

# КИНЕТИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ



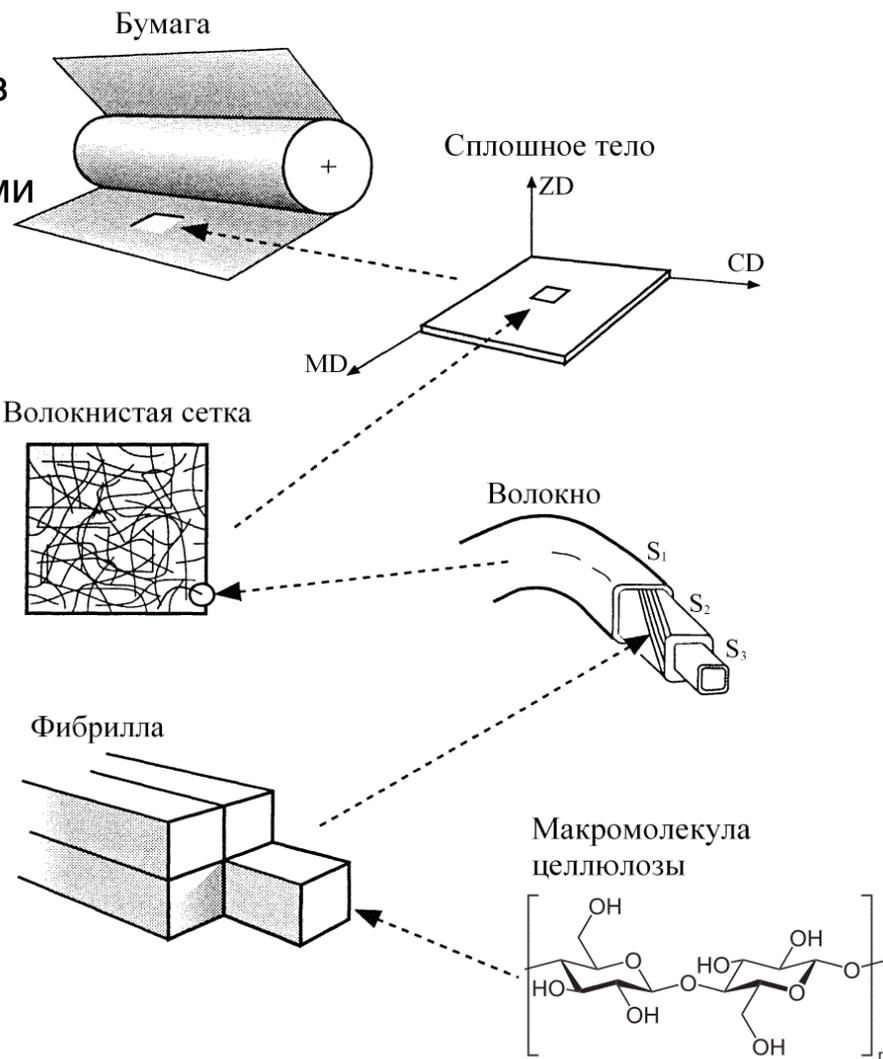
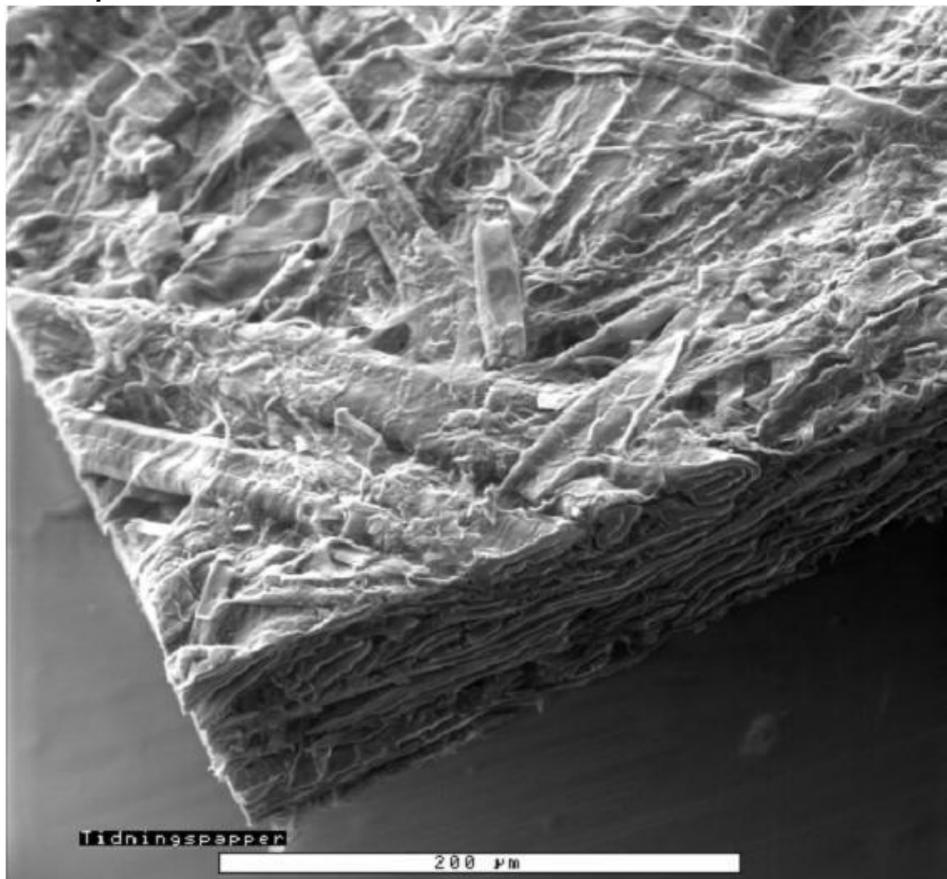
**Я.В. Казаков**

**СЕВЕРНЫЙ  
(АРКТИЧЕСКИЙ)  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**



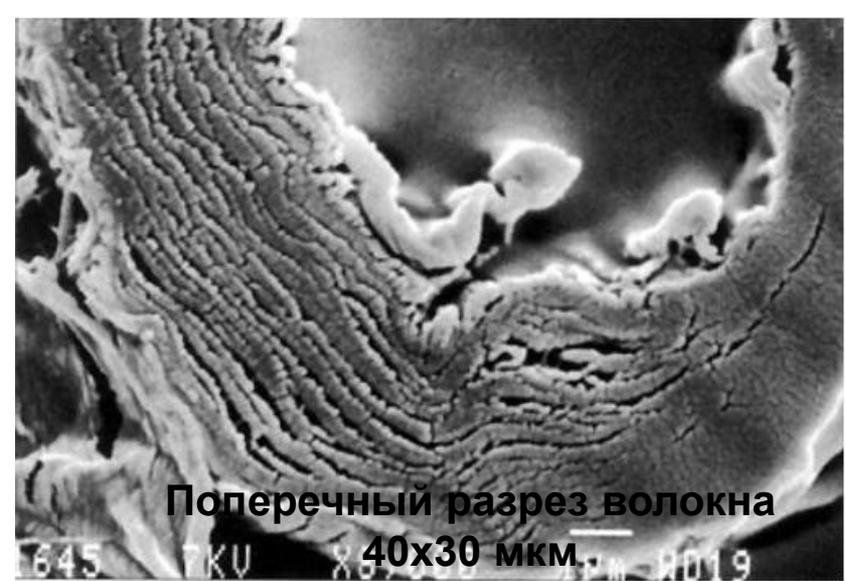
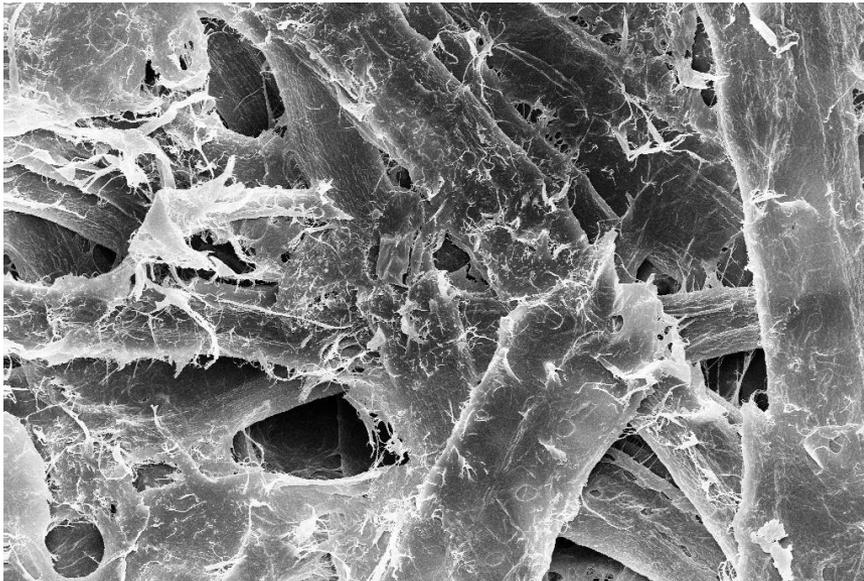
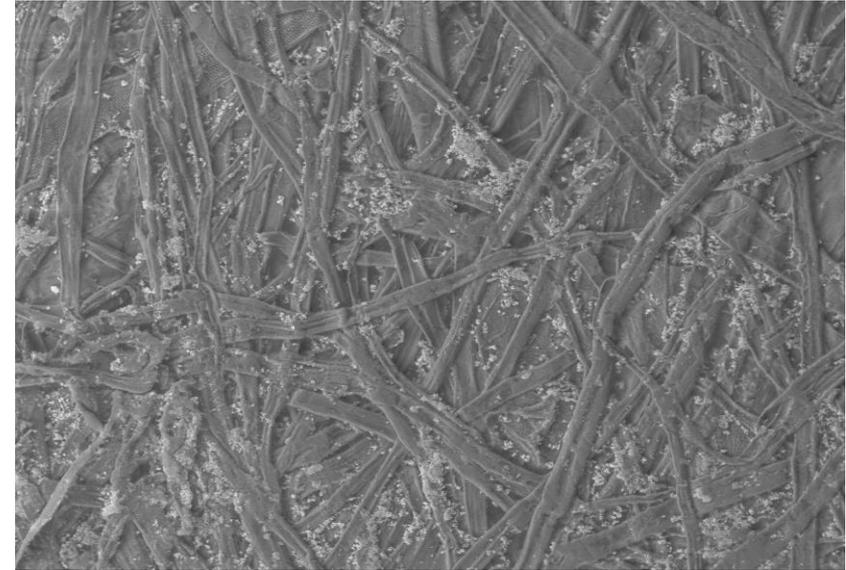
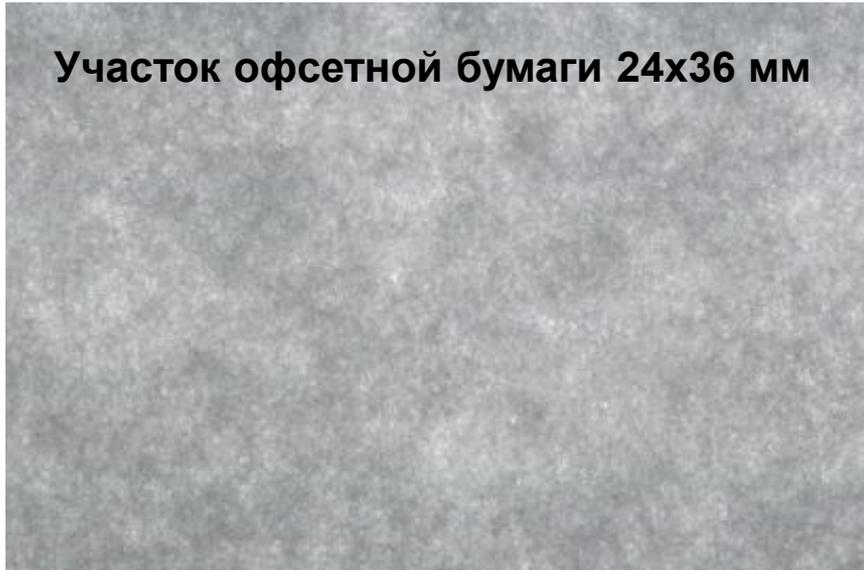
# Бумага как материал

