

- С. 61 - 64. [9]. Комаров В. И., Личутина Т.Ф. Формирование физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы в процессе производства // Бум. пром-сть. - 1985. - № 3. - С.15-17. [10]. Лендьел П., Морвай Ш. Химия и технология целлюлозного производства / Пер. с нем. - М.: Лесн. пром-сть, 1978. - 544 с. [11]. Личутин А.Ф., Комаров В.И. Влияние размеров щепы на стабильность физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы // Целлюлоза, бумага и картон: Экспресс-информация. - М.: ВНИПИЭИлеспром, 1988. - Вып.10. - С. 2-15. [12]. Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы: В 3 т. - М.: Лесн. пром-сть, 1990. - Т.2: Производство сульфатной целлюлозы // Учеб.пособие для ВУЗов. - 600 с. [13]. ОСТ 13.163-83. Полуфабрикаты целлюлозно-бумажного производства. Резонансный метод определения модуля сдвига и добротности. - Введ. с 01.01.84. [14]. Пен Р.З., Менчер Э.М. Статистические методы в целлюлозно-бумажном производстве. - М.: Лесн.пром-сть, 1973. - 120 с. [15]. Стабилизация качества небеленой сульфатной целлюлозы при варке в аппарате "Камюр" / В.Н.Пахтусова, С.В.Дедов, Т.Ф.Личутина, В.И.Комаров // Лесн. журн. - 1992. - № 1. - С.101-106. - (Изв. высш. учеб. заведений). [16]. Akntaruzzamaim A.F.M., Virkola N.E. Influence of chip di mensions in kraft pulping. Part 2. Present stare and scope of the study // Paperi ja Puu. - 1979. - № 9. - P.578-590. [17]. Akntaruzzamaim A.F.M., Virkola N.E. Influence of chip dimensions in kraft pulping. Part 3. Effect on delignification and a mathematical model for predicting pulping parametrs // Paperi ja Puu. - 1979. - № 10. - P. 680-692. [18]. Akntaruzzamaim A.F.M., Virkola N.E. Influence of chip dimensions in kraft pulping. Part 5. Effect on total yield and screening rejects, prediction models // Paperi ja Puu. - 1980.- №1. - P.15. [19]. Akntaruzzamaim A.F.M., Virkola N.E. Influence of chip dimensions in kraft pulping. Part 6. Effect on the viscosity, fibre length and Bauer-McNett classification of unbleached pulp; predictive mathematical models // Paperi ja Puu. - 1980. - № 2. - P. 70-79.

Поступила 24 апреля 1995 г.

УДК 676.017

### В.И. КОМАРОВ, И.Б. ФИЛИПОВ

Архангельский государственный технический университет



Филиппов Илья Борисович родился в 1969 г., окончил в 1992 г. Архангельский лесотехнический институт, аспирант кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет 10 научных трудов в области деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.

## **ДЕФОРМАТИВНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БУМАГИ ДЛЯ ОФСЕТНОЙ ПЕЧАТИ\***

Дана сравнительная характеристика фундаментальных, деформационных и прочностных свойств полуфабрикатов, используемых для производства офсетной бумаги. Оценена стабильность качества полуфабрикатов во времени. Показано, что при различном состоянии структуры образца полуфабриката фундаментальные свойства волокон неоднородно влияют на величину характеристик деформативности и прочности.

A comparative characteristic of deformation and strength properties of offset paper pulp is given. The durability of pulp quality stability has been estimated. It has been shown that under various pulp sample structure conditions the fundamental properties of fibers ambiguously influence the value of deformability and strength characteristics.

Бумага для печати должна обладать рядом специфических свойств, хотя, как отмечается в монографии [11], печатные свойства бумаги — "... это понятие весьма неопределенное"; включающее большое количество различных характеристик. Свойства бумаги, от которых зависит ее поведение в печатном процессе, могут быть разделены на следующие группы [ 8 ]:

- а) определяющие качество прохождения бумаги через транспортную систему печатной машины;
- б) определяющие отложение компонентов бумаги на печатных цилиндрах или печатных формах.

К первой группе, кроме механической прочности, относятся такие характеристики бумаги, как модуль упругости и жесткость при изгибе, которые изучены недостаточно, несмотря на то, что оказывают большое влияние на качество [6-8, 10]. Эти характеристики отечественными стандартами не нормируются.

Известно, что обрывы полотна в процессе печати происходят не за счет увеличения соотношения нагрузка — прочность, а связаны с вариацией величин характеристик качества бумаги.

---

\* Статья является первой в серии подготовленных к печати работ, в которых рассматриваются вопросы влияния технологических факторов на деформативность и прочность книжно-журнальной бумаги для офсетной печати.

Таким образом, снижение вариации этих характеристик позволяет повышать стабильность технологического процесса. В анализе [9] работы российских бумажных предприятий отмечен ряд “технических слабостей”, в том числе и “нестабильное качество продукции”.

В технологической системе производства бумаги большое внимание уделяется качеству полуфабрикатов. Создание материала с заранее заданными свойствами невозможно без использования в прогнозировании этого фактора.

Цель данной работы – определить стабильность во времени величин характеристик, оценивающих фундаментальные [1], деформационные и прочностные свойства полуфабрикатов, которые используют при производстве книжно-журнальной бумаги для офсетной печати, и установить их корреляцию между собой.

При проведении эксперимента в течение квартала было отобрано по 20 проб следующих полуфабрикатов: хвойная белая сульфатная целлюлоза; лиственная белая сульфатная целлюлоза; хвойная и лиственная ХТММ; ТММ. Лабораторные образцы изготавливали из полуфабриката, не подвергавшегося дополнительному размолу. Масса  $1 \text{ м}^2$  образцов соответствовала массе готовой бумаги и составляла 52 г.

При испытании образцов определяли следующие характеристики: фракционный состав по длине волокна; средняя длина волокна  $l_{\text{ср}}$ ; критическая длина волокна  $l_{\text{к}}$ , (длина, ниже которой при приложении разрушающей нагрузки волокно не разрушается [4], а выдергивается из структурной матрицы); средняя ширина волокна  $d_{\text{ср}}$ ; межволоконные силы связи по Иванову  $F_{\text{св}}$ ; когезионная способность волокон по Кларку  $SV$ ; адгезия волокон по Скотту  $F_z$ ; нулевая разрывная длина  $L_0$ ; пухлость  $V$ ; начальный модуль упругости  $E_1$ ; эффективный модуль упругости  $E_2$ ; предел упругости  $\sigma_1$ ; эффективное напряжение  $\sigma_2$ ; разрушающее напряжение  $\sigma_p$ ; работа разрушения  $A_p$ ; предел упругой деформации  $\varepsilon_1$ ; эффективная деформация  $\varepsilon_2$ ; деформация разрушения  $\varepsilon_p$ ; жесткость при изгибе  $EI$ ; модуль сдвига  $G_0$ ; разрушающее усилие  $P$ ; разрывная длина  $L$ ; стойкость поверхности к выщипыванию с внешней  $P_{\text{зв}}$  и сеточной  $P_{\text{зс}}$  сторон листа; сопротивление излому  $N$ .

