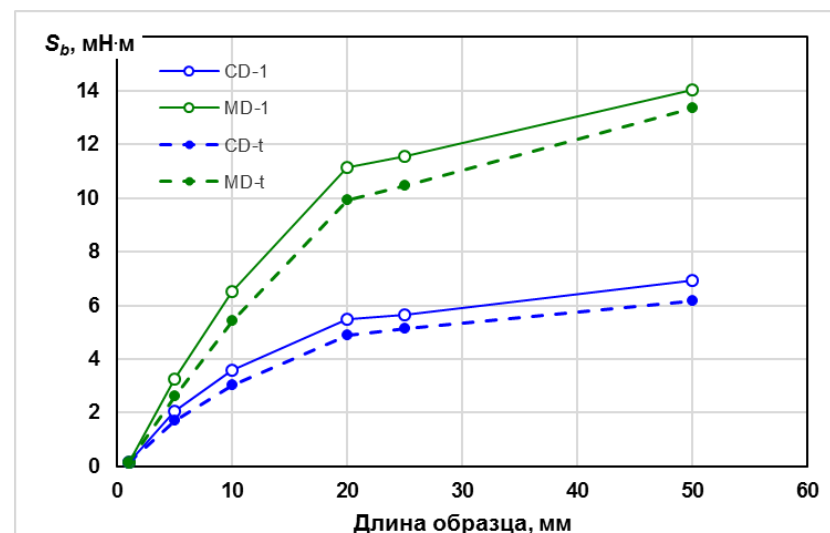
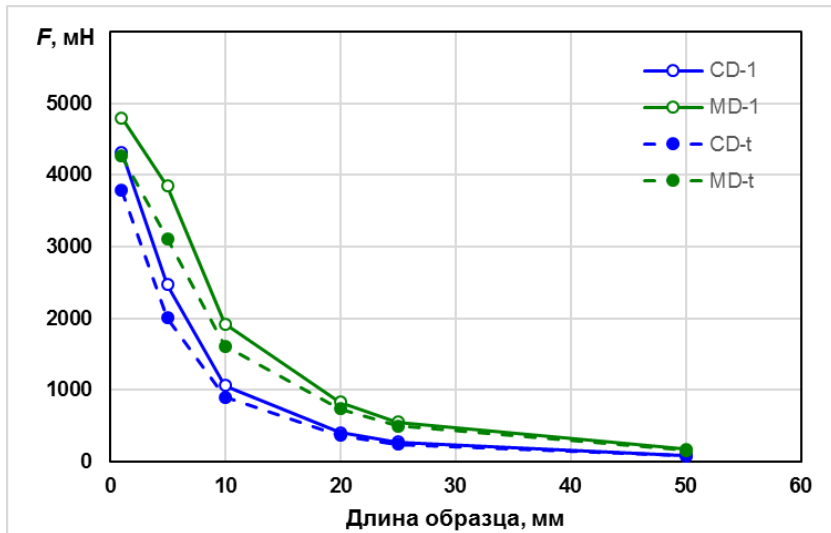
## картона для плоских слоёв гофрированного картона

- **крафт-лайнер** – из целлюлозы высокого выхода,
- **топ-лайнер** – картона из хвойной и лиственной целлюлозы с белёным покровным слоем;
- **тестлайнер** – макулатурный картон.