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.



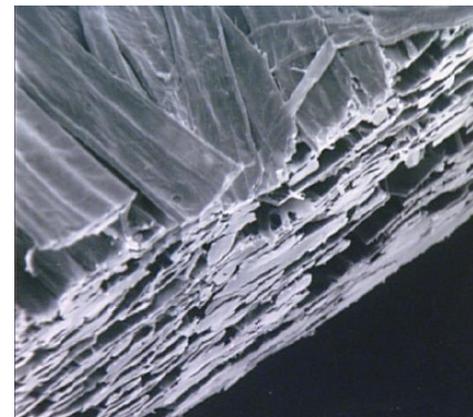
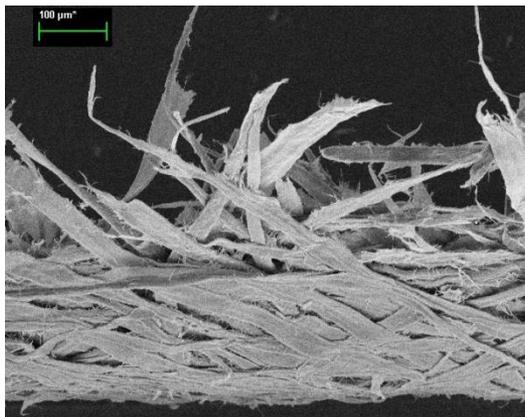
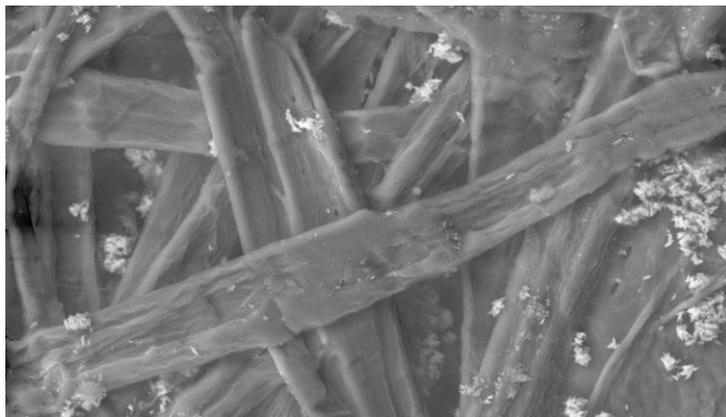
Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

# Структура на масштабных уровнях



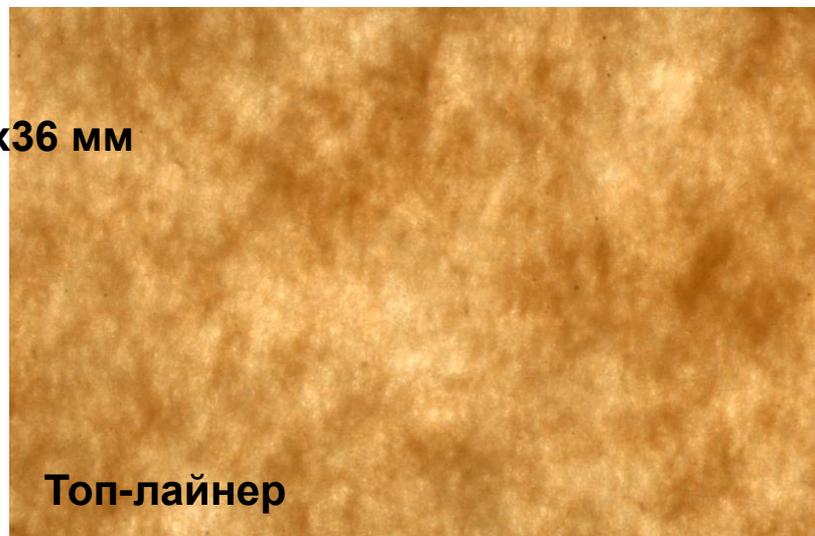
Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

# Благодаря волокнистой природе бумаге присуща анизотропия и неоднородность структуры



Образец 24x36 мм

Офисная бумага



Топ-лайнер

Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

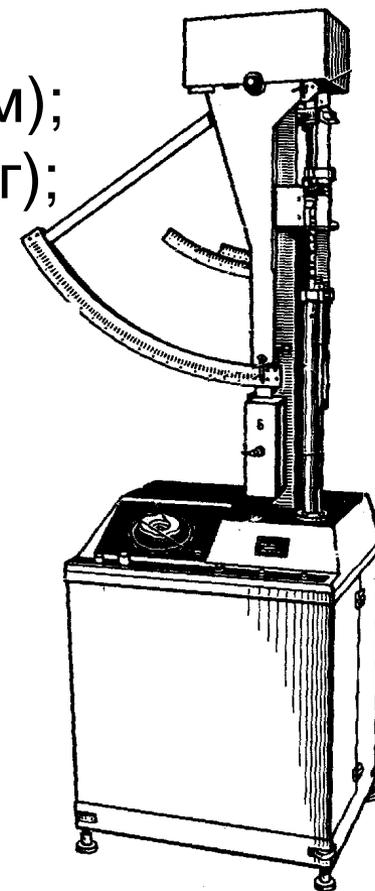
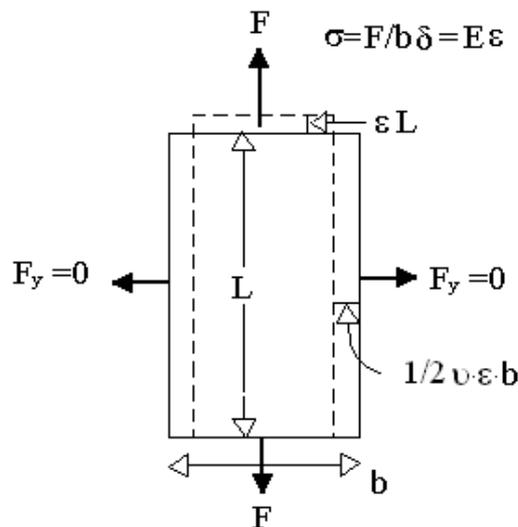
# Испытание на растяжение

Определение сопротивления бумаги разрыву  
ГОСТ 13525.1-79; ГОСТ ИСО 1924-1-96

- Разрушающее усилие ( $F$ , Н);
- Разрывная длина ( $L$ , м);
- Удельное сопротивление разрыву ( $F_{уд}$ , кН/м);
- Индекс прочности при растяжении ( $J_p$ , Н·м/г);
- Разрушающее напряжение ( $\sigma_p$ , МПа);
- Относительное удлинение ( $l_{отн}$ , %).

Позднее введены  
ГОСТ Р ИСО 1924-2-2012  
ISO 1924-3:2005

- Кривая нагрузка-удлинение;
- Модуль упругости;
- Жесткость при растяжении;
- Энергия, поглощаемая при растяжении.



# Кривая «напряжение-деформация»



0–1 – упругая зона;  
 1–2 – замедленно-упругая зона;  
 2–3 – зона предразрушения,  
 характеризуемая развитием пластических деформаций;  
 Э – точка, усреднённо характеризующая замедленно-упругую зону;  
 П – точка начала пластических деформаций;  
 В – точка начала дополнительной вытяжки;  
 Р – точка разрушения.

В каждой характерной точке рассчитываются характеристики:

- усилие ( $F$ ), Н
- удлинение  $\Delta l$ , мм

- напряжение ( $\sigma$ ), МПа  $\sigma = \frac{F}{\delta b}$

- деформация ( $\varepsilon$ ), %  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$

- работа ( $A$ ), мДж  $A = \int_0^{\Delta l} P dl$

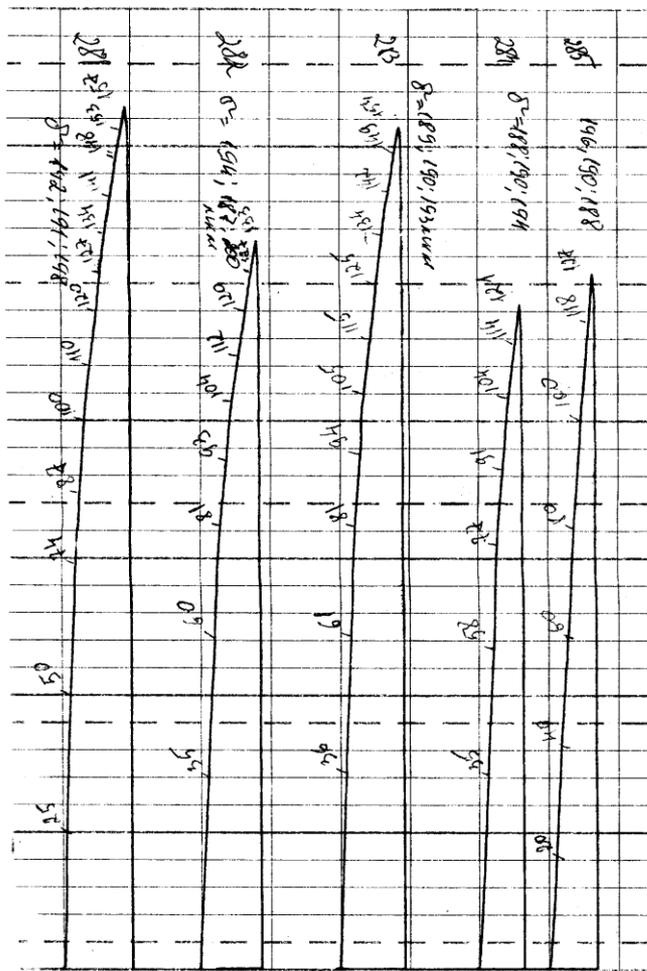
- текущий модуль упругости ( $E$ ), МПа  $E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$

- модуль общей деформации ( $E_{\text{од}}$ ), МПа  $E_{\text{од}} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

- время релаксации напряжения ( $n$ ), с  $\sigma_{(\varepsilon)} = E_2 \varepsilon + v n \cdot (E_1 - E_2) \cdot \left(1 - e^{\frac{\varepsilon}{v n}}\right)$

Казakov 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).