Экспериментальные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Физико-механические характеристики полуфабрикатов, поступающих на бумажную фабрику

Характеристики	Хвойная целлюлоза				Лиственная целлюлоза				Хвойная ХТММ				Лиственная ХТММ				ТММ				
	$\bar{X}$	max	min	V, %	$\bar{X}$	max	min	V, %	$\bar{X}$	max	min	V, %	$\bar{X}$	max	min	V, %	$\bar{X}$	max	min	V, %	
Фундаментальные:																					
$F_{св}$ , МПа	1,01	1,25	0,40	9,1	0,86	1,10	0,30	11,8	1,11	1,45	0,38	13,8	1,14	1,50	0,41	12,1	0,87	1,08	0,60	17,0	
$S_V$ , МПа	2,79	3,10	1,99	11,3	2,28	2,91	1,72	11,6	3,45	4,17	2,10	14,4	3,48	4,30	2,63	11,7	2,99	3,87	1,99	20,7	
$F_z$ , Дж / м <sup>2</sup>	146	201	102	15,1	120	155	88	11,8	139	177	115	10,9	122	162	99	13,4	109	125	85	11,4	
$L_0$ , м	3076	3630	1183	9,5	2207	2796	818	10,2	2186	2747	670	11,9	2130	2627	512	12,4	1835	2093	1548	8,9	
$V$ , см <sup>3</sup> /г	1,68	1,85	1,59	4,5	1,64	1,78	1,54	4,5	1,96	2,19	1,73	6,7	1,9	2,11	1,65	7,8	2,21	2,33	2,07	4,1	
$l_{ср}$ , мм	2,04	2,55	1,22	16,1	1,14	1,46	0,9	14,6	1,84	2,41	0,93	18,5	1,6	2,58	1,05	28,2	1,58	2,22	1,09	25,7	
$d_{ср}$ , мкм	35,6	43,6	28,4	11,0	31,9	35,3	26,8	7,6	40,6	50,0	33,6	10,6	39,0	47,0	31,4	10,9	43,2	47,9	38,4	6,1	
$L_k$ , мм	0,41	-	-	-	0,32	-	-	-	0,27	-	-	-	0,25	-	-	-	0,25	-	-	-	
Фракционный состав по длине волокон, %:																					
<0,6	6,5	11,3	2,1	41,5	7,3	17,3	0,7	...	7,3	18,0	0,7	...	7,3	12,8	0,7	46,1	15,1	28,2	2,0	...	
0,6 ... 1,2	22,8	51,3	12,0	41,6	58,5	73,5	38,7	16,3	23,4	60,7	4,5	...	34,5	61,1	2,7	...	28,2	49,3	12,7	37,4	
1,2 ... 1,8	20,4	30,0	11,3	20,0	28,0	46,0	16,7	27,9	24,2	31,4	18,0	17,6	29,3	42,7	16,0	24,0	24,7	32,7	16,0	21,8	
1,8 ... 2,4	14,9	22,4	6,0	26,8	4,2	10,7	0,7	...	20,6	30,0	10,7	27,1	13,8	32,0	3,3	...	15,7	27,3	5,4	40,8	
2,4 ... 3,0	16,0	22,7	4,7	25,8	2,8	6,0	0,7	...	14,8	26,7	1,3	39,8	9,3	24,7	2,0	...	10,8	18,7	2,7	48,7	
3,0 ... 3,6	12,4	21,3	2,7	35,4	2,0	4,0	0,7	...	8,5	12,0	4,0	29,3	6,3	18,7	0,7	...	6,8	17,3	1,3	...	
3,6 ... 4,2	6,4	17,2	1,3	...	1,3	2,0	0,7	34,6	4,1	9,3	1,3	...	3,0	9,3	0,7	...	2,6	6,7	0,7	...	
4,2 ... 4,8	2,4	6,0	0,7	...	0,7	0,7	0,7	0,0	1,1	2,1	0,7	46,7	2,0	5,7	0,7	...	1,1	2,0	0,7	...	
>4,8	1,3	2,8	0,7	...	-	-	-	-	0,7	0,7	0,7	0,0	0,7	0,7	0,7	0,0	0,7	0,7	0,7	0,0	

Продолжение табл. 1

Характеристики	Хвойная целлюлоза			Лиственная целлюлоза			Хвойная ХТММ			Лиственная ХТММ			ТММ			
	$\bar{X}$	max	min	V, %	$\bar{X}$	max	min	V, %	$\bar{X}$	max	min	V, %	$\bar{X}$	max	min	V, %
Деформационные:																
$E_1$ , МПа	3500	5000	2330	24,8	3920	5460	3170	20,5	2890	3890	1920	30,7	2740	3620	2010	20,7
$E_2$ , МПа	1711	2550	1175	19,9	2049	2630	1399	11,6	1700	3252	1050	25,7	1647	2316	1019	19,6
$E_3$ , МПа	624	1076	457	25,4	777	988	531	15,2	739	1667	449	34,4	736	1029	350	24,4
$\sigma_1$ , МПа	12,8	17,5	5,6	23,7	13,2	15,8	5,7	17,7	10,2	23,5	5,4	36,9	10,4	15,9	4,8	28,1
$\sigma_2$ , МПа	17,5	21,7	10,7	10,4	16,9	21,3	8,9	11,2	14,4	20,1	6,8	18,8	16,0	21,7	6,9	20,0
$\epsilon_1$ , %	0,37	0,44	0,28	7,9	0,35	0,44	0,25	10,6	0,37	0,48	0,28	14,3	0,39	0,52	0,28	18,0
$\epsilon_2$ , %	0,61	0,97	0,49	18,2	...	...	...	...	0,64	0,84	0,42	13,8	0,67	0,89	0,52	13,6
$\epsilon_3$ , %	1,91	2,40	1,52	13,0	1,33	1,68	1,00	13,2	1,42	1,72	1,28	7,3	1,35	1,68	1,14	9,9
$EI$ , мН·см <sup>2</sup>	32,5	51,3	21,2	26,4	34,3	80,0	21,0	42,4	34,7	56,4	23,0	25,3	33,4	71,3	24,6	32,0
$G_0$ , МПа	611	692	544	6,8	622	717	489	9,4	431	558	367	13,6	463	605	366	15,2
Прочностные:																
$R$ , Н	39,8	73,8	31,4	23,1	33,8	62,9	22,2	23,2	33,2	41,0	27,4	11,2	33,8	40,0	20,4	13,6
$L$ , М	5060	6090	4330	23,3	4350	5610	3610	23,0	4280	5250	3800	10,8	4300	5020	3650	12,9
$\sigma_p$ , МПа	30,3	55,0	22,6	22,4	26,7	48,2	15,9	23,4	22,3	31,1	15,4	18,3	23,2	30,5	13,1	20,4
$A_p$ , мДж	48,2	64,1	26,6	22,4	29,0	47,4	14,7	25,7	29,3	35,6	22,1	13,9	28,5	39,4	12,4	19,4
$R_{2\theta}$ , м/с	1,82	2,20	1,50	11,9	1,65	1,90	1,48	7,1	1,82	2,10	1,40	11,0	1,89	2,36	1,52	13,1
$R_{2\epsilon}$ , м/с	2,04	2,40	1,66	9,5	1,88	2,18	1,68	6,5	2,13	2,60	1,50	11,3	2,19	2,60	1,80	8,4
$N$ , ч.д.п.	44	148	8	...	7	27	3	...	8	16	3	39,0	5	13	3	44,4

Примечание.  $\bar{X}$ , max, min – соответственно средняя, максимальная и минимальная величина характеристики; V – коэффициент вариации.