### Варьируемые параметры:

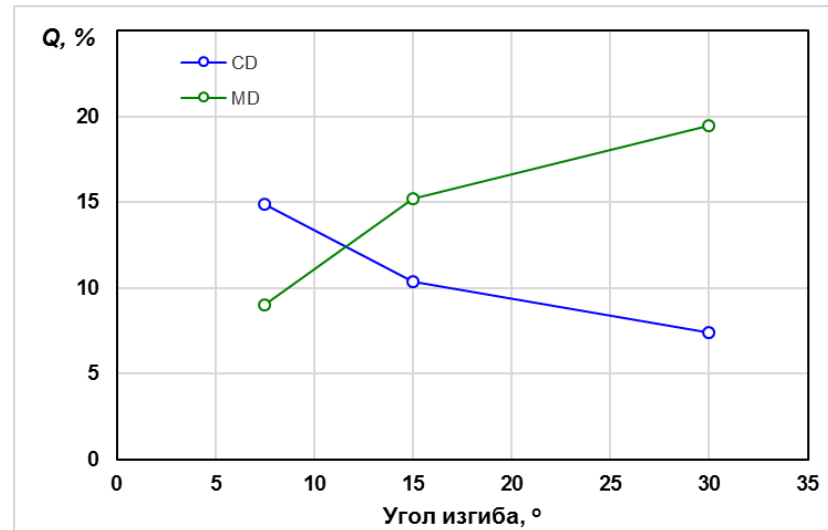
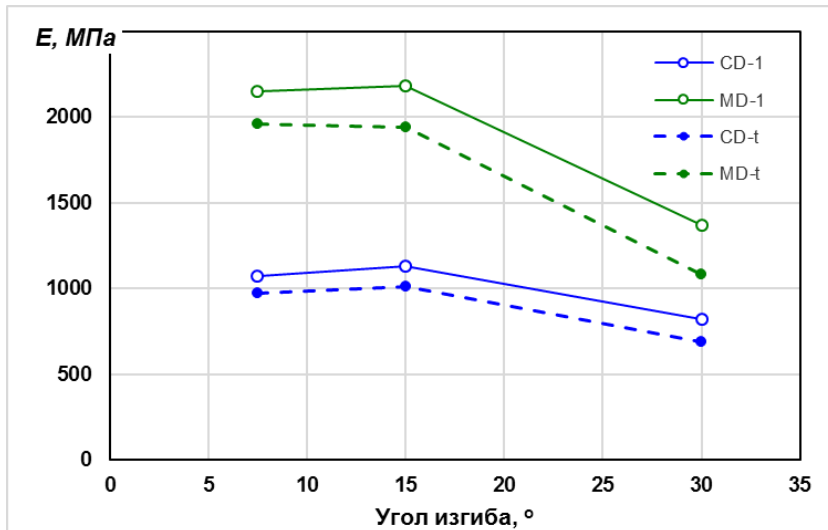
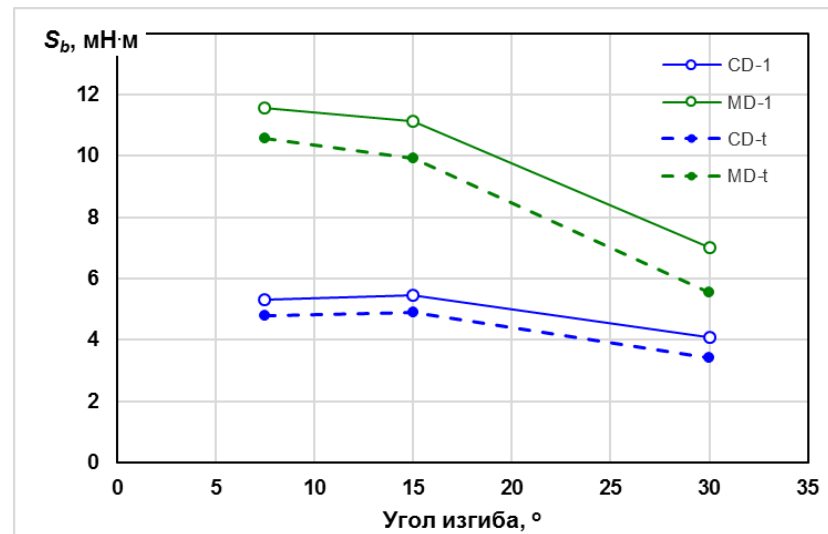
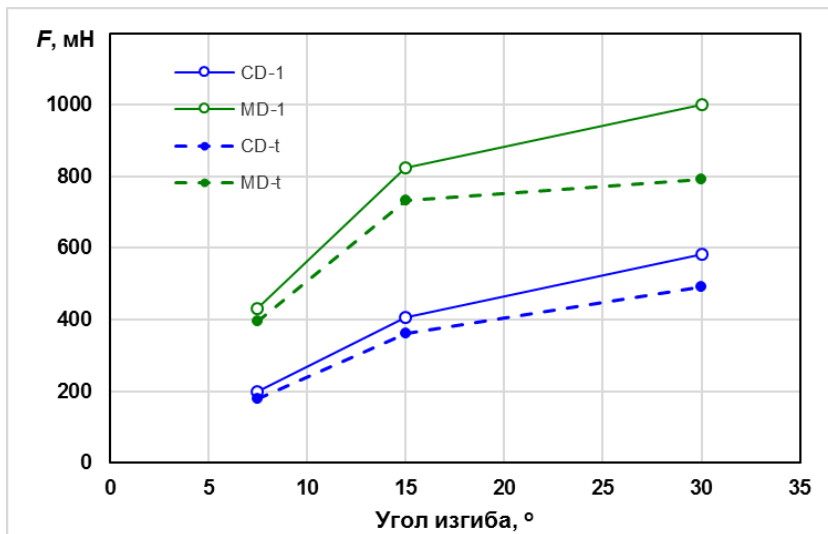
- размеры образцов (длина и ширина);
- угол изгиба;
- масса 1 м<sup>2</sup>;
- выдержки при максимально угле изгиба.

# Влияние длины образца картон тест-лайнер 200 г/м<sup>2</sup>



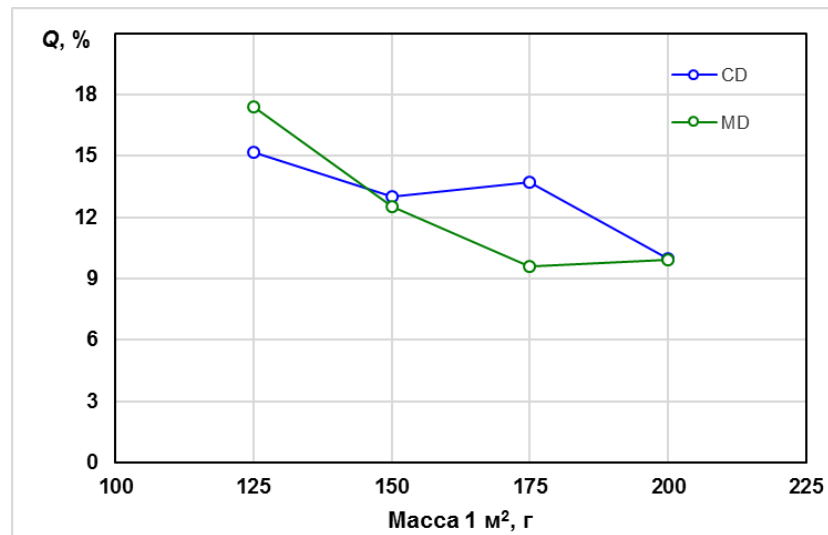
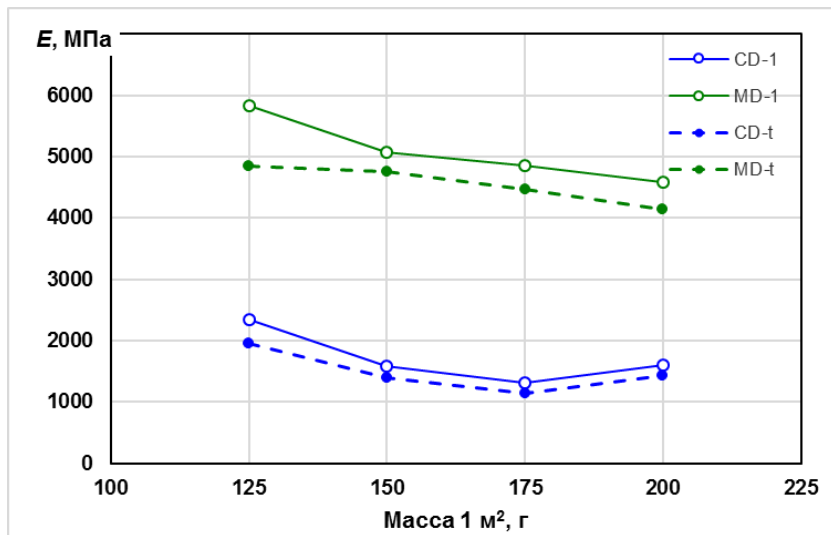
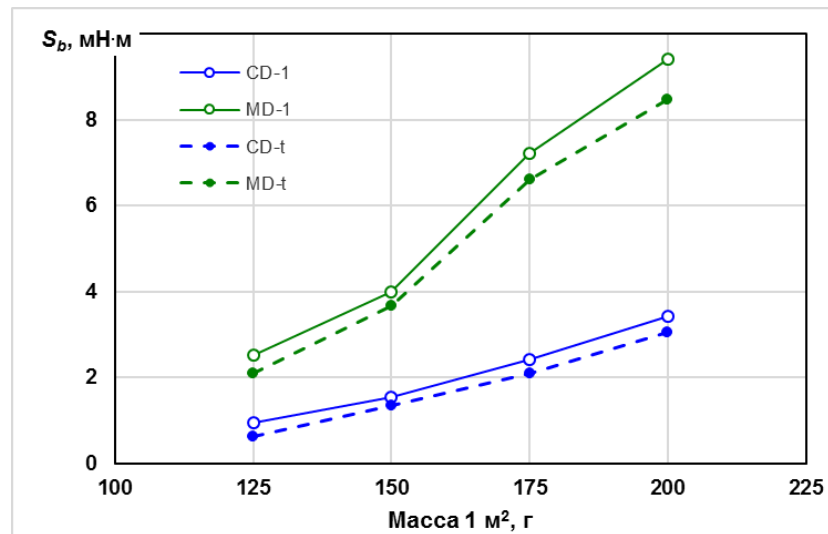
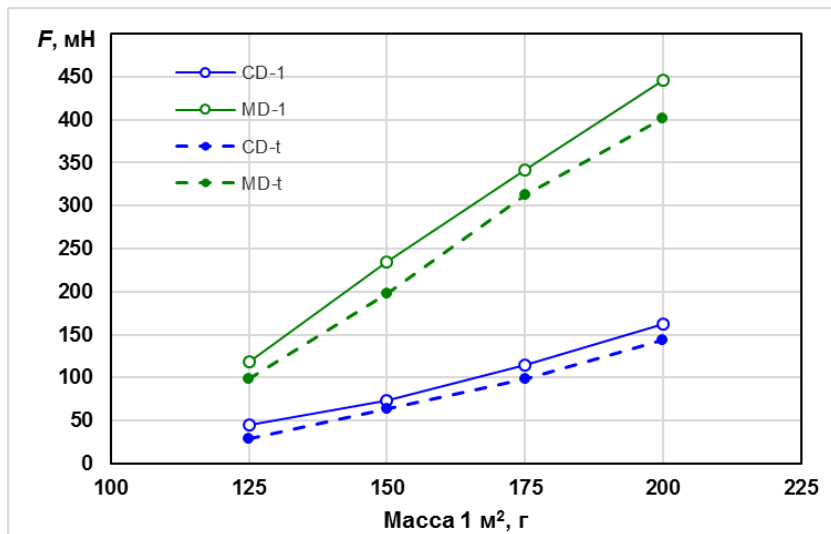
Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Влияние угла изгиба картон тест-лайнера, 200 г/м<sup>2</sup>



Деформативность картона-лайнера при изгибе

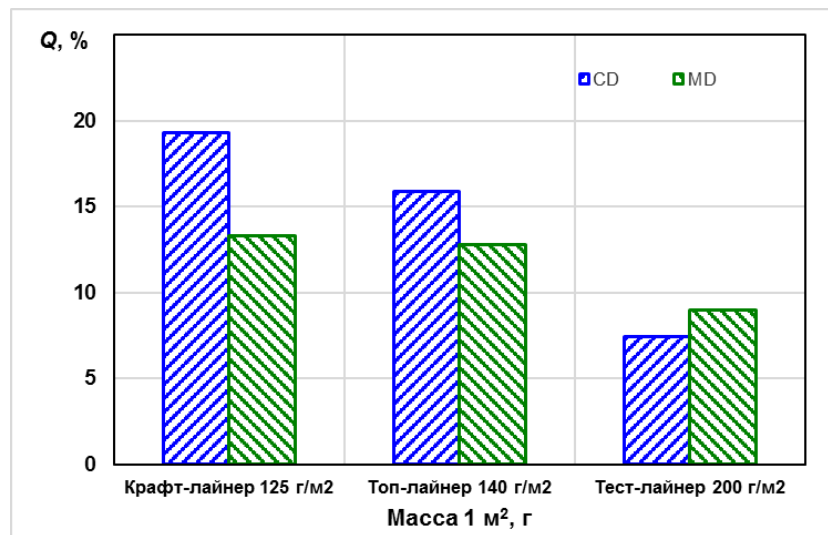
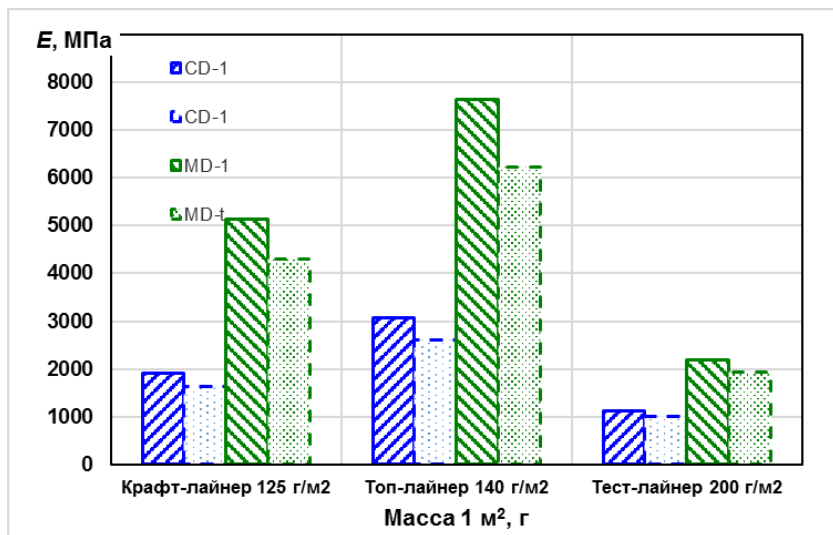
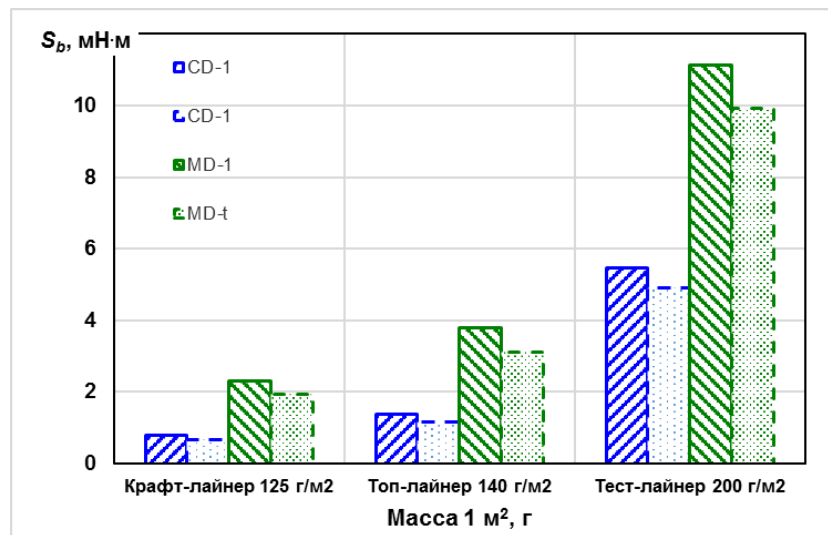
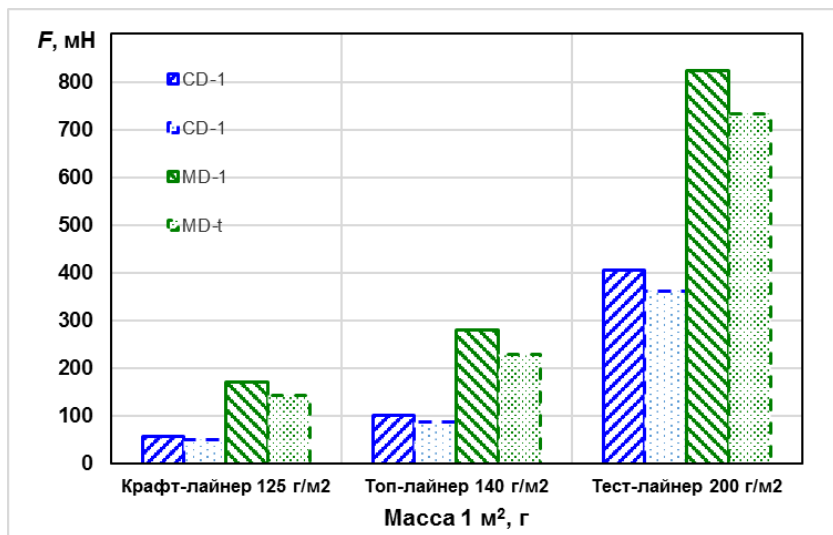
# Влияние массы $1 \text{ м}^2$ крафт-лайнера, угол изгиба $15^\circ$ , ширина $38,1 \text{ мм}$



Деформативность картона-лайнера при изгибе

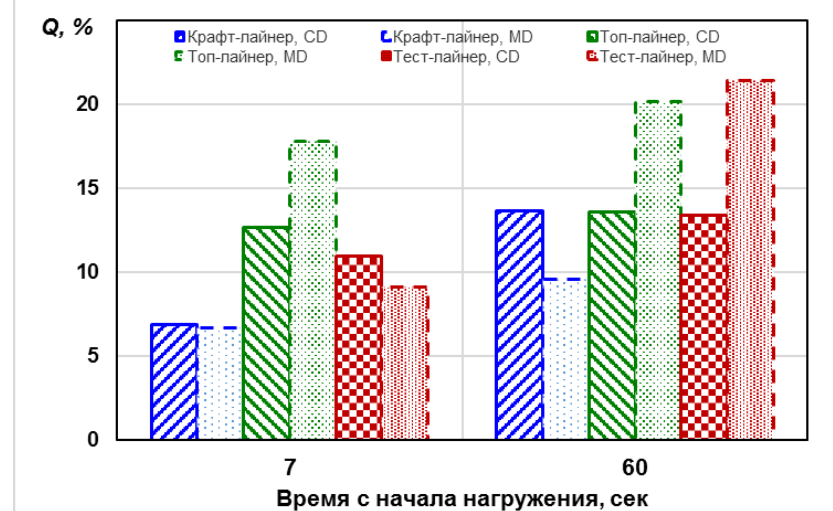
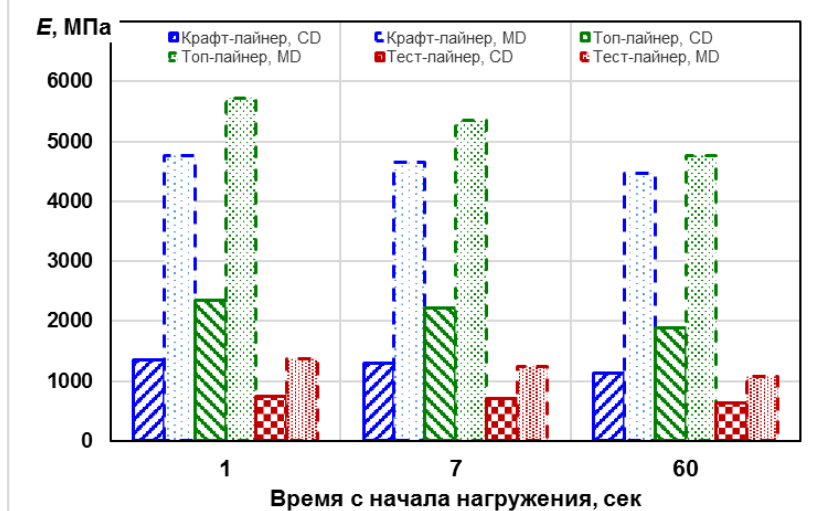
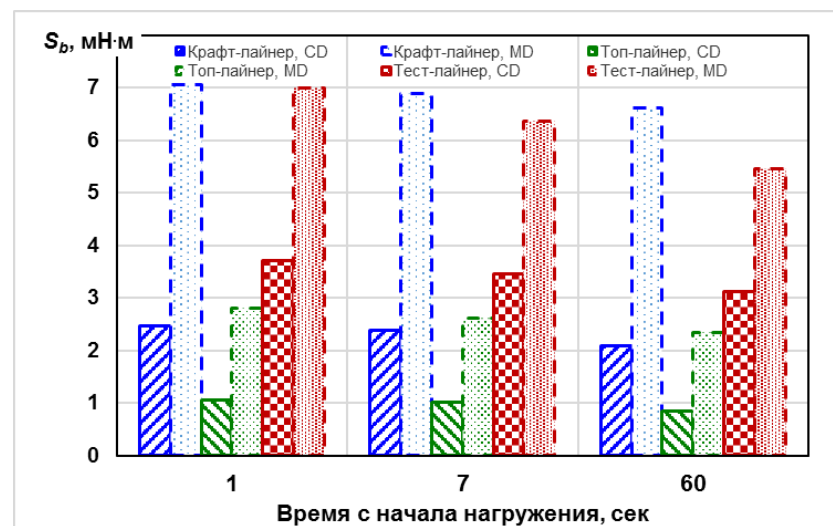
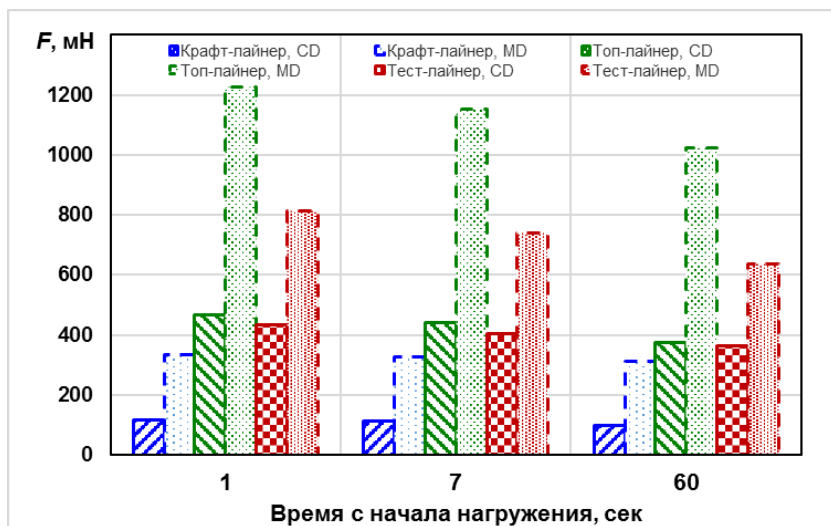


# Сравнительная характеристика деформативности при изгибе картона лайнера, угол изгиба 15°, размеры образца 20×38,1 мм



Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Влияние продолжительности испытания



Деформативность картона-лайнера при изгибе

# Выводы

- доказано существование и количественно охарактеризованы упруговязкопластические свойства картона при испытании его на изгиб;
- показана необходимость учета релаксационных процессов в структуре картона как вязкоупругопластического материала, поскольку на результат оказывают влияние пластические деформации, возникающие в образце при его изгибе;
- стандартные условия испытания на изгиб не являются универсальными и подходящими для всех видов картона;
- соблюдение условия проведения испытаний в упругой области приводит к повышению погрешности измерений;
- изменение условий испытания с целью перевода показаний датчика в область, сдвинутую от начала шкалы, приводит к развитию неупругих и пластических деформаций в образце;
- при сравнительной оценке качества картона нужно указание условий испытания на изгиб.

# Заключение

На примере типичных представителей целлюлозно-бумажных материалов, приведена количественная характеристика их вязкоупруго-вязкопластического поведения при изгибе.

По результатам проведенного эксперимента на основании анализа кривых зависимости «Нагрузка-время» дана оценка различия в деформационном поведении различных целлюлозно-бумажных материалов в условиях статического изгиба при использовании тестера, проводящего измерения по двухточечному методу.



# Спасибо за внимание!



Северный (Арктический)  
федеральный университет

Кафедра целлюлозно-бумажных  
и лесохимических производств

тел. (+78182) 21-61-82

E-mail: [j.kazakov@narfu.ru](mailto:j.kazakov@narfu.ru)



Деформативность картона-лайнера при изгибе