# Получение кривой « $\sigma$ - $\epsilon$ » на разрывной машине ZM-10 и обработка на ЭВМ ЕС



Использована аппроксимация полиномом.  
 Кинетика – для кривой с разрушающим усилием, наиболее близким к среднему



N	E1	E2	E3	H1	HP	H3	Д1	ДР	Д3	A	ПОГР
1	5319,	1312,	2840,	20,3	63,6	36,7	0,38	2,48	0,80	0,10575	0,67
2	7131,	1719,	4377,	19,8	53,9	28,6	0,29	1,71	0,47	0,06267	0,33
3	7503,	1850,	4070,	19,5	63,4	28,9	0,27	2,10	0,46	0,08782	0,36
4	7261,	1918,	3993,	18,8	49,8	27,3	0,27	1,33	0,46	0,04234	0,35
5	4307,	2011,	3186,	16,4	52,1	47,1	0,38	1,33	1,11	0,03779	0,63
CP	6304,	1762,	3693,	18,9	56,6	33,7	0,32	1,79	0,66	0,06727	0,47
CKO	1414,	273,	640,	1,5	6,5	8,4	0,06	0,50	0,29	0,02922	0,17
N	S	ОТН.УДА	НАПР.	ЕОД	ЕКР	РАБОТА					
2	13,734	0,001905	14,2	7446,1	7446,1	0,00137					
3	23,544	0,003810	24,3	5382,4	5318,7	0,00510					
4	31,784	0,005714	32,8	5744,2	4467,7	0,01063					
5	36,493	0,007619	37,7	4946,4	2553,0	0,01746					
6	40,810	0,009524	42,1	4425,1	2340,2	0,02519					
7	43,949	0,011429	45,4	3971,3	1702,0	0,03367					
8	47,088	0,013333	48,6	3647,1	1702,0	0,04277					
9	49,835	0,015238	51,5	3377,4	1489,2	0,05246					
10	52,189	0,017143	53,9	3143,9	1276,5	0,06267					

Комаров В.И., Хабаров Ю.Г. Обработка индикаторных диаграмм, полученных испытанием на растяжение, при помощи ЭВМ // Химия и технология целлюлозы: Межвуз. сб. науч. тр.-Л.: РИО ЛТА, 1979.-Вып.6. - С.94-96.

Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

# Лабораторный испытательный комплекс



Об использовании результатов научно-исследовательской работы, выполненной сотрудниками Архангельского государственного технического университета доцентом Я.В. Казаковым и профессором В.И. Комаровым

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы, выполненной сотрудником Архангельского государственного технического университета доцентом Казаковым Я.В. и профессором Комаровым В.И., ООО «ИТС» приняла для внедрения в производство разрывной машины «Тестсистема 101» для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.

Прибор «Тестсистема 101» имеет следующие технические характеристики:

- Тип силоизмерителя – тензорезисторный
- Диапазон измерения нагрузки: 0...500 Н
- Пределы допускаемой погрешности машины при измерении нагрузки – не более  $\pm 1\%$  от измеряемой нагрузки
- Скорость перемещения активного захвата в пределах 1...500 мм/мин
- Отклонение скорости от установленного значения, не более 5%
- Цена деления при измерении удлинения – 1 мкм
- Отклонение скорости от установленного значения, не более  $\pm 5\%$
- Машина обеспечивается комплектом зажимов, обеспечивающих:
  - испытания образцов с шириной до 50 мм;
  - точность и надежность фиксации образца;
  - отсутствие проскальзывания образца в зажимах;
  - строгую соосность образца прилагаемой нагрузке;
- Расстояние между зажимами регулируется и обеспечивает установку значений: 10±1 мм; 40±1 мм; 100±1 мм; 180±1 мм и промежуточных
- Режимы испытаний:
  - растяжение с постоянной скоростью до разрушения образца;
  - растяжение до заданной нагрузки;
  - растяжение до заданного удлинения;
  - циклическое нагружение до заданной нагрузки;
  - циклическое нагружение до заданного удлинения.
- Управление разрывной машиной – микропроцессорное
- Машина должна быть оснащена портом для вывода информации на ПЭВМ (интерфейс RS 232C). В описании программного обеспечения должен приводиться формат передаваемых данных
  - регистрацию изменения нагрузки и удлинения в процессе испытания;
  - математическую обработку результатов испытаний и вывод на дисплей следующей информации: разрушающая нагрузка в Н; среднее арифметическое значение разрушающей нагрузки ряда испытаний в Н; предел прочности при растяжении ( $\sigma$ ) в МПа ( $\text{кг/см}^2$ ); относительное удлинение при растяжении ( $\epsilon$ ) в процентах;

Разрывная машина ИТС 101-0,5Б г. Иваново, изготовлена по техническому заданию, разработанному на кафедре ТЦБП АГТУ по результатам проведенных научных исследований.

Технические характеристики:

- тип силоизмерителя – тензорезисторный;
- диапазон измерения нагрузки: 0...500 Н;
- пределы допускаемой погрешности машины при измерении нагрузки не более  $\pm 1\%$  от измеряемой нагрузки;
- скорость перемещения активного захвата в пределах 1...500 мм/мин;
- цена деления при измерении удлинения 1 мкм;
- испытания образцов с шириной до 50 мм.

Расстояние между зажимами регулируется и обеспечивает установку значений: 10±1 мм; 40±1 мм; 100±1 мм; 180±1 мм и промежуточных;

Режимы испытаний:

- растяжение с постоянной скоростью до разрушения образца;
- растяжение до заданной нагрузки;
- растяжение до заданного удлинения;
- циклическое нагружение до заданной нагрузки;
- циклическое нагружение до заданного удлинения.

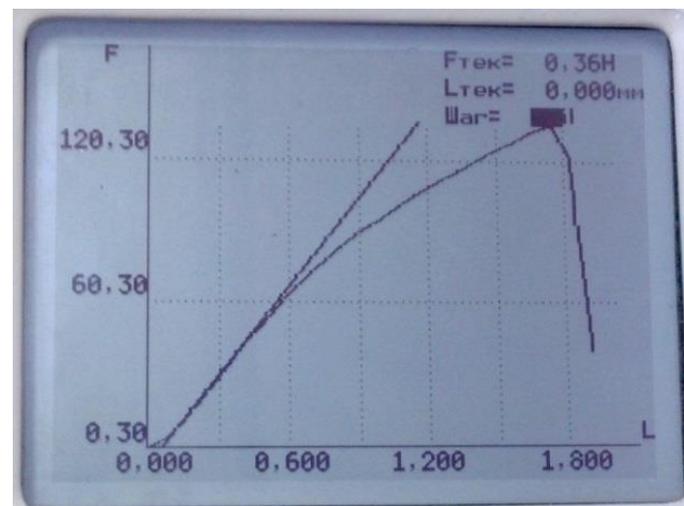
Управление разрывной машиной – микропроцессорное.

**Машина обеспечивает регистрацию изменения нагрузки и удлинения в процессе испытания и вывод информации на ПЭВМ (интерфейс RS 232C)**

# Проведение испытания на растяжение



Экран пульта управления перед испытанием



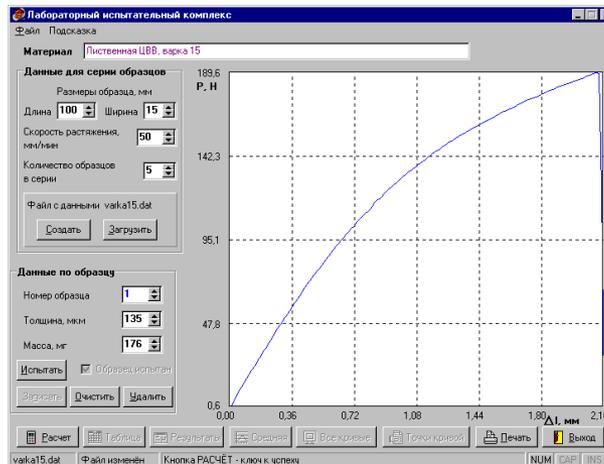
кривая нагрузка-удлинение, полученная при испытании единичного образца

Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

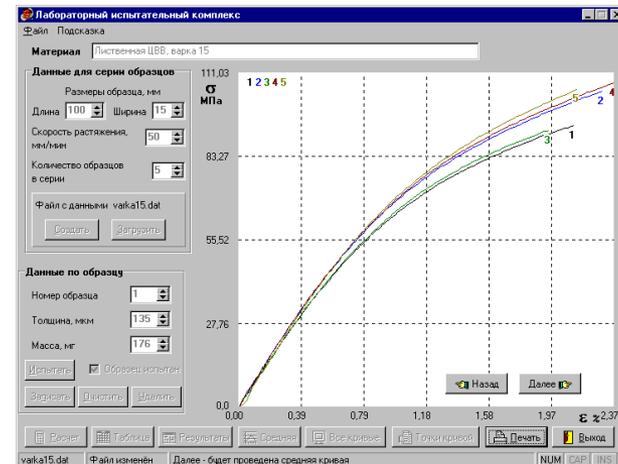
# ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

## Лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов

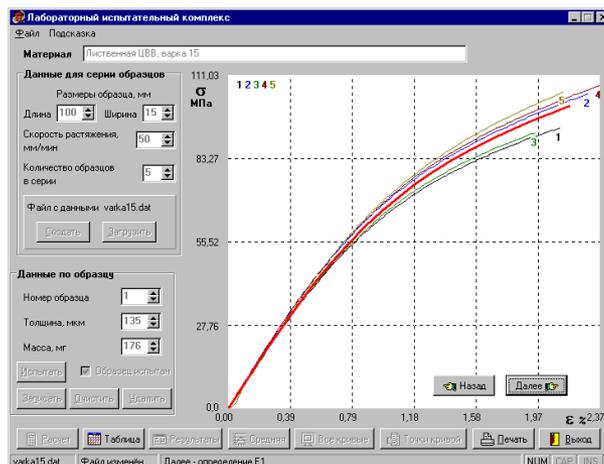
Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении



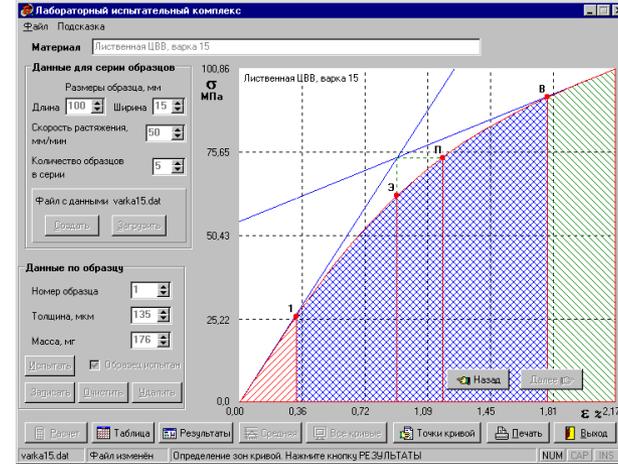
Результат единичного испытания



Результат для параллельных образцов



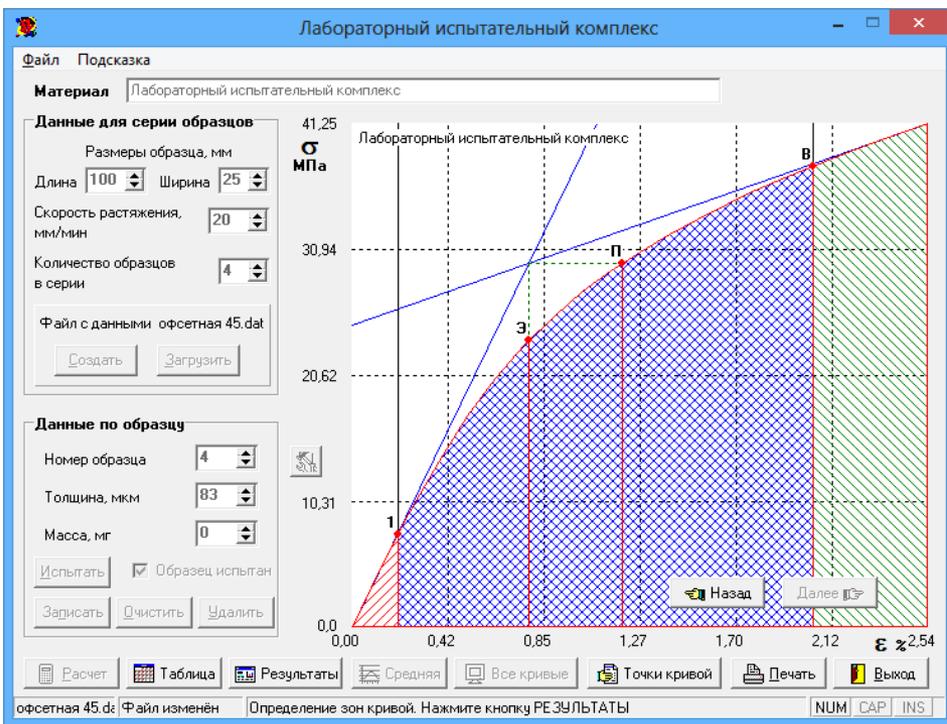
Построение средней кривой



Результат обработки

Комаров В.И., Казаков Я.В. Анализ механического поведения целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки // Лесной вестник МГУЛ. – 2000. – №3 (12). – С.52-62.

# Отчет о результатах испытания на растяжение



офсетная 45.txt — Блокнот

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Офсетная, 45 гр. к MD  
 Длина образцов - 100,0 мм;  
 Ширина образцов - 25,0 мм;  
 Скорость испытания - 20 мм/мин  
 Испытано образцов - 4  
 Данные записаны в файле - офсетная 45.dat  
 Средняя толщина образца - 83,0 мкм  
 Разрывная длина - не определена  
 Плотность - не определена  
 Жесткость при растяжении  $E_t$  - 317,3 кН/м  
 ТЕА - 57,15 Дж/м<sup>2</sup>

Величины характеристик в точках кривой:

Хар-ка	Ед.изм	1	Э	П	В	Р
Р	Н	19,19	49,17	62,87	81,39	85,59
Напр.	МПа	9,25	23,70	30,30	39,23	41,25
Удли.	мм	0,249	0,792	1,233	2,239	2,545
Дефор.	%	0,25	0,79	1,23	2,24	2,54
Работа	мДж	2,1	21,4	45,3	118,6	142,9
$E_t$	МПа	3823	1918	1199	697	625
Еод	МПа	3717	2990	2457	1752	1621
n	сек	----	37,3	29,8	25,7	24,9

Величины характеристик в точках кривой в % от разрушающего:

Хар-ка	1	Э	П	В	Р
Р	22,4	57,4	73,5	95,1	100,0
Напр.	22,4	57,4	73,5	95,1	100,0
Удли.	9,8	31,1	48,4	88,0	100,0
Дефор.	9,8	31,1	48,4	88,0	100,0
Работа	1,5	15,0	31,7	83,0	100,0
$E_t$	611,8	306,9	191,9	111,5	100,0
Еод	229,3	184,5	151,6	108,1	100,0
n	----	149,6	119,5	103,1	100,0

Составляющие общей деформации и работы, %

Зоны	Деформация	Работа
Упругая	9,8	1,5
Зам.упр.	78,2	81,5
Пластич.	12,0	17,0

# Текущие характеристики средней кривой – количественные параметры кинетики деформирования

офсетная 45t.txt — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

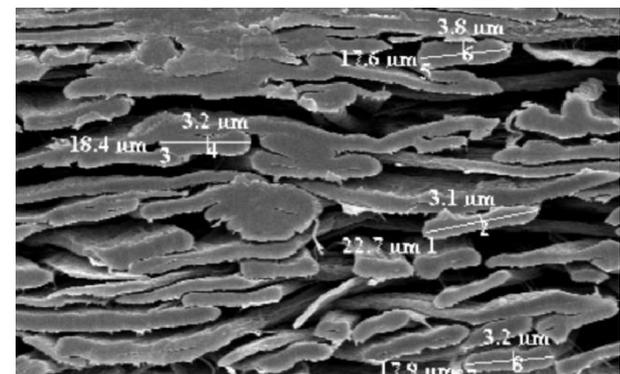
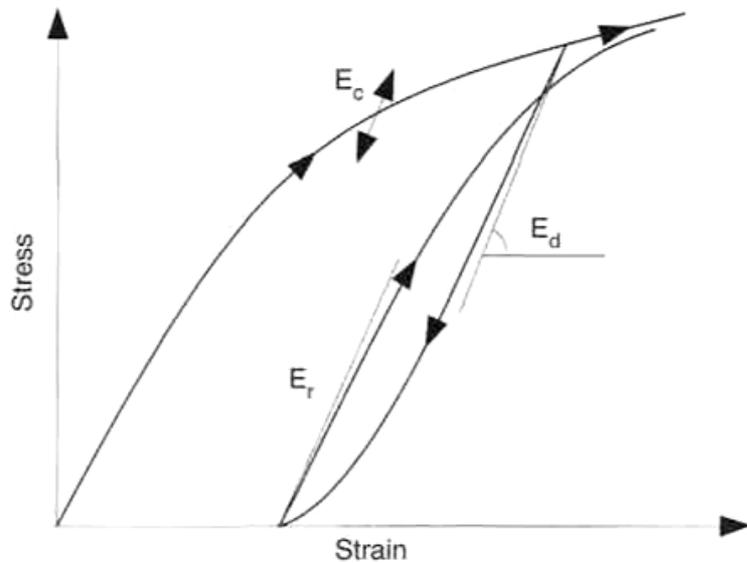
Текущие характеристики средней кривой  
 Офсетная бумага, 45 град  
 Толщина образца, мкм ; 83,0

---

№ ;	dl, мм ;	F, Н ;	Дефор., % ;	Напр., МПа ;	A, мДж ;	Et, МПа ;	Eод, МПа ;
1 ;	0,000 ;	0,00 ;	0,000 ;	0,00 ;	0,000 ;	0,0 ;	0,0 ;
2 ;	0,050 ;	3,97 ;	0,050 ;	1,91 ;	0,099 ;	3823,5 ;	3823,5 ;
3 ;	0,100 ;	7,93 ;	0,100 ;	3,82 ;	0,397 ;	3823,5 ;	3823,5 ;
4 ;	0,150 ;	11,80 ;	0,150 ;	5,69 ;	0,890 ;	3724,0 ;	3790,3 ;
5 ;	0,200 ;	15,54 ;	0,200 ;	7,49 ;	1,573 ;	3605,1 ;	3744,0 ;
6 ;	0,250 ;	19,28 ;	0,250 ;	9,29 ;	2,444 ;	3605,1 ;	3716,2 ;
7 ;	0,300 ;	22,71 ;	0,300 ;	10,94 ;	3,493 ;	3305,2 ;	3647,7 ;
8 ;	0,350 ;	26,11 ;	0,350 ;	12,58 ;	4,714 ;	3275,7 ;	3594,6 ;
9 ;	0,400 ;	29,36 ;	0,400 ;	14,15 ;	6,100 ;	3133,4 ;	3536,9 ;
10 ;	0,450 ;	32,35 ;	0,450 ;	15,59 ;	7,643 ;	2886,9 ;	3464,7 ;
11 ;	0,500 ;	35,35 ;	0,500 ;	17,03 ;	9,335 ;	2886,9 ;	3406,9 ;
12 ;	0,550 ;	38,00 ;	0,550 ;	18,32 ;	11,169 ;	2561,0 ;	3330,0 ;
13 ;	0,600 ;	40,59 ;	0,600 ;	19,56 ;	13,134 ;	2490,0 ;	3260,0 ;
14 ;	0,650 ;	43,07 ;	0,650 ;	20,75 ;	15,225 ;	2389,8 ;	3193,1 ;
15 ;	0,700 ;	45,27 ;	0,700 ;	21,82 ;	17,434 ;	2127,5 ;	3117,0 ;
16 ;	0,750 ;	47,48 ;	0,750 ;	22,88 ;	19,753 ;	2127,5 ;	3051,0 ;
17 ;	0,800 ;	49,46 ;	0,800 ;	23,83 ;	22,176 ;	1903,1 ;	2979,2 ;
18 ;	0,850 ;	51,34 ;	0,850 ;	24,74 ;	24,696 ;	1820,8 ;	2911,1 ;
19 ;	0,900 ;	53,19 ;	0,900 ;	25,63 ;	27,309 ;	1774,0 ;	2847,9 ;
20 ;	0,950 ;	54,81 ;	0,950 ;	26,42 ;	30,009 ;	1570,8 ;	2780,7 ;
21 ;	1,000 ;	56,44 ;	1,000 ;	27,20 ;	32,791 ;	1570,8 ;	2720,2 ;
22 ;	1,050 ;	57,94 ;	1,050 ;	27,92 ;	35,650 ;	1443,1 ;	2659,4 ;