При испытании образцов целлюлозы и бумаги промышленного производства коэффициенты корреляции характеристик деформативности и прочности, как правило, не имеют высоких значений (хотя у образцов лабораторного производства, в некоторых случаях, наблюдается противоположная закономерность [3]). В данном случае представлялось возможным в условиях производства проследить вариацию комплекса характеристик качества полуфабрикатов, поступающих на бумажную фабрику.

Проведенный эксперимент показал, что вариация во времени ( в течение квартала) всех характеристик весьма высока, практически во всех случаях коэффициент вариации выше 5 %, которые приняты в ЦБП при оценке изменчивости величин параметров и характеристик.

Обращает на себя внимание высокая нестабильность средней длины волокна и фракционного состава по длине волокна как у целлюлозы, так и у механических масс. Вероятно, именно этим можно объяснить тот факт, что вариация характеристик деформативности и прочности полуфабрикатов в среднем в 2,0 – 2,5 раза выше по сравнению с фундаменатальными характеристиками.

Хвойная целлюлоза, как и ожидалось, оказалась наиболее прочным полуфабрикатом. Она отличается от других исследуемых полуфабрикатов более высокими значениями нулевой разрывной длины и средней длины волокна.

Лиственная целлюлоза имела высокие характеристики деформативности. Вариация характеристик деформативности у механических масс выше, чем у целлюлозы, что, очевидно, можно объяснить более высокой вариацией у этих полуфабрикатов величин когезионной способности волокон и средней длины волокна. В отличие от характеристик деформативности, величины характеристик прочности механических масс более стабильны.

По данным работы [8] величина начального модуля упругости при прохождении бумаги через печатную машину без осложнений должна составлять  $(4000 \pm 360)$  МПа.

В нашем эксперименте модуль упругости хвойной целлюлозы был равен  $(3500 \pm 868)$  МПа, лиственной целлюлозы –  $(3920 \pm 804)$  МПа, хвойной ХТММ –  $(2890 \pm 887)$  МПа, лиственной ХТММ –  $(2740 \pm 567)$  МПа, ГММ –  $(1940 \pm 371)$  МПа. Причем минимальное значение начального модуля упругости у образцов выборок полуфабрикатов составляло половину от требуемого. В этих условиях особое значение в технологической системе производства приобретает процесс размола.

## Корреляция фундаментальных свойств и

Характеристики	Коэффициент корреляции	Хвойная целлюлоза				Лиственная целлюлоза			
		$SV$	$V$	$l_{cp}$	$d_{cp}$	$SV$	$V$	$l_{cp}$	$d_{cp}$
$L$	Парный	0,123	-0,442	-0,043	0,108	-0,029	0,029	0,297	-0,054
	Частный	0,207	-0,485	0,056	-0,031	-0,033	0,088	0,300	-0,015
	Множественный		0,500				0,309		
$P_{2E}$	Парный	0,272	0,054	-0,180	0,149	0,342	0,293	-0,103	-0,029
	Частный	0,172	0,010	-0,111	0,040	0,244	0,160	-0,061	-0,089
	Множественный		0,292				0,385		
$P_{2C}$	Парный	0,089	-0,033	-0,117	0,304	0,412	0,098	-0,132	-0,206
	Частный	-0,116	-0,024	-0,157	0,323	0,437	-0,115	-0,150	-0,283
	Множественный		0,347				0,506		
$E_1$	Парный	0,195	-0,140	0,107	0,251	0,252	0,213	-0,105	0,006
	Частный	0,183	-0,211	0,179	0,143	0,174	0,106	-0,070	-0,038
	Множественный		0,362				0,283		
$E_1$	Парный	0,144	-0,005	0,132	0,344	-0,021	0,390	-0,127	0,287
	Частный	0,033	-0,046	0,143	0,288	-0,274	0,443	-0,052	0,275
	Множественный		0,371				0,520		

Важная задача при прогнозировании качества целлюлозно-бумажных материалов — установить связь фундаментальных свойств волокнистого материала с характеристиками деформативности и прочности. Корреляция некоторых фундаментальных свойств с физико-механическими характеристиками полуфабрикатов представлена в табл. 2, из которой следует, что величины парной и частной [5] корреляции имеют низкие значения.

Можно утверждать, что изменение одной или нескольких характеристик волокна зачастую препятствует полноценному проявлению влияния других. Об этом свидетельствуют наблюдаемые во многих случаях более высокие значения частной корреляции по сравнению с парной. Коэффициенты множественной корреляции в некоторых случаях значительно превосходят коэффициенты частной корреляции. Это свидетельствует о более сильном совокупном влиянии факторов по сравнению с влиянием отдельных характеристик. Принимая во внимание вышеизложенное и тот факт, что зависимость между фундаментальными и физико-механическими свойствами исследуемых материалов скорее всего нелинейна, для выяснения характера и степени влияния фундаментальных показателей более целесообразно использо-

Таблица 2

## Физико-механических характеристик полуфабрикатов

Хвойная ХТММ				Лиственная ХТММ				ТММ			
$SV$	$V$	$l_{cp}$	$d_{cp}$	$SV$	$V$	$l_{cp}$	$d_{cp}$	$SV$	$V$	$l_{cp}$	$d_{cp}$
0,212	-0,751	-0,706	0,168	0,107	-0,585	-0,315	-0,743	0,357	0,165	0,123	0,141
-0,329	-0,628	-0,559	0,243	0,282	-0,317	0,269	-0,572	-0,321	-0,036	0,090	-0,147
0,846				0,784				0,393			
0,220	0,081	0,057	0,266	0,266	-0,155	-0,215	-0,252	0,054	0,240	0,779	-0,284
0,286	0,132	0,087	0,271	0,199	0,103	-0,132	-0,237	0,235	0,477	0,877	-0,602
0,394				0,367				0,905			
0,246	0,035	-0,030	0,182	0,387	-0,048	-0,240	-0,316	0,458	0,567	0,205	0,622
0,272	0,129	0,008	0,179	0,345	0,402	-0,338	-0,474	-0,442	0,724	0,440	0,732
0,332				0,616				0,852			
0,093	-0,724	-0,586	0,305	0,207	-0,681	-0,529	-0,484	0,224	-0,090	0,231	-0,107
-0,456	-0,673	-0,473	0,453	0,348	-0,484	0,077	-0,029	0,502	-0,342	0,185	-0,440
0,840				0,728				0,551			
-0,701	0,303	0,153	-0,094	-0,073	0,134	-0,125	0,320	0,264	0,025	-0,503	-0,014
-0,699	0,195	-0,295	-0,064	-0,194	0,192	-0,363	0,273	0,571	-0,341	-0,625	-0,439
0,734				0,487				0,705			

вать наряду с корреляционным анализом и расчет зависимостей от нескольких переменных (фундаментальных свойств).