# Индикатор реакции структуры на приложение нагрузки

Кривая «напряжение-деформация» может рассматриваться, как индикатор состояния структуры целлюлозно-бумажного материала, поскольку любые изменения самой структуры и условий испытания приводят к изменению хода кривой «напряжение-деформация» и, как следствие, величин деформационных характеристик.

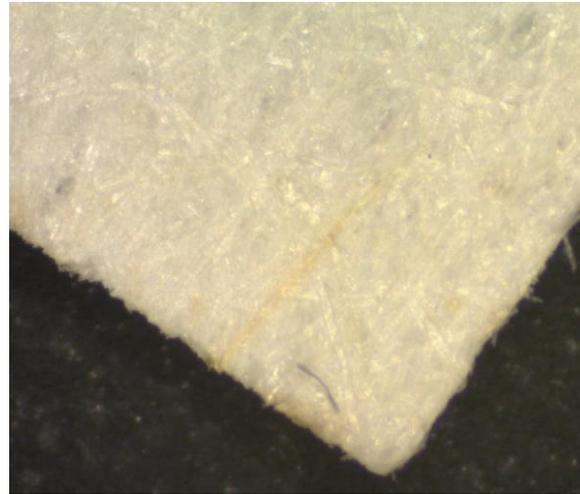


# Характеристика исследованных образцов бумаги и картона

Материал	Масса 1 м <sup>2</sup> , г	Композиция по волокну	Зольность, %	Слойность	Анизотропия TSI <sub>MD/CD</sub>
Газетная бумага	45	ХТММ – 90 % сульфатная хвойная беленая целлюлоза – 10 %	5	однослойная	3,56
Офсетная бумага	60	сульфатная хвойная беленая целлюлоза – 30 % сульфатная лиственная беленая целлюлоза – 10 %	15	однослойная	2,38
Картон топ-лайнер	125	сульфатная хвойная небеленая целлюлоза – 40 % сульфатная лиственная небеленая целлюлоза – 30 %;	–	основной бурый слой – 60 %	2,55
		сульфатная хвойная беленая целлюлоза – 20 % сульфатная лиственная беленая целлюлоза – 20 %	10	покровный белый слой – 40 %,	
Картон крафт-лайнер	140	небеленая сульфатная хвойная целлюлоза высокого выхода – 80 % полуцеллюлоза – 20 %	–	основной слой – 80 %	2,88
		небеленая сульфатная хвойная целлюлоза высокого выхода – 100 %	–	покровный слой – 20 %	
Картон тест-лайнер	125	макулатура МС5Б – 100 %	–	однослойный	2,42

Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

# Структура образцов



Газетная бумага



Топ-лайнер

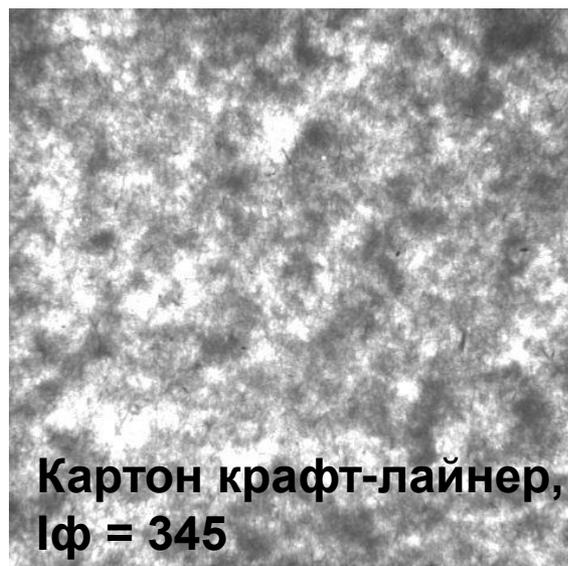
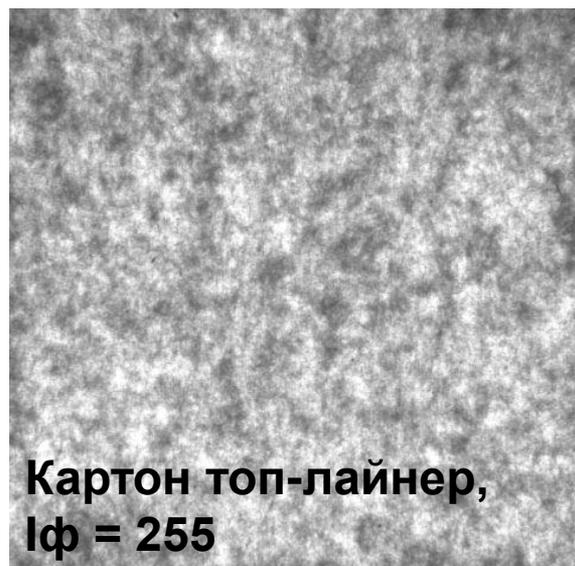
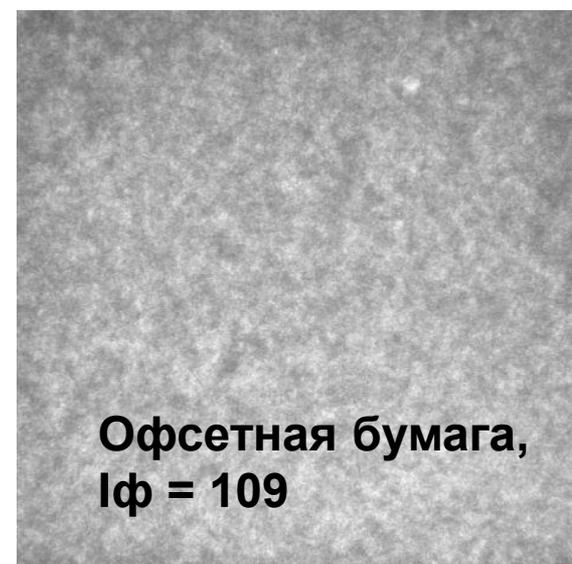
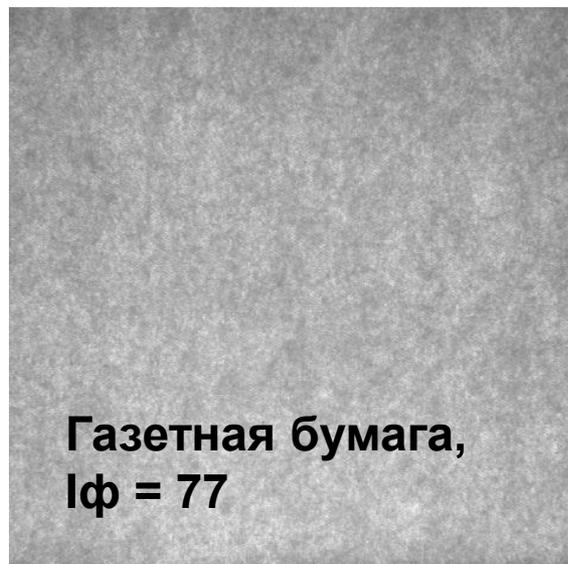