Представленные в табл. 3 данные о корреляции характеристик прочности и деформативности исследуемых полуфабрикатов подтверждают имеющиеся сведения, что в случае использования для расчетов представительной выборки образцов, отобранных в производственных условиях, тесной корреляции между характеристиками деформативности и прочности, как правило, не наблюдается и отсутствует четкая закономерность в тесноте корреляции между характеристиками при переходе от одного полуфабриката к другому.

В работе [2] показано, что кривую зависимости напряжение-деформация, являющуюся интегральной характеристикой механических свойств материала, можно использовать для оценки качества целлюлозно-бумажных материалов. Отмечается сложность явлений, обуславливающих механическое поведение данных материалов, и то, что к основным факторам, влияющим на физико-механические свойства, относятся межволоконные силы связи (когезионная способность волокон) и средняя длина волокна.

Достаточно представительная выборка позволила отобрать образцы по следующим признакам: равенство межволокон-



ных сил связи; одинаковая средняя длина волокна; отличающиеся в сильной степени величиной начального модуля упругости; отличающиеся в сильной степени величиной разрывной длины (т.е. прочностью). Кроме того, она дала возможность проследить различия в ходе кривых  $\sigma - \epsilon$ , соответствующих данным образцам.

Таблица 3

Корреляция характеристик деформативности и прочности полуфабрикатов

Характеристики	$P$	$L$	$\sigma_p$	$A_p$	$N$	$P_{2b}$	$P_{2c}$
Хвойная целлюлоза							
$E_1$	0,624	0,620	0,834	0,265	0,352	0,370	0,115
$E_3$	0,517	0,491	0,738	-0,013	0,261	0,407	0,109
$E_2$	-0,008	-0,054	0,028	-0,506	0,090	0,118	-0,201
$\epsilon_p$	0,266	0,271	0,036	0,773	0,074	-0,137	0,200
$G_0$	0,269	0,307	0,288	0,080	0,308	0,177	-0,012
$EI$	0,584	0,571	0,589	0,197	0,423	0,432	0,325
Лиственная целлюлоза							
$E_1$	-0,726	0,765	0,729	0,609	-0,220	0,574	0,541
$E_3$	0,764	0,820	0,750	0,534	-0,050	0,454	0,508
$E_2$	-0,198	-0,138	-0,193	-0,538	-0,080	-0,415	0,002
$\epsilon_p$	0,486	0,508	0,560	0,856	0,286	0,332	-0,142
$G_0$	0,067	0,256	0,274	0,090	0,109	0,297	0,084
$EI$	0,511	0,430	0,521	0,568	0,087	0,022	-0,250
Хвойная ХТММ							
$E_1$	0,809	0,728	0,749	0,554	0,150	-0,144	-0,080
$E_3$	0,811	0,880	0,922	0,589	0,030	-0,258	-0,162
$E_2$	0,290	0,342	0,363	0,075	-0,129	-0,103	-0,076
$\epsilon_p$	0,026	-0,016	0,164	0,514	-0,377	0,395	0,433
$G_0$	0,739	0,772	0,859	0,523	-0,068	-0,179	-0,261
$EI$	0,748	0,602	0,581	0,583	0,201	-0,032	0,037
Лиственная ХТММ							
$E_1$	0,678	0,591	0,723	0,245	-0,374	0,091	0,027
$E_3$	0,704	0,604	0,813	0,324	-0,311	-0,080	-0,231
$E_2$	0,602	0,580	0,619	0,393	-0,026	-0,191	-0,356
$\epsilon_p$	0,200	0,316	0,191	0,720	0,151	-0,057	0,160
$G_0$	0,665	0,609	0,892	0,503	-0,488	0,203	0,102
$EI$	-0,071	-0,223	-0,192	-0,258	-0,082	-0,237	0,020
ТММ							
$E_1$	0,879	0,862	0,654	0,272	0,256	0,579	-0,076
$E_3$	0,774	0,825	0,790	0,050	0,079	0,374	0,029
$E_2$	0,473	0,548	0,462	-0,158	0,184	0,223	-0,059
$\epsilon_p$	-0,526	-0,579	-0,477	0,430	0,026	-0,121	0,317
$G_0$	0,150	0,179	0,330	-0,709	-0,181	-0,270	-0,556
$EI$	0,520	0,560	0,824	0,096	-0,376	-0,108	-0,267

Примечание. Минимальный значимый коэффициент корреляции равен 0,774.

В табл. 4 (где 1 и 2 – номера образцов, соответствующие номерам кривых на рисунках) и на рис. 1 представлены результаты испытаний образцов, имеющих у данного вида полуфабриката равные межволоконные силы связи.

Из рис. 1 видно, что ход кривых  $\sigma - \epsilon$  отличается большим разнообразием.