Крафт-лайнер



Тест-лайнер

# Неоднородность структуры бумаги и картона



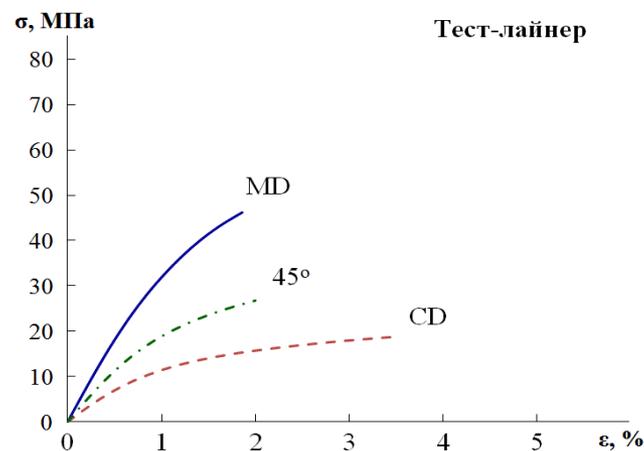
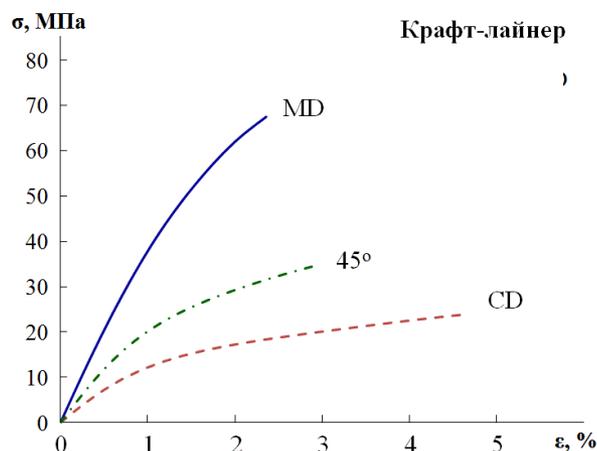
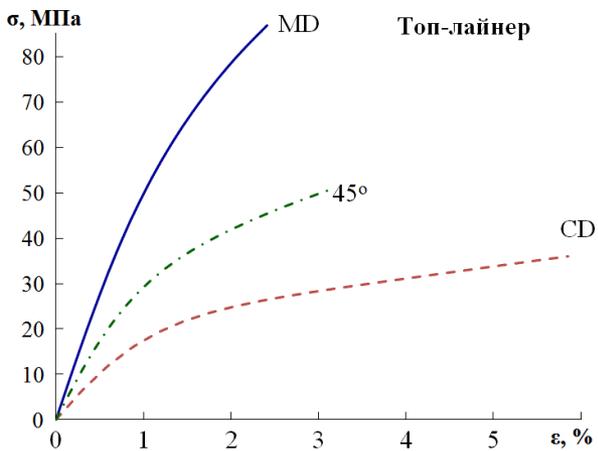
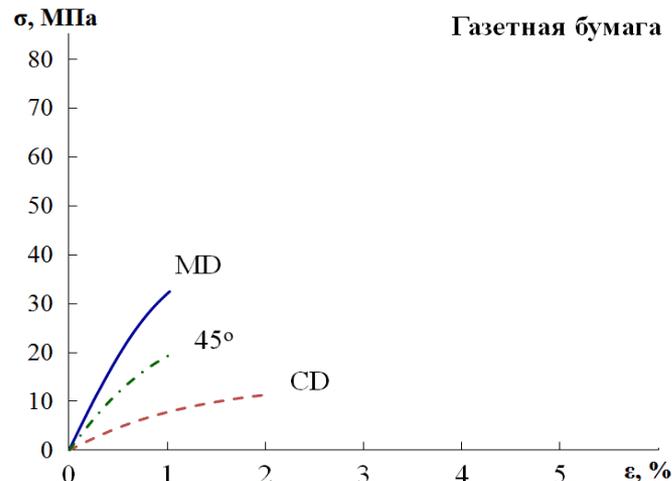
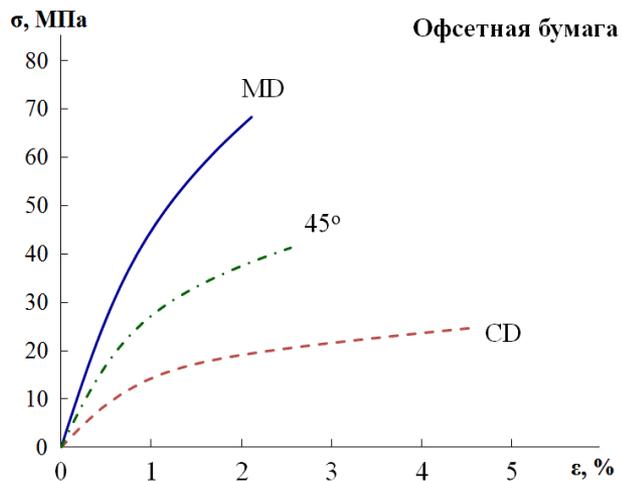
Пример изображения просвета бумаги и картона, полученных в проходящем поляризованном свете на анализаторе формирования PTI Formation Tester, образец 120×120 мм

Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

# Физико-механические характеристики исследованных видов бумаги

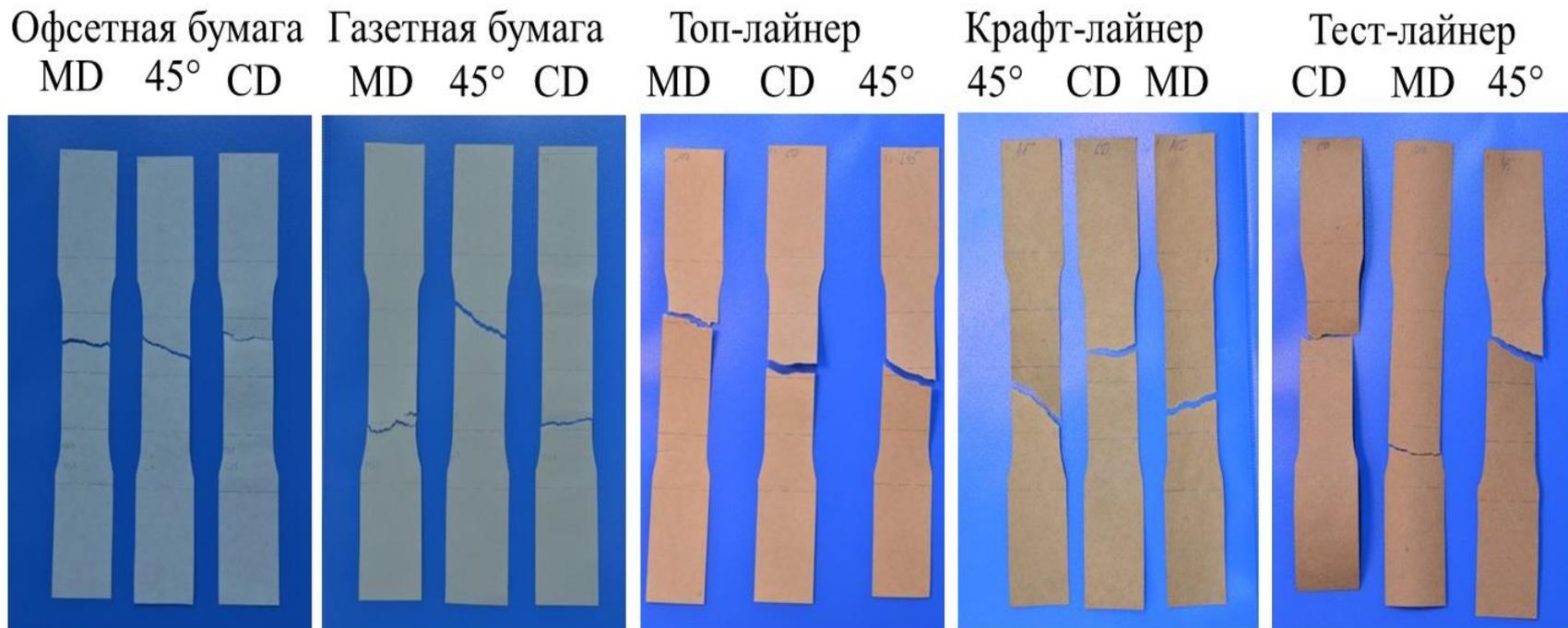
Образец	Офсетная	Газетная	Топ-лайнер	Тест-лайнер	Крафт-лайнер
Толщина, мкм	83±0,7	70±0,7	165±2,7	207±2,5	216±1,9
Масса 1 м <sup>2</sup>	60,0±0,4	43,7±0,4	127,6±1,9	126,4±2,1	141±1,5
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,717±0,006	0,619±0,006	0,774±0,015	0,610±0,008	0,651±0,007
Индекс формования	109±5	77±3	244±7	361±12	345±24
Пористость, мл/мин	1054±83	282±70	371±68	351±81	329±48
Воздухонепроницаемость (Герлей), сек	11,5±0,8	44,7±11,1	33,5±6,6	36±9	37±5
T <sub>SI</sub> <sub>MD</sub>	12,0±0,1	8,1±0,1	14,5±0,35	11,2±0,04	13,2±0,33
T <sub>SI</sub> <sub>CD</sub>	5,0±0,08	2,3±0,03	5,8±0,37	4,6±0,02	4,5±0,08
T <sub>SI</sub> <sub>MD/CD</sub>	2,38±0,04	3,56±0,06	2,55±0,11	2,42±0,02	2,88±0,07
T <sub>SO</sub> <sub>angle</sub>	-0,72±1,4	2,27±2,2	-0,36±2,9	-3,91±1,4	0,92±1,4

# Зависимости «напряжение-деформация»



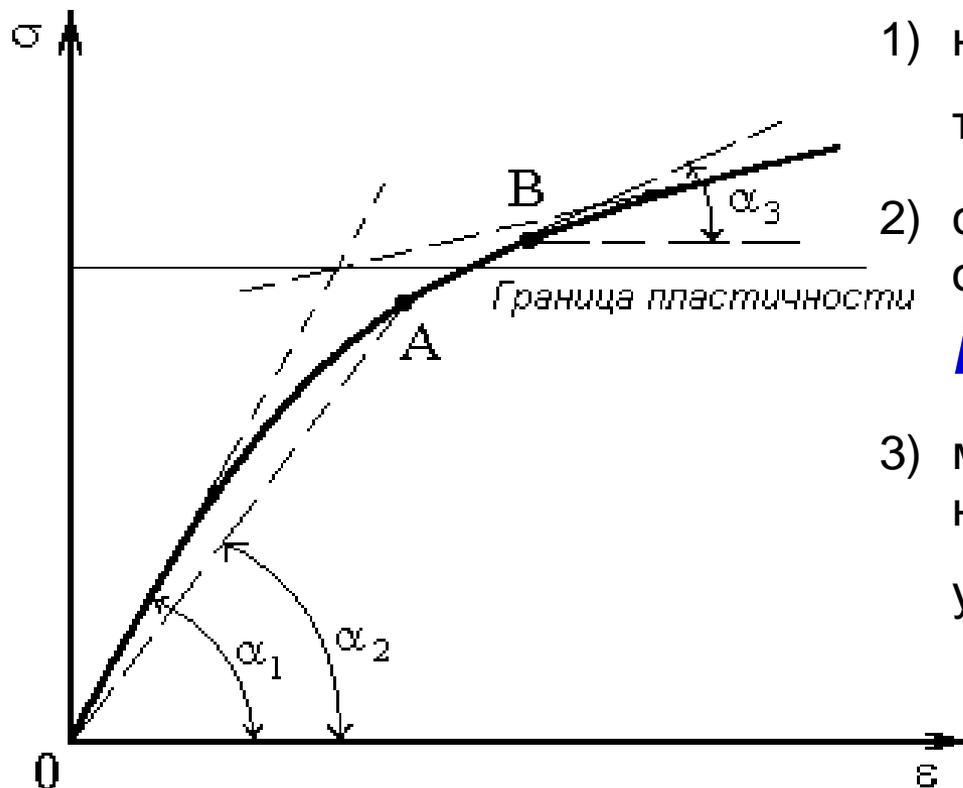
Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

# Линии разрушения образцов для трех направлений вырезки



Для образцов в направлении MD и CD линия разрушения практически перпендикулярна продольной оси образца, то есть преобладает механизм отрыва. Для образцов, вырезанных под углом 45° к машинному направлению, линия разрыва направлена под углом 45°, что свидетельствует о сдвиговом механизме разрушения. Отметим, что во всех случаях линия разрушения направлена в направлении преимущественной ориентации волокон в образце, или перпендикулярно ему.

# Количественные параметры кинетики деформирования



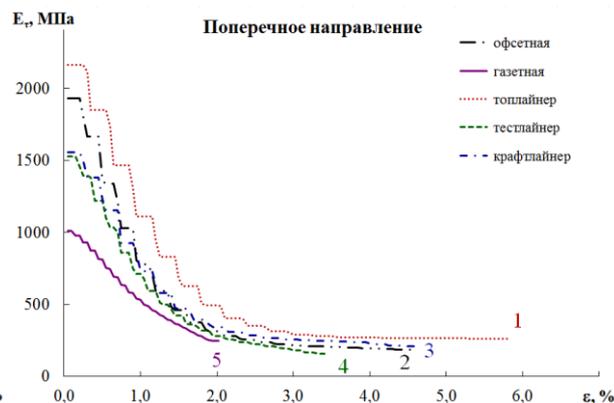
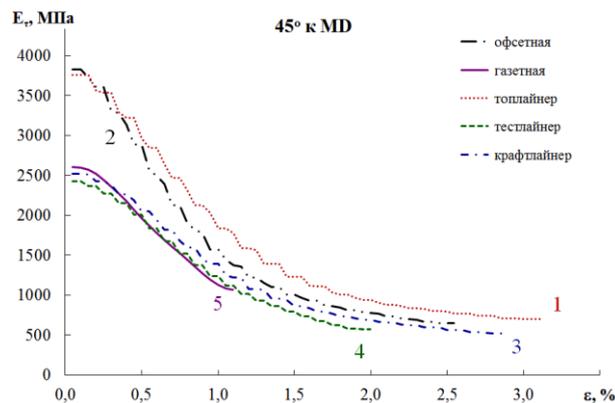
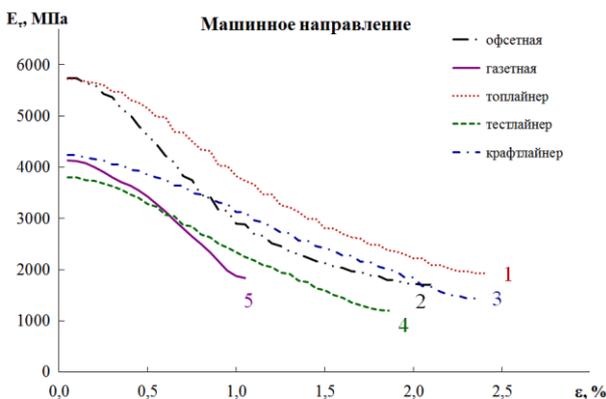
- 1) начальный модуль упругости через тангенс угла  $E_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 = \sigma_1 / \varepsilon_1$
- 2) секущий модуль упругости, или модуль общей деформации  $E_{\text{од}} = \operatorname{tg} \alpha_2 = \sigma / \varepsilon$
- 3) модуль упругости для выбранной точки на кривой, или текущего модуля упругости  $E_\tau = \operatorname{tg} \alpha_3 = d\sigma / d\varepsilon$

# Изменение кинетических параметров в процессе растяжения

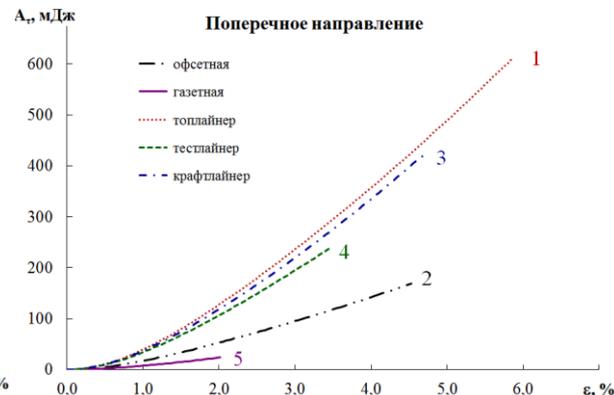
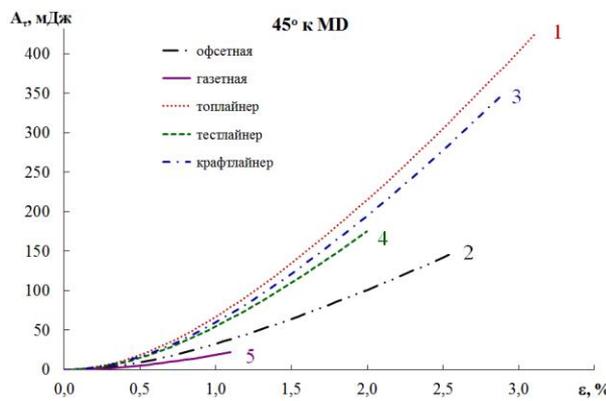
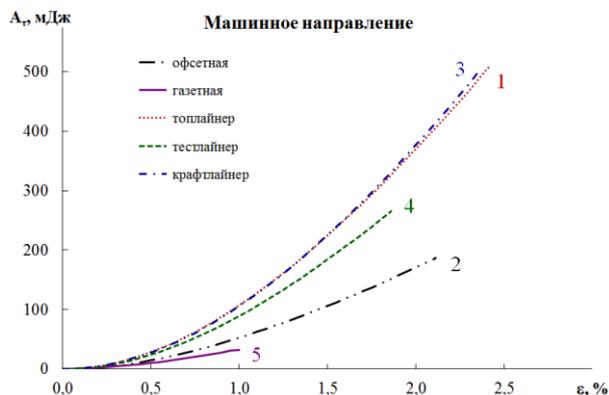
Направление	Офсетная бумага			Газетная бумага			Топ-лайнер			Тест-лайнер			Крафт-лайнер		
	MD	CD	45	MD	CD	45	MD	CD	45	MD	CD	45	MD	CD	45
Масса 1 м <sup>2</sup>	60	60	60	45	45	45	125	125	125	125	125	125	140	140	140
δ, мм	84	83	83	67	67	68	160	162	163	206	208	207	213	216	215
ρ, г/см <sup>3</sup>	0,717	0,717	0,717	0,619	0,619	0,619	0,774	0,774	0,774	0,610	0,610	0,610	0,651	0,651	0,651
A <sub>1</sub> , мДж	4,1	1,5	2,1	1,5	0,4	0,7	10,2	4,8	5,4	5,2	2,0	3,2	8,9	4,0	5,8
A <sub>3</sub> , мДж	34,1	14,8	21,4	11,4	5,3	6,4	112,7	41,0	59,6	71,2	29,7	37,9	147,4	37,6	52,5
A <sub>П</sub> , мДж	54,7	38,7	45,3	15	9	9	169	105	112	111	78	65	212	94	102
A <sub>Р</sub> , мДж	136,4	125,3	118,6	25,6	19,7	16,7	368,4	409,8	308,7	207,6	191	135,2	391	309,1	253,3
A <sub>р</sub> , мДж	183,0	165,7	142,9	31,2	23,8	21,6	492,1	594,2	414	256,4	231,3	169,6	483,1	407,0	335,1
E <sub>1</sub> , МПа	5735	1931	3823	4128	1009	2603	5731	2162	3758	3802	1529	2427	4233	1558	2519
E <sub>3</sub> , МПа	3417	874	1918	3070	586	1806	3645	1067	1969	2438	695	1413	2786	730	1340
E <sub>П</sub> , МПа	2797	396	1199	2801	456	1646	3118	550	1312	2076	348	1053	2415	387	946
E <sub>Р</sub> , МПа	1867	202	697	2034	274	1182	2171	267	779	1374	184	651	1668	234	592
E <sub>2</sub> , МПа	1696	186	625	1839	244	1065	1925	259	701	1201	159	569	1433	208	522
E <sub>1</sub> <sup>од</sup> , МПа	5603	1879	3717	4078	986	2578	5635	2110	3654	3751	1489	2376	4163	1501	2462
E <sub>3</sub> <sup>од</sup> , МПа	4802	1474	2990	3736	821	2304	4901	1684	2984	3261	1155	2009	3645	1193	2033
E <sub>П</sub> <sup>од</sup> , МПа	4406	1082	2457	3643	740	2219	4601	1328	2533	3064	872	1808	3448	922	1760
E <sub>Р</sub> <sup>од</sup> , МПа	3528	627	1752	3321	603	1972	3900	729	1828	2661	602	1468	3049	578	1326
E <sub>р</sub> <sup>од</sup> , МПа	3232	544	1621	3167	564	1846	3601	615	1625	2485	542	1338	2860	513	1195