Таблица 4

**Фундаментальные, прочностные  
и деформационные характеристики образцов  
с равными когезионными силами в структуре**

Характеристики	Хвойная целлюлоза		Лиственная целлюлоза		Хвойная ХТММ		Лиственная ХТММ		ТММ	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Фундаментальные:</b>										
$F_{св}$ , МПа	1,12	1,05	0,85	0,86	1,36	1,22	1,31	1,02	0,93	0,99
$S_V$ , МПа	2,80	2,78	2,17	2,13	3,66	3,69	3,38	3,34	3,25	3,27
$F_z$ , Дж/м <sup>2</sup>	122	102	125	133	172	115	117	99	123	125
$L_0$ , м	2560	3170	2010	2350	2060	2280	2470	2340	1690	1920
$V$ , см <sup>3</sup> /г	1,61	1,70	1,62	1,58	1,72	1,93	1,65	2,10	2,23	2,12
$l_{ср}$ , мм	1,22	1,51	1,03	1,41	0,93	2,11	1,27	2,08	1,44	2,08
$d_{ср}$ , мкм	31,3	36,6	30,3	26,8	39,0	42,7	31,4	40,5	45,6	47,9
$l_k$ , мм	0,30	0,40	0,27	0,28	0,23	0,28	0,24	0,29	0,25	0,29
<b>Деформационные:</b>										
$E_1$ , МПа	3652	2070	4520	3320	3590	2890	3410	2190	2020	1600
$E_2$ , МПа	1790	1180	2310	1680	2020	1420	2020	1290	1290	1170
$E_3$ , МПа	680	460	870	680	1080	470	880	630	580	610
$\sigma_1$ , МПа	15,7	9,0	15,8	10,8	16,7	9,2	14,8	7,7	7,5	5,8
$\sigma_2$ , МПа	18,8	17,6	18,4	14,9	19,9	12,8	17,3	13,8	9,4	9,0
$\sigma_p$ , МПа	27,9	27,5	27,4	25,7	29,6	20,1	30,1	21,4	14,8	13,0
$\epsilon_1$ , %	0,44	0,44	0,36	0,34	0,48	0,35	0,44	0,37	0,39	0,37
$\epsilon_2$ , %	0,60	0,97	0,45	0,56	0,62	0,58	0,70	0,89	0,53	0,61
$\epsilon_p$ , %	1,60	2,40	1,28	1,68	1,32	1,32	1,40	1,48	1,16	1,20
$EI$ , мН·см <sup>2</sup>	23,1	29,7	34,0	24,9	56,4	30,5	24,6	26,4	41,4	21,6
$G_0$ , МПа	661	585	624	584	558	408	605	366	327	334
<b>Прочностные:</b>										
$P$ , Н	35,6	39,2	33,4	33,7	39,3	31,0	37,0	33,9	24,0	21,0
$L$ , м	4460	4960	4340	4330	5090	3850	4760	4490	3180	2750
$A_p$ , мДж	39,2	60,2	29,5	37,0	32,4	27,1	33,0	30,4	16,9	15,7
$P_{zc}$ , м/с	1,90	1,54	1,60	1,60	1,88	2,02	1,92	1,92	1,52	1,50
$P_{zc}$ , м/с	2,00	2,12	1,80	1,80	2,00	2,14	2,30	1,16	2,00	2,40
$N$ , ч.д.п.	8	32	4	8	5	7	4	6	2	3

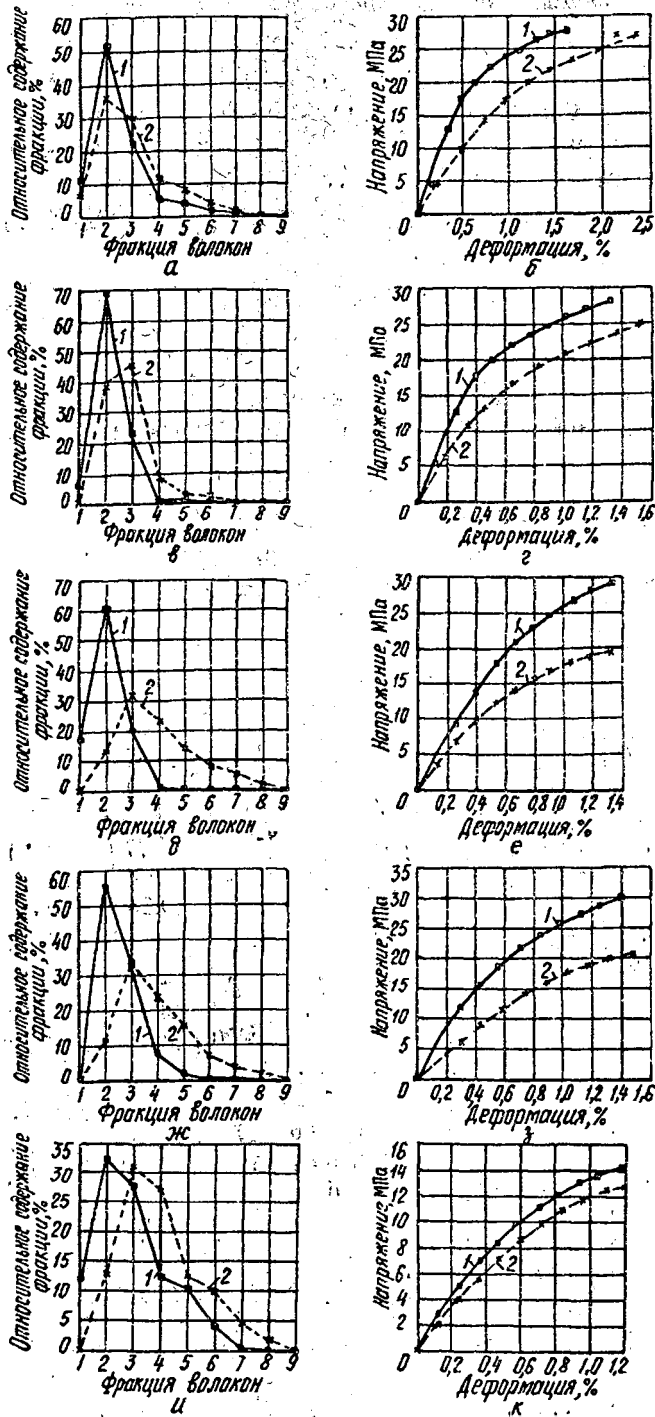


Рис. 1. Фракционный состав (а, в, д, ж, и) и зависимость  $\sigma - \epsilon$  (б, г, е, з, к) для хвойной (а, б) и лиственной (в, г) целлюлозы, хвойной (д, е) и лиственной (ж, з) ХТММ и ТММ (и, к) (фракция волокон: 1 -  $< 0,6$  мм; 2 -  $0,6 \dots 1,2$ ; 3 -  $1,2 \dots 1,8$ ; 4 -  $1,8 \dots 2,4$ ; 5 -  $2,4 \dots 3,0$ ; 6 -  $3,0 \dots 3,6$ ; 7 -  $3,6 \dots 4,2$ ; 8 -  $4,2 \dots 4,8$ ; 9 -  $> 4,8$  мм)

Рассматривая фундаментальные свойства, необходимо отметить следующие закономерности: образцы, которые характеризуются более пологим ходом кривых (кривые 2), т. е. менее жесткие, отличались более прочным волокном с большей средней длиной и меньшим относительным содержанием фракций с длиной волокна до 1,8 мм; при значительно меньшей величине начального модуля упругости (а также жесткости при изгибе и модуля сдвига) эти образцы имели большую деформацию разрушения; почти во всех случаях у образцов с более пологой кривой зависимости  $\sigma - \varepsilon$  пухлость была выше.

Таблица 5  
Фундаментальные, прочностные и деформационные характеристики образцов с равной средней длиной волокна

Характеристики	Хвойная целлюлоза		Лиственная целлюлоза		Хвойная ХТММ		Лиственная ХТММ		ТММ	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Фундаментальные:</b>										
$F_{св}$ , МПа	1,07	1,05	0,91	0,79	1,11	0,94	1,33	1,13	0,90	0,67
$SV$ , МПа	2,69	3,03	2,30	1,94	3,52	3,07	3,75	3,66	3,00	2,37
$F_z$ , Дж/м <sup>2</sup>	187	154	128	107	149	130	100	124	124	85
$L_0$ , м	3440	3170	2360	1930	2080	2160	2290	1600	1820	1550
$V$ , см <sup>3</sup> /г	1,61	1,85	1,62	1,59	2,03	2,09	1,81	2,08	2,14	2,28
$l_{ср}$ , мм	1,97	1,95	1,06	1,05	1,89	1,89	1,50	1,54	1,12	1,14
$d_{ср}$ , мкм	34,2	35,1	29,3	34,5	44,9	46,4	44,1	47,0	41,8	43,3
$l_k$ , мм	0,43	0,42	0,29	0,33	0,25	0,34	0,24	0,19	0,24	0,29
<b>Деформационные:</b>										
$E_1$ , МПа	4710	3340	5350	3630	3060	2530	3150	2640	1870	1640
$E_2$ , МПа	1950	1540	2630	1960	1620	1500	1980	1390	1120	1090
$E_3$ , МПа	560	540	960	700	450	710	760	350	400	420
$\sigma_1$ , МПа	17,5	13,1	15,6	12,5	8,3	10,7	11,2	7,0	7,7	7,3
$\sigma_2$ , МПа	21,7	16,1	18,7	15,8	13,6	16,1	14,4	11,3	10,1	10,3
$\sigma_p$ , МПа	35,2	25,9	28,6	23,5	22,1	22,9	23,3	16,5	13,9	13,6
$\varepsilon_1$ , %	0,38	0,40	0,30	0,36	0,28	0,43	0,36	0,28	0,42	0,45
$\varepsilon_2$ , %	0,56	0,56	0,39	0,50	0,59	0,70	0,63	0,55	0,61	0,68
$\varepsilon_p$ , %	2,00	1,76	1,28	1,36	1,36	1,44	1,16	1,20	1,16	1,20
$EI$ , мН·см <sup>2</sup>	40,4	24,1	37,4	29,8	42,4	44,2	24,6	41,1	38,7	28,6
$G_0$ , МПа	647	591	642	667	434	420	486	391	344	317
<b>Прочностные:</b>										
$P$ , Н	46,1	34,7	36,1	29,8	35,0	35,2	34,5	27,1	22,5	23,3
$L$ , м	6090	4600	4940	3630	4610	4460	3950	3650	2790	2990
$\sigma_p$ , МПа	35,2	25,9	28,6	23,5	22,1	22,9	23,3	16,5	13,9	13,6
$A_p$ , мДж	64,1	42,2	32,7	28,3	31,8	33,6	23,7	21,3	16,3	16,9
$P_{zc}$ , м/с	1,62	1,70	1,70	1,60	1,90	1,72	1,90	2,06	1,40	1,48
$P_{zc}$ , м/с	1,94	1,82	2,00	1,80	2,20	2,00	1,98	2,38	1,60	2,34
$N$ , ч.д.п.	148	63	7	3	11	12	6	4	2	2

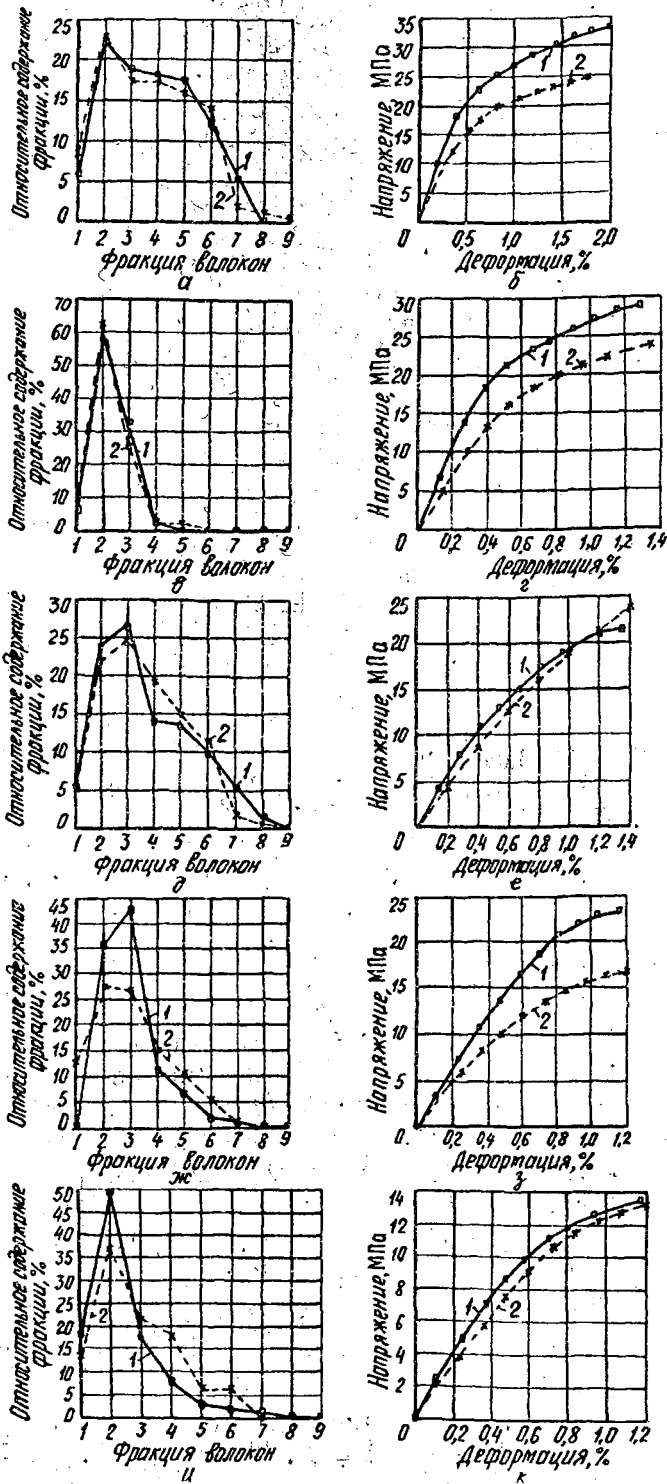


Рис.2. Фракционный состав и зависимость  $\sigma - \epsilon$  при равенстве средней длины волокна (обозначения рисунков и номера фракций приведены на рис.1)

Таблица 6

Фундаментальные и прочностные характеристики образцов с минимальными и максимальными значениями начального модуля упругости

Характеристики	Хвойная целлюлоза	Лиственная целлюлоза	Хвойная ХТММ	Лиственная ХТММ	ТММ					
	Значения характеристик при $E_1$ , МПа									
	5000	2330	5460	3170	3890	1920	3620	2010	2460	1250
Фундаментальные:										
$F_{св}$ , МПа	1,25	1,12	0,89	0,90	1,23	1,06	1,29	0,96	1,09	0,79
$S_V$ , МПа	3,10	2,88	2,23	2,30	3,38	3,39	3,73	3,06	3,87	2,87
$F_z$ , Дж / м <sup>2</sup>	201	152	124	111	150	136	138	117	102	103
$L_0$ , м	2990	3010	2450	2080	2140	2490	1910	2620	1830	2000
$V$ , см <sup>3</sup> /г	1,59	1,65	1,61	1,63	1,76	2,05	1,85	2,05	2,28	2,33
$l_{ср}$ , мм	1,91	2,18	1,36	0,90	1,49	2,25	1,25	2,28	1,20	1,71
$d_{ср}$ , мкм	40,9	28,4	31,8	29,8	46,7	34,4	33,6	41,4	46,3	43,1
$k_k$ , мм	0,29	0,36	0,31	0,30	0,29	0,26	0,19	0,36	0,22	0,29
Прочностные:										
$P$ , Н	46,4	39,0	42,7	29,5	41,0	27,4	39,3	31,0	26,0	21,0
$L$ , м	5900	4990	5610	3910	5250	3800	5020	4210	3320	2750
$\sigma_p$ , МПа	35,0	28,0	34,0	23,8	31,1	17,1	28,5	18,7	16,6	12,3
$A_p$ , мДж	63,7	54,6	47,4	23,9	35,6	25,5	33,1	28,1	19,2	19,0
$P_{зв}$ , м / с	2,04	1,76	1,82	1,48	1,62	1,48	1,56	1,52	1,58	1,60
$P_{зс}$ , м / с	2,20	1,90	2,00	1,90	2,20	1,50	2,20	2,00	2,40	2,16
$N$ , ч. д. п.	100	27	27	4	9	8	6	8	2	5

При изучении прочности исследуемых образцов установлено, что менее жесткие образцы хвойной целлюлозы обладали большей прочностью, у образцов лиственной целлюлозы различий в прочности практически не наблюдалось ( кроме показателя работы разрушения ). Образцы механических масс с большей жесткостью имели и большую прочность.

В табл. 5 и на рис. 2 представлены результаты испытаний образцов, имеющих у данного вида полуфабриката равную среднюю длину волокна. У образцов целлюлозы фракционный состав был практически идентичен. Менее жесткие образцы механической массы, как и в предыдущем случае, имели более низкое относительное содержание фракций с длиной волокна до 1,8 мм.

Менее жесткие образцы полуфабрикатов в этом случае отличались меньшими прочностью волокна и межволоконными силами связи, но большей пухлостью.

При невысоких значениях модулей упругости и сдвига более вялые в процессе испытаний на растяжение образцы, как правило, обнаруживали и меньшую жесткость при изгибе, но более высокие значения таких характеристик, как предел упругой деформации и деформации разрушения.

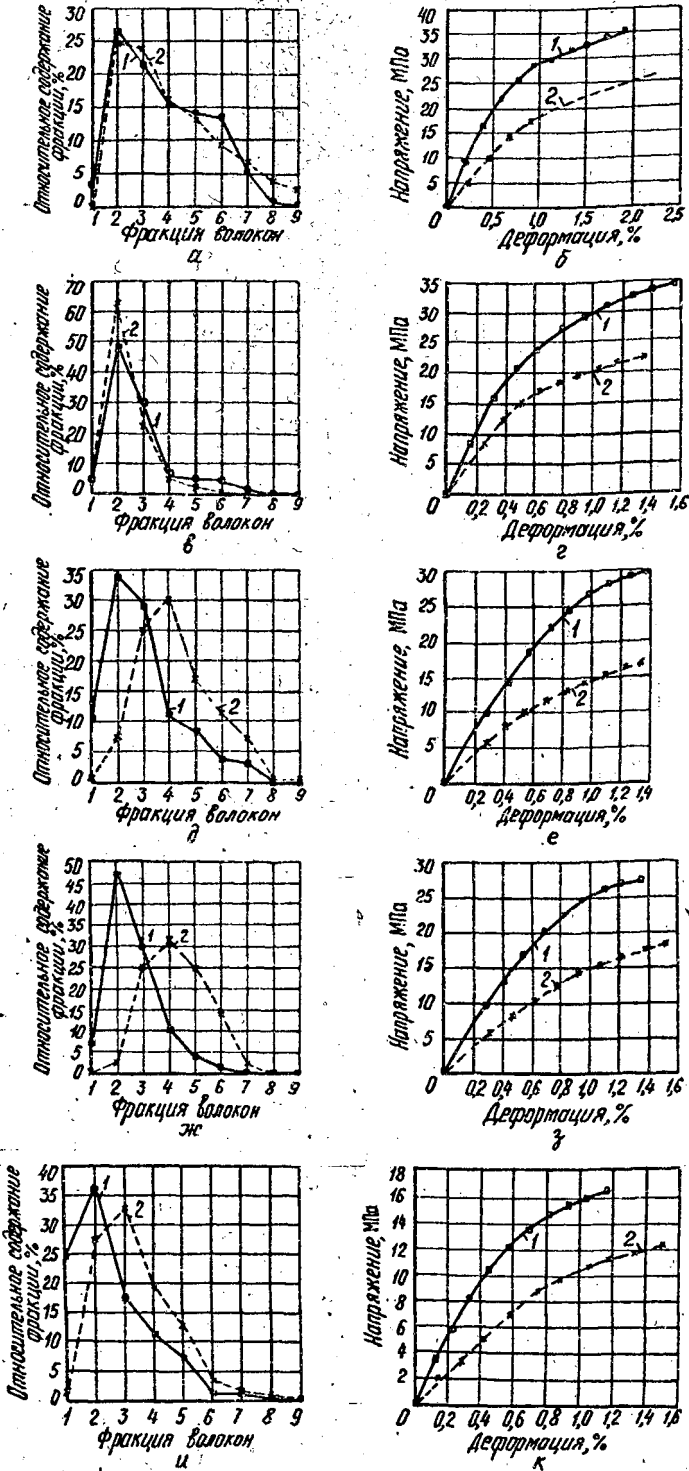


Рис. 3. Фракционный состав и зависимость  $\sigma - \epsilon$  образцов с максимальной (1) и минимальной (2) величиной начального модуля упругости (см. рис.1).

Прочностные характеристики образцов с одинаковой средней длиной волокна, в отличие от образцов с одинаковыми силами связи, ниже у тех, которые имели более пологую кривую зависимости  $\sigma - \varepsilon$ .

В табл. 6 и на рис. 3 представлены результаты испытаний образцов, обнаруживших максимальный и минимальный начальный модуль упругости. Образцы с максимальной величиной начального модуля обладали более высокими межволоконными силами связи, средней шириной волокна, но более низкими средней длиной и прочностью волокон. Образцы с большей жесткостью (кривые 1) имели более высокую относительную долю коротковолокнистых фракций. У каждого образца большему значению начального модуля упругости соответствовали более высокие характеристики прочности. В табл. 7 представлены результаты испытаний образцов с максимальными и минимальными значениями разрывной длины. В этом случае четкой закономерности влияния фундаментальных свойств волокна на деформативность не наблюдается.

Таблица 7

Фундаментальные и деформационные характеристики образцов с минимальными и максимальными значениями разрывной длины

Характеристики	Хвойная целлюлоза		Лиственная целлюлоза		Хвойная ХТММ		Лиственная ХТММ		ТММ	
	Значения характеристик при $L, \text{ м}$									
	6090	4330	5610	3610	5250	3800	5020	3650	3440	2550
Фундаментальные:										
$F_{св}, \text{ МПа}$	1,07	1,11	0,89	0,90	1,23	1,06	1,29	1,13	0,99	0,79
$SU, \text{ МПа}$	2,69	3,06	2,23	2,17	3,38	3,39	3,73	3,66	3,47	2,87
$F_2, \text{ Дж/м}^2$	187	139	124	124	150	136	138	141	114	103
$L_0, \text{ м}$	3440	3630	2450	2450	2140	2490	1910	1600	2090	2000
$V, \text{ см}^3/\text{г}$	1,61	1,77	1,61	1,54	1,76	2,05	1,85	2,08	2,25	2,33
$l_{ср}, \text{ мм}$	1,97	1,86	1,36	0,96	1,49	2,25	1,25	1,54	2,22	1,71
$d_{ср}, \text{ мкм}$	34,2	32,4	31,8	33,9	46,7	34,4	33,6	47,0	43,4	43,1
Деформационные:										
$E_1, \text{ МПа}$	4710	3640	5460	3480	3890	1920	3620	2640	2420	1250
$E_2, \text{ МПа}$	1950	1710	3000	1890	2310	1310	2120	1390	1350	830
$E_2, \text{ МПа}$	560	520	740	820	690	650	620	350	620	400
$\sigma_1, \text{ МПа}$	17,5	13,2	15,5	13,8	11,2	8,4	11,3	7,0	7,3	4,6
$\sigma_2, \text{ МПа}$	21,7	17,8	21,3	17,4	20,1	11,4	18,5	11,3	9,4	8,7
$\sigma_p, \text{ МПа}$	35,2	28,0	34,0	24,3	31,1	17,1	28,5	16,5	14,1	12,3
$\varepsilon_1, \%$	0,38	0,37	0,30	0,40	0,30	0,45	0,32	0,28	0,32	0,38
$\varepsilon_2, \%$	0,56	0,59	0,49	0,57	0,64	0,66	0,64	0,55	0,47	0,77
$\varepsilon_p, \%$	2,00	1,84	1,56	1,52	1,40	1,36	1,36	1,20	1,16	1,48
$EI, \text{ мН} \cdot \text{ см}^2$	40,4	21,2	44,5	21,0	34,3	23,0	32,7	41,1	30,7	25,0
$G_0, \text{ МПа}$	647	544	684	694	516	382	482	391	317	281



### Выводы

1. Из исследованных полуфабрикатов, которые используют для производства книжно-журнальной бумаги для офсетной печати, более высокие характеристики деформативности имеет лиственная беленая целлюлоза; затем в порядке убывания идут хвойная беленая целлюлоза, ХТММ (как хвойная, так и лиственная обнаруживают примерно равную деформативность) и ТММ.

2. Больше прочностью обладает хвойная беленая целлюлоза. Лиственная беленая целлюлоза и ХТММ обнаруживают примерно равные по величине характеристики прочности. Наименее прочной оказалась ТММ.

3. Статистический анализ показал, что фундаментальные, деформационные и прочностные характеристики всех исследованных полуфабрикатов имеют высокие коэффициенты вариации (особенно фракционный состав по длине волокна), т. е. стабильность качества в течение квартала была низкой. Причем у механических масс по сравнению с целлюлозой в большей степени подвержены колебаниям характеристики фундаментальных и деформационных свойств, а характеристики прочности более стабильны.

4. При переходе от парной к множественной корреляции теснота корреляции фундаментальных свойств с характеристиками деформативности и прочности повышается:

5. Теснота корреляции характеристик деформативности и прочности у образцов заводского производства оказалась невысокой. Причем для разных видов полуфабрикатов наблюдаются свои закономерности.

6. Величины коэффициентов корреляции характеристик прочности и деформативности подтверждают сведения о том, что в случае использования для расчетов выборки образцов материала, отобранных в производственных условиях, тесной корреляции между исследуемыми характеристиками, как правило, не наблюдается, отсутствует закономерность в тесноте корреляции при переходе от одного вида материала к другому.

7. Более жесткие при испытаниях на растяжение образцы (т. е. имеющие большую величину начального модуля упругости и меньшую величину деформации разрушения) имеют большее относительное содержание в структуре фракций с длиной волокна до 1,8 мм.

8. Очевидно, можно предположить, что величина критической длины волокна обуславливает ход кривой зависимости на втором участке деформирования материала, т. е. в области замедленной упругости. С ее увеличением эффективный модуль упругости снижается.

9. При различном состоянии структуры образца полуфабриката ( в нашем случае равенство межволоконных сил связи или средней длины волокна) фундаментальные (по Кларку) свойства волокна неоднозначно влияют на величину характеристик деформативности и прочности. Этим, очевидно, и объясняются затруднения, возникающие при прогнозировании качества целлюлозно-бумажных материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Кларк Дж. Технология целлюлозы. - М.: Лесн. пром-сть, 1983. — 456 с. [2]. Комаров В.И. Анализ зависимости напряжение-деформация при испытаниях на растяжение целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн. - 1993. - № 2-3. - С. 123 - 131. - (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Комаров В. И., Казаков Я.В. Связь фундаментальных свойств ( по Кларку) неразмотой сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // Лесн.журн. - 1993. - № 2-3. - С. 112 - 116. [4]. Комаров В.И. Критическая длина волокна - фактор деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов // Лесн.журн. - 1993. - № 4. - С. 79 —83. - (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Митропольский А.К. Элементы математической статистики. Введение в статистическое исчисление. - Л.: ЛТА, 1969. - 274 с. [6]. Муслах эль-Дордур Самир. Динамика бумажной ленты в печатных машинах: Автореф. дис ... канд.техн.наук. - М., 1987. —20 с. [7]. Остреров М.А. Бумага для офсетной печати : практика использования // Целлюлоза, бумага, картон. - 1994. - № 1 -2.- С. 20 - 21. [8]. Остреров М.А. и др. Факторы, определяющие качество прохождения бумаги через печатную машину // Целлюлоза, бумага и картон. - 1993. - № 1. —С. 26 - 29. [9]. Пуллкайнен С. Качество как движущая сила развития российских бумажных предприятий // Целлюлоза, бумага, картон. - 1994. — № 3 - 4.- С. 23.- 25. [10]. Силенко П.М. Динамика бумажного листа в транспортных системах полиграфических машин : Дис ... докт. техн. наук. —М., 1993. - 155 с. [11]. Фляте Д.М. Свойства бумаги. - М.: Лесн. пром-сть, 1986.- 680 с.

Поступила 19 мая 1995 г.