# Изменение в процессе деформирования

Текущий модуль упругости  $E_t$



Работа деформирования  $A_t$

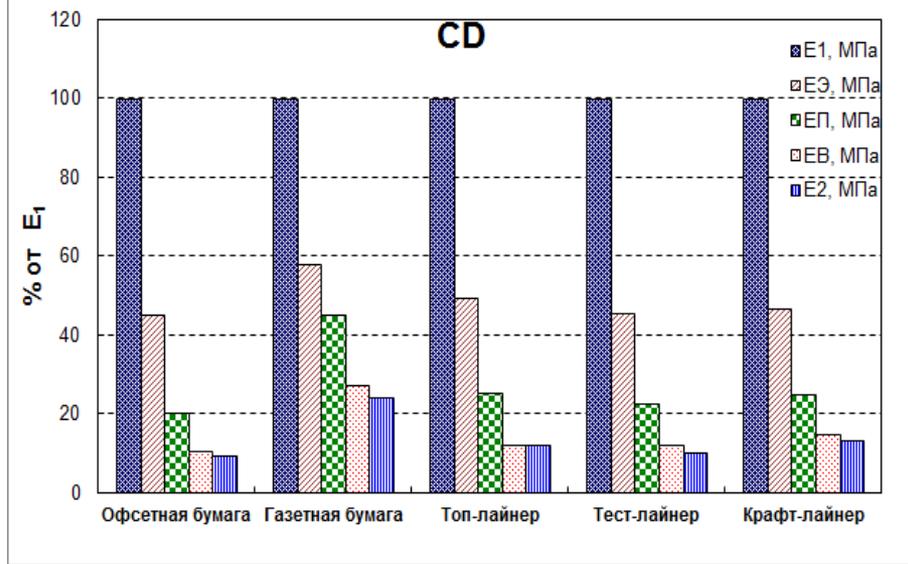
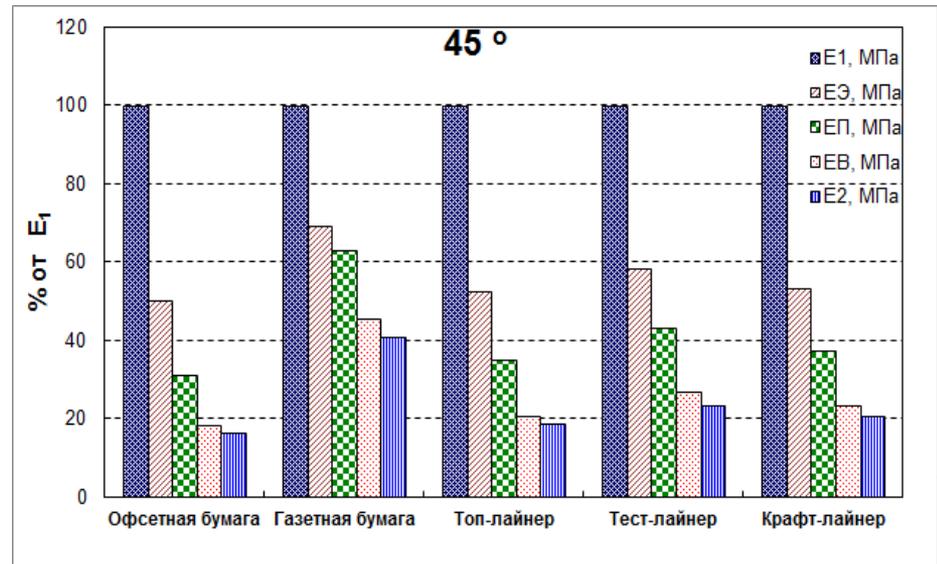
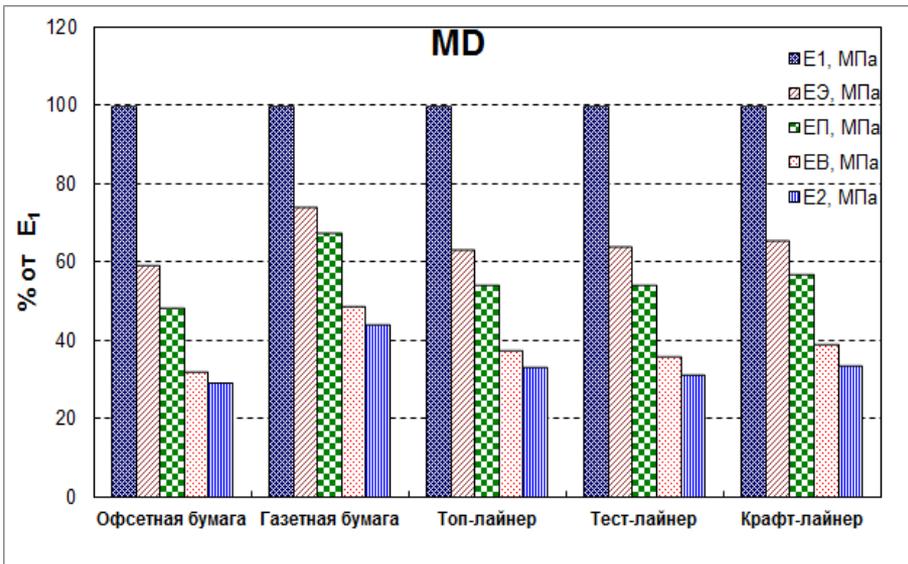


1 – топ-лайнер; 2 – офсетная бумага; 3 – крафт-лайнер; 4 – тест-лайнер; 5 – газетная бумага

Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении

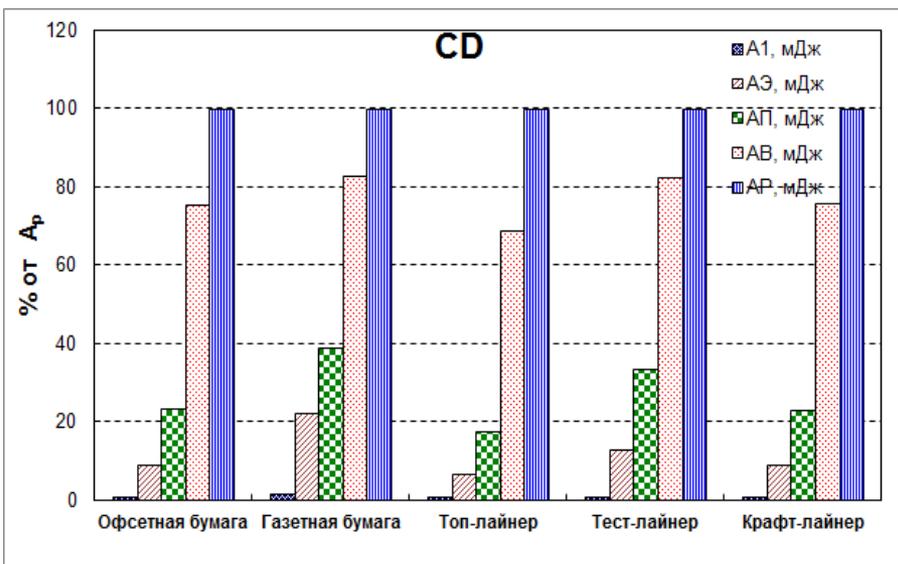
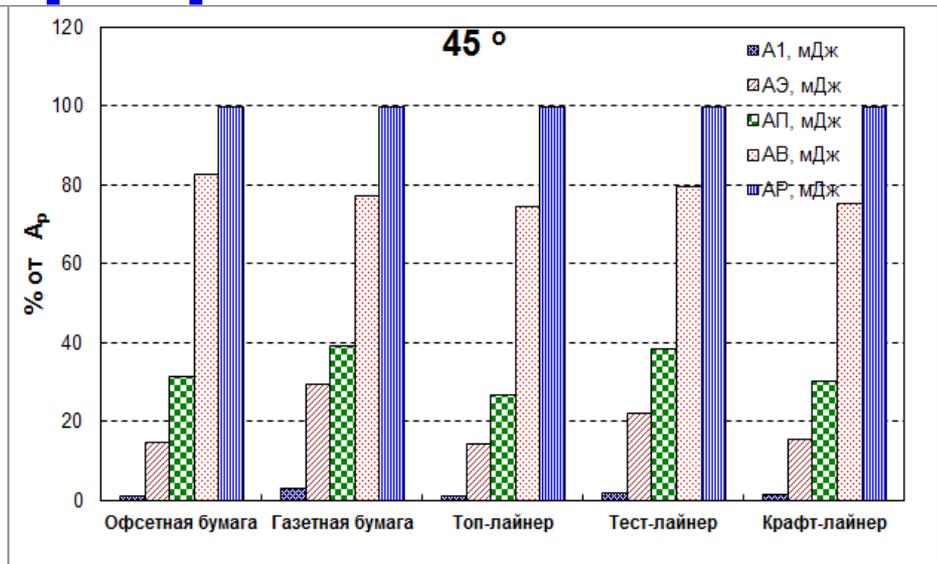
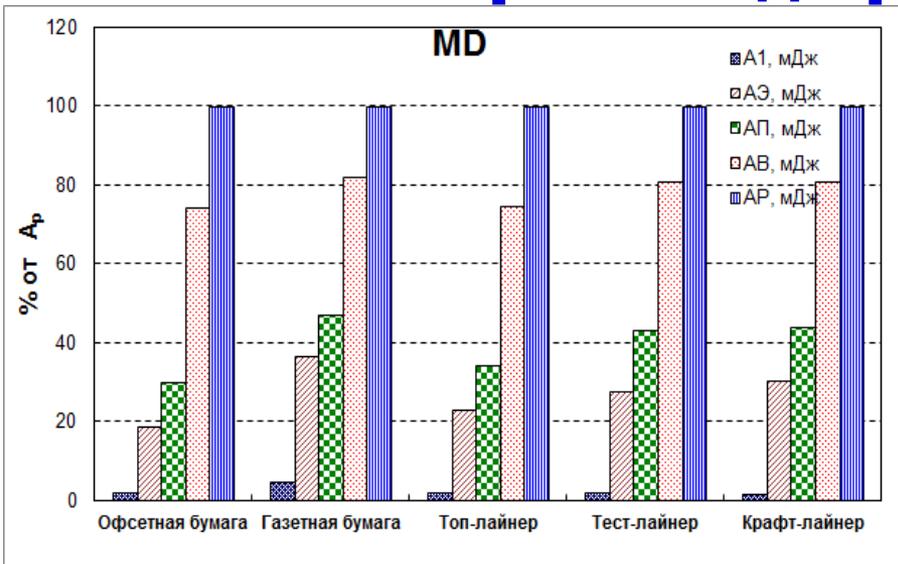
# Сравнение свойств материалов: текущий модуль упругости

Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении



# Сравнение свойств материалов: работа деформирования

Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении



# Выводы

1) Материалы по величинам характеристик в упругой зоне деформирования располагаются по убыванию в ряд: топ-лайнер – офсетная бумага – крафт-лайнер – тест-лайнер – газетная бумага. Это соответствует изменениям в композиции по волокну: (небеленая + беленая сульфатная) – беленая сульфатная – ЦВВ – вторичное волокно на основе ЦВВ, полуцеллюлозы и сульфатной небеленой целлюлозы – механическая масса.

2) При переходе к замедленно-упругой зоне офсетная бумага и крафт-лайнер меняются местами в этом ряду, что связано с более жестким волокном крафт-лайнера и большим объемом структуры за счет массы  $1 \text{ м}^2$ .

3) Наибольший вклад в работу деформирования при растяжении материалов вносит замедленно-упругая зона, при этом вклад упругой составляющей не превышает 5 %.

# Заключение

На примере типичных представителей целлюлозно-бумажных материалов, приведена количественная характеристика их вязко-упруго-вязкопластического поведения при растяжении с постоянной скоростью.

По результатам проведенного эксперимента на основании анализа кривых зависимости «напряжение-деформация» дана оценка различия в деформационном поведении различных целлюлозно-бумажных материалов в условиях одноосного растяжения с постоянной скоростью при использовании вертикальной разрывной машины с микропроцессорным управлением. Изменение величин деформационных характеристик при отклонении преимущественного угла ориентации волокон от машинного к поперечному связано с изменением соотношения вклада внутриволоконных и межволоконных связей и величиной анизотропии, связанной с длиной волокна и условиями формования на сетке БДМ.

# 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)



Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении