



ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.017.27

Я.В. Казаков, С.В. Зеленова, В.И. Комаров

Казаков Яков Владимирович родился в 1966 г., окончил в 1990 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета, член международного научного общества EUROMECH. Имеет более 60 научных трудов в области деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.



Зеленова Светлана Владимировна родилась в 1981 г., окончила в 2003 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства АГТУ. Имеет 16 печатных работ в области исследования структуры и деформационных свойств целлюлозно-бумажных материалов.



Комаров Валерий Иванович родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, почетный работник лесной промышленности, член международного научного общества EUROMECH. Имеет более 400 научных работ в области исследования свойств деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.



ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЕСТКОСТИ КАРТОНОВ-ЛАЙНЕРОВ

Предложены математические модели и создано программное обеспечение для прогнозирования характеристик жесткости картона по результатам анализа на просвет.

Ключевые слова: картон, структура, микро- и макроструктура, неоднородность просвета, жесткость, корреляция.

В соответствии с современным представлением бумага и картон являются капиллярно-пористыми коллоидными вязкоупругими материалами, структуру которых образуют стохастически распределенные в плоскости листа и по его толщине волокна, связанные межволоконными связями различной природы [1].

При исследовании и оценке структуры бумаги различают два подхода: микро- и макроструктурный. Микроструктура бумаги определяется осо-

бенностями строения элементов композиции бумаги и характером связей ее исходных компонентов – волокон и вспомогательных веществ [2].

Неоднородность физических свойств, в том числе колебание плотности в различных участках бумаги, непосредственно связаны с характером распределения волокон и их ассоциаций в бумажном листе, т.е. определяется макроструктурой. При изучении макроструктуры бумаги используют косвенные методы, основанные на оценке вариации физических свойств бумаги или средних значений некоторых характеристик ее объема и поверхности. Наибольшее распространение получили оптические методы, среди них – определение неравномерности просвета, или облачности [5], поскольку неоднородность оптической плотности бумаги, как и многих других ее характеристик, непосредственно связана с неоднородностью строения листа. Неравномерность просвета является связующим звеном между технологией и потребительскими свойствами.

Современные анализаторы просвета позволяют дать количественную оценку макроструктуры бумаги и картона, а следовательно, качества формования. В наших исследованиях был использован анализатор «АНФОР 02-2», который обеспечивает объективность оценки качества просвета бумажного полотна, характеризуя его численными величинами [6]. В анализаторе с помощью осветителя создается ярко освещенный участок бумажного образца размером 150 × 150 мм, изображение которого в проходящем свете фиксируется цифровой видеокамерой и анализируется с помощью программного обеспечения. Основой для анализа является яркость луча, прошедшего через лист бумаги и сохраненного ПЗС-матрицей в массиве точек. Колебания яркости обрабатываемых точек характеризуют неоднородность структуры материала.

Характеристики, определяемые на «АНФОР 02-2», могут быть разделены на три группы: характеристики распределения яркости точек образца относительно среднего значения (показатели оптической неоднородности бумаги); геометрические характеристики неоднородностей; характеристики, оценивающие неравномерность распределения массы в образце.

К первой группе характеристик относятся: светопропускание T , неоднородность просвета σ ; контрастность K ; индекс формования H .

Светопропускание характеризует непрозрачность материала. Его рассчитывают как отношение среднего значения яркости прошедшего через образец света I_i к яркости падающего на образец света I_0 :

$$T = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i}{I_0} 100\%, \quad (1)$$

где n – количество обрабатываемых точек.

Как правило, при увеличении массы 1 м² бумаги значение светопропускания уменьшается.

Неоднородность просвета σ определяют как среднееквадратическое отклонение яркости всех точек образца I_i от среднего значения яркости I_{cp} :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_i - I_{\text{cp}})^2}, \quad (2)$$

$$\text{где } I_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i. \quad (3)$$

Образцам бумаги с худшим качеством просвета соответствуют более высокие значения неоднородности просвета. Для образца с идеальным просветом, т.е. в случае, когда яркости всех точек образца одинаковы, значение неоднородности просвета равно нулю. Для реальных видов бумаги значение данного параметра находится, как правило, в пределах от 2 до 10, для картона – существенно выше.

Контрастность K определяют как отношение неоднородности просвета к среднему значению яркости:

$$K = C_1 \frac{\sigma}{I_{\text{cp}}}, \quad (4)$$

где C_1 – постоянный коэффициент.

Наглядной иллюстрацией качества просвета бумаги является гистограмма распределения яркости (рис. 1), на которой по оси абсцисс отложены значения яркости, а по оси ординат – относительное число точек, имеющих данную яркость. Более высокая и узкая гистограмма соответствует лучшему просвету и характеризует индекс формования H , определяемый как отношение высоты гистограммы h к ее ширине d (количество градаций яркости, присутствующих в данном образце):

$$H = C_2 \frac{h}{d}. \quad (5)$$

Здесь C_2 – постоянный коэффициент.

Расчет геометрических параметров иллюстрирует рис. 2, где показано распределение светового потока Φ , прошедшего через образец вдоль выбранной линии. Линии сканирования выбирают в продольном и поперечном направлениях. Средние размеры неоднородностей в продольном $l_{\text{прод}}$ и поперечных $l_{\text{попер}}$ направлениях определяют по одной и той же формуле, различие состоит в направлении сканирования:

$$l_{\text{прод}}, l_{\text{попер}} = \frac{2L}{N}, \quad (6)$$

где L – длина линии сканирования;

N – количество пересечений графика светового потока с его средним значением.

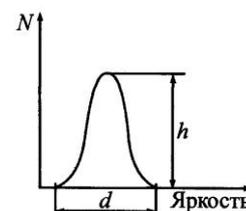
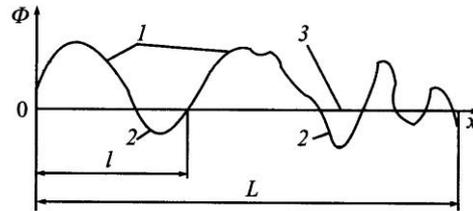


Рис. 1. Принцип определения индекса яркости

Рис. 2. Принцип расчета параметров неоднородностей в бумаге: Φ – световой поток; x – пространственная координата; L – длина линии сканирования; l – размер неоднородности; l – промоины; 2 – флоккулы; 3 – средний световой поток



Средний размер неоднородностей выражают как среднее арифметическое:

$$d_{\text{ср}} = \frac{l_{\text{прод}} + l_{\text{попер}}}{2}. \quad (7)$$

Анизотропию определяют как соотношение средних длин неоднородностей в продольном и поперечном направлениях:

$$A = \frac{l_{\text{прод}}}{l_{\text{попер}}}. \quad (8)$$

Методика расчета параметров, характеризующих неравномерность распределения массы в образце, пояснена на рис. 3. Бумага (картон) представляется как плоский лист толщиной s , на обеих поверхностях которого расположены холмы (флоккулы) и ямы (промоины). Рассчитывают (в относительных единицах) суммарный объем всех флоккул – избыток массы в образце $M_{\text{изб}}$ и всех промоин – недостаток массы в образце $M_{\text{нед}}$. Их сумму называют неравномерностью распределения масс W . Чем выше значение данных параметров, тем хуже качество просвета. Соотношение распределения масс

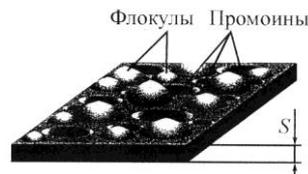


Рис. 3. Принцип расчета параметров, характеризующих неравномерность распределения массы в образце

$$Q = \frac{M_{\text{изб}}}{M_{\text{нед}}}. \quad (9)$$

Нами были проведены исследования качества формирования 6 видов картона для плоских слоев гофрированного картона (масса 1 м^2 – 125, 140 и 150 г): топ-лайнер с белым покровным слоем (KTL), картон универсальный (KU), крафт-лайнер марок K0 (K0) и KVS (KVS). В зависимости от вида картона выборка составляла от 27 до 156 образцов.

На анализаторе просвета «АНФОР 02-2» получены оптические характеристики различных видов картонов-лайнеров, статистическая характеристика которых представлена в табл. 1. Средние значения величин оптических характеристик исследованных картонов-лайнеров иллюстрирует рис. 4.

Разные производители, композиция, качество и масса 1 м^2 исследованных видов картона дают возможность оценить влияние этих факторов на оптические и жесткостные свойства материалов.

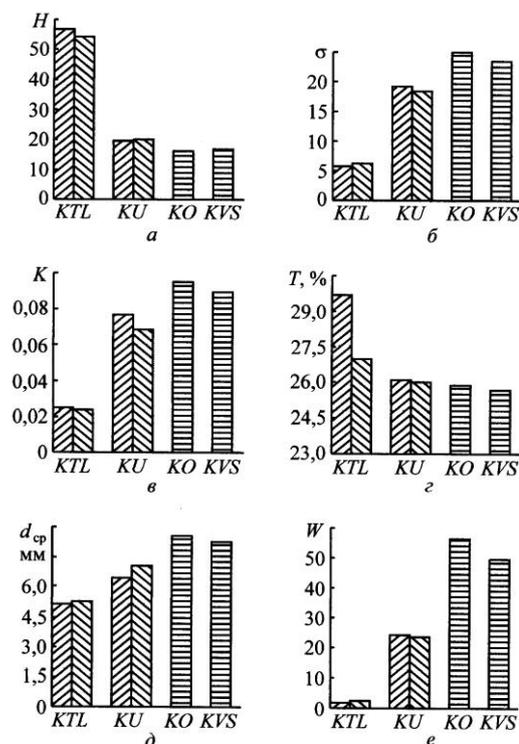
Таблица 1

Средние величины оптических характеристик образцов картона-лайнера

Картон	Масса 1 м ² , г	Характеристика	H	σ	K	T, %	<i>l</i> _{прод.}	<i>l</i> _{попер.}	A	<i>d</i> _{ср.} , мм	<i>M</i> _{пзб}	<i>M</i> _{нед}	W	Q
							мм							
KTL	125	<i>X</i> _{ср}	56,89	5,76	0,025	29,7	11,45	10,83	1,01	5,16	0,91	0,92	1,78	0,99
		<i>X</i> _{min}	42,30	4,90	0,021	28,0	10,40	9,80	0,85	4,60	0,41	0,52	0,96	0,37
		<i>X</i> _{max}	65,90	7,60	0,030	33,0	15,60	14,90	1,13	6,80	3,05	2,00	5,05	1,72
		σ _x	3,93	0,44	0,002	1,39	0,79	0,87	0,07	0,35	0,41	0,29	0,58	0,30
	140	<i>X</i> _{ср}	54,40	6,09	0,024	27,0	11,71	10,99	1,00	5,28	0,98	1,17	2,15	0,90
		<i>X</i> _{min}	44,20	5,00	0,021	26,0	10,40	10,00	0,80	4,70	0,48	0,60	1,08	0,42
		<i>X</i> _{max}	63,10	7,70	0,029	29,0	14,60	12,10	1,12	6,00	1,44	2,45	3,64	1,70
		σ _x	4,33	0,57	0,002	0,83	0,84	0,60	0,08	0,31	0,28	0,48	0,64	0,30
KU	125	<i>X</i> _{ср}	19,59	19,10	0,077	26,1	12,71	12,67	0,97	6,46	8,53	16,01	24,37	0,58
		<i>X</i> _{min}	14,70	13,00	0,006	25,0	10,70	10,10	0,72	5,00	3,18	1,03	7,74	0,23
		<i>X</i> _{max}	26,80	32,70	0,680	28,0	17,60	20,10	1,11	8,70	40,29	71,91	112,20	1,01
		σ _x	2,71	3,17	0,050	0,34	1,22	1,58	0,07	0,70	4,16	9,94	13,34	0,14
	140	<i>X</i> _{ср}	19,83	18,40	0,068	26,0	14,29	14,57	0,95	7,10	8,53	15,62	23,56	0,62
		<i>X</i> _{min}	15,70	15,00	0,008	25,0	11,50	11,00	0,67	5,80	2,35	6,00	1,56	0,32
		<i>X</i> _{max}	24,60	22,20	0,086	27,0	22,90	24,90	1,12	8,40	14,36	30,81	42,51	1,01
		σ _x	2,19	1,94	0,013	0,35	1,94	2,57	0,10	0,69	2,66	6,25	8,14	0,17
K0	150	<i>X</i> _{ср}	16,16	25,04	0,095	25,9	16,18	17,22	0,92	8,57	16,61	40,75	56,32	0,44
		<i>X</i> _{min}	13,00	17,90	0,024	24,0	13,00	13,00	0,54	0,20	6,95	12,07	19,02	0,14
		<i>X</i> _{max}	20,60	33,20	0,122	27,0	29,10	36,00	1,17	11,40	55,38	115,80	111,46	1,03

KVS	150	σ_x	1,73	3,08	0,013	0,56	2,43	3,92	0,13	1,16	5,88	17,16	19,19	0,13
		X_{cp}	16,81	23,54	0,090	25,7	16,22	16,22	0,90	8,26	13,44	35,79	49,57	0,40
		X_{min}	14,00	18,20	0,070	23,0	11,80	12,90	0,56	6,70	7,04	13,55	20,74	0,23
		X_{max}	19,80	30,90	0,118	27,0	29,60	31,30	1,07	9,80	21,37	68,40	86,72	0,59
		σ_x	1,78	3,31	0,012	0,82	3,70	3,76	0,13	0,83	4,38	12,88	16,28	0,10

Рис. 4. Средние значения оптических характеристик картонов-лайнеров: *a* – индекс формования, *б* – неоднородность просвета, *в* – контрастность, *г* – светопропускание, *д* – средний размер неоднородностей, *е* – неравномерность распределения масс; □ – масса 1 м² 125 г, □ – 140 г, □ – 150 г



Наилучшие показатели просвета выявлены у картона с белым покровным слоем. Этот картон, в композиции основного слоя которого использованы небеленая хвойная и лиственная целлюлоза нормального выхода и беленая целлюлоза с наполнителем в покровном слое, имеет небольшую толщину и высокую плотность. Низкая неоднородность просвета этого картона подтверждает хорошие печатные свойства наружного слоя.

Наиболее дешевый материал – картон универсальный, в композиции которого используют сульфатную целлюлозу высокого выхода и нейтрально-сульфитную лиственную полуцеллюлозу (до 40 ... 60 %), имеет наихудшие показатели качества формования.

Из гостированных видов картона качество формования картона KVS выше, чем картона KO, что подтверждают полученные величины характеристик просвета. Следовательно, производители картона KVS, повышая механические характеристики картона, одновременно добиваются и улучшения качества формования.

Для всех видов картона отмечен факт увеличения неоднородности просвета при повышении массы 1 м², что связано с ухудшением условий формования на сетке картоноделательной машины (КДМ). Однако изменение характеристик качества просвета при изменении массы 1 м² меньше, чем при переходе к другому виду картона.

Таким образом, по степени влияния на характеристики просвета факторы можно расположить в ряд: вид картона (композиция по волокну),

Таблица 2

Механические характеристики образцов картона-лайнера

Картон	Масса 1 м ² , г	S_b , Н·м	S_t , кН/м	RCT , Н	Число образцов
<i>KTL</i>	125	0,89	678	180	49
<i>KU</i>	125	1,30	621	193	156
<i>KTL</i>	140	1,22	735	223	30
<i>KU</i>	140	1,92	696	245	33
<i>K0</i>	150	1,87	703	254	123
<i>KVS</i>	150	1,88	697	257	27

марка картона, масса 1 м². При этом внутри каждого вида картона имеет место определенный разброс характеристик, оценивающих качество формования. Возникает вопрос, насколько изменение качества формования картона приводит к изменению механических характеристик образцов одной и той же марки картона.

Потребительские свойства гофрированного картона и ящиков зависят от совокупности свойств исходных материалов и, главным образом, от их жесткости при растяжении, сжатии и изгибе.

Для выявления степени влияния неоднородности структуры на характеристики жесткости картонов-лайнеров одной марки у образцов с измеренными характеристиками просвета определены жесткость при изгибе S_b (Н·м), растяжение S_t (кН/м) и сжатие RCT (Н), а также средние значения характеристик, представленные в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показал, что вид картона и масса 1 м² избирательно влияют на характеристики жесткости при растяжении, сжатии и изгибе. Так, картон топ-лайнер, обладая самой высокой жесткостью при растяжении и достаточной жесткостью при сжатии, имеет наименьшую жесткость при изгибе (при одинаковой массе 1 м²). Наибольшей жесткостью при изгибе обладает картон универсальный, а наибольшей жесткостью при сжатии – картон марок К0 и КВС.

Количественная оценка взаимосвязи качества просвета с механическими характеристиками картонов-лайнеров проведена с применением корреляционного и регрессионного анализов [3]. Коэффициенты парной корреляции представлены в табл. 3.

В отличие от данных, полученных для писче-печатной бумаги [4], парный корреляционный анализ характеристик каждого вида картона показал низкую тесноту связи, т.е. вариации величин жесткости картона при изменении структурных характеристик картона данной марки меньше, чем при изменении композиции или массы 1 м².

Для проведения множественного корреляционного анализа [3] из всего списка характеристик неоднородности структуры картона были выбраны четыре: неравномерность распределения масс $W - X_1$; неоднородность просвета $\sigma - X_2$; показатель светопропускания $T - X_3$, включенный в список для учета влияния массы 1 м² картона;

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции структурных и механических характеристик образцов картона-лайнера

Картон	Масса 1 м ² , г	У	H	σ	K	T	l _{прод}	l _{попер}	A	d _{ср}	M _{изб}	M _{нед}	W	Q
KTL	125	S _b , Н·м	-0,297	0,250	0,109	-0,118	0,118	0,278	-0,205	0,108	0,289	-0,119	0,152	0,469
		S _t , кН/м	-0,118	0,058	-0,234	-0,367	0,111	0,128	-0,383	0,069	0,269	-0,183	0,013	0,318
		RCT, Н	0,052	-0,076	-0,412	-0,362	0,025	-0,037	0,020	-0,107	0,089	-0,295	-0,132	0,309
	140	S _b , Н·м	-0,574	0,543	0,410	-0,620	0,230	0,199	-0,058	0,331	0,561	0,310	0,482	0,024
		S _t , кН/м	0,197	-0,175	-0,282	-0,263	-0,001	-0,425	-0,019	-0,332	-0,182	-0,041	-0,109	-0,195
		RCT, Н	-0,079	0,129	0,003	-0,260	-0,028	-0,042	0,310	-0,095	0,307	0,074	0,193	0,001
KU	125	S _b , Н·м	-0,087	0,110	0,003	-0,052	-0,007	-0,014	0,001	0,042	0,040	0,076	0,071	-0,064
		S _t , кН/м	0,248	-0,198	-0,093	-0,128	-0,016	-0,118	-0,019	-0,132	-0,212	-0,200	-0,205	0,047
		RCT, Н	-0,185	0,171	0,052	0,116	0,111	0,167	0,080	0,185	0,127	0,169	0,154	0,012
	140	S _b , Н·м	-0,222	0,172	-0,008	-0,175	0,018	0,248	-0,095	0,141	-0,055	0,082	0,119	-0,171
		S _t , кН/м	0,210	-0,206	-0,212	-0,026	-0,016	0,129	-0,088	-0,113	-0,330	-0,068	-0,149	-0,070
		RCT, Н	0,167	-0,125	-0,308	0,060	0,124	0,282	-0,295	-0,021	-0,156	-0,080	0,008	0,049
K0	150	S _b , Н·м	0,308	-0,430	-0,426	-0,165	-0,046	0,284	-0,304	-0,028	-0,224	-0,331	-0,325	0,310
		S _t , кН/м	0,221	-0,320	-0,221	-0,112	-0,182	0,150	-0,117	-0,080	-0,182	-0,256	-0,285	0,221
		RCT, Н	0,142	-0,224	-0,159	0,104	-0,200	0,016	-0,030	-0,073	-0,127	-0,136	-0,198	0,077
KVS	150	S _b , Н·м	0,265	-0,461	-0,449	-0,156	-0,069	0,010	-0,135	-0,311	-0,448	-0,313	-0,367	-0,088
		S _t , кН/м	0,262	-0,321	-0,329	-0,195	0,030	-0,011	-0,014	-0,064	-0,182	-0,168	-0,186	0,035
		RCT, Н	0,204	-0,171	-0,147	0,175	0,114	-0,040	0,084	-0,027	-0,026	-0,081	-0,063	0,220

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

Таблица 4

Множественные коэффициенты корреляции ($W - X_1$; $\sigma - X_2$; $T - X_3$; $d_{cp} - X_4$)

Картон	Масса 1 м ² , г	Y	$r_{Y,12}$	$r_{Y,13}$	$r_{Y,14}$	$r_{Y,23}$	$r_{Y,24}$	$r_{Y,34}$	$r_{Y,123}$	$r_{Y,124}$	$r_{Y,234}$	$r_{Y,134}$	$r_{Y,1234}$	
KTL	125	S_b , Н·м	0,26	0,18	0,15	0,25	0,27	0,15	0,26	0,27	0,27	0,18	0,27	
		S_t , кН/м	0,08	0,37	0,10	0,38	0,07	0,37	0,38	0,11	0,40	0,40	0,38	0,40
		RCT, Н	0,14	0,42	0,13	0,44	0,11	0,40	0,44	0,14	0,44	0,44	0,42	0,44
	140	S_b , Н·м	0,54	0,67	0,48	0,70	0,56	0,64	0,70	0,56	0,71	0,71	0,67	0,71
		S_t , кН/м	0,19	0,35	0,39	0,40	0,35	0,50	0,40	0,39	0,50	0,50	0,51	0,52
		RCT, Н	0,21	0,28	0,40	0,26	0,32	0,32	0,29	0,40	0,39	0,39	0,45	0,45
KU	125	S_b , Н·м	0,13	0,09	0,08	0,12	0,14	0,07	0,13	0,14	0,15	0,10	0,15	
		S_t , кН/м	0,21	0,23	0,21	0,23	0,20	0,18	0,24	0,22	0,24	0,24	0,24	0,24
		RCT, Н	0,29	0,24	0,26	0,29	0,38	0,11	0,30	0,38	0,39	0,39	0,29	0,39
	140	S_b , Н·м	0,19	0,20	0,14	0,23	0,17	0,22	0,25	0,20	0,23	0,22	0,22	0,26
		S_t , кН/м	0,22	0,16	0,15	0,21	0,21	0,12	0,23	0,22	0,22	0,22	0,16	0,23
		RCT, Н	0,30	0,06	0,04	0,13	0,16	0,06	0,30	0,30	0,17	0,08	0,08	0,31
K0	150	S_b , Н·м	0,43	0,35	0,36	0,45	0,46	0,17	0,45	0,46	0,48	0,39	0,48	
		S_t , кН/м	0,32	0,30	0,29	0,33	0,32	0,13	0,34	0,33	0,34	0,31	0,34	
		RCT, Н	0,23	0,23	0,20	0,25	0,22	0,13	0,26	0,23	0,25	0,23	0,23	0,26

KVS	150	S_b , Н·м	0,22	0,23	0,22	0,20	0,17	0,17	0,25	0,24	0,22	0,24	0,26
		S_t , кН/м	0,28	0,23	0,26	0,23	0,26	0,14	0,29	0,31	0,26	0,27	0,32
		RCT , Н	0,20	0,08	0,12	0,17	0,21	0,11	0,20	0,23	0,21	0,13	0,23

Таблица 5

Коэффициенты уравнения регрессии b_i и оценки точности аппроксимации (r , δ) уравнением вида $Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_4x_4$

Картон	Масса 1 м ² , г	Y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	r	δ
KTL	125	S_b , Н·м	0,733	-0,0047	0,047	0,0004	-0,021	0,27	4,31
		S_t , кН/м	974	-3,81	-16,08	-10,05	19,88	0,40	3,25
		RCT , Н	401	-2,37	-9,88	-5,90	3,14	0,44	7,65
	140	S_b , Н·м	2,24	-0,0028	0,067	-0,045	-0,043	0,71	3,24
		S_t , кН/м	1210	8,68	-6,03	-9,89	-35,97	0,52	1,92
		RCT , Н	569	17,96	1,81	-6,41	-42,22	0,45	8,52
KU	125	S_b , Н·м	1,85	-0,0008	0,013	-0,023	-0,025	0,15	6,91
		S_t , кН/м	963	-0,41	-1,88	-12,80	5,87	0,24	5,02
		RCT , Н	46,51	0,0034	-3,59	5,50	11,07	0,39	7,07
	140	S_b , Н·м	3,44	-0,005	0,026	-0,079	0,024	0,26	6,71
		S_t , кН/м	982	0,781	-8,68	-6,54	3,62	0,23	4,63
		RCT , Н	233	1,30	-6,07	3,42	0,54	0,31	5,31
K0	150	S_b , Н·м	3,94	-0,0002	-0,034	-0,058	0,035	0,48	8,37
		S_t , кН/м	968	-0,257	-3,58	-7,29	3,29	0,34	4,67

KVS	150	<i>RCT</i> , H	157	-0,087	-1,45	5,14	0,57	0,26	7,42
		<i>S_b</i> , H·м	5,50	-0,00001	-0,028	-0,112	0,0053	0,60	9,39
		<i>S_i</i> , кН/м	609	-0,603	-1,71	9,40	-11,27	0,32	5,67
		<i>RCT</i> , H	207	-0,131	0,70	1,85	-3,76	0,23	6,17

средний размер неоднородностей $d_{\text{ср}} - X_4$. Рассчитаны множественные коэффициенты корреляции, отражающие совокупное влияние двух $r_{Y,12}$, трех $r_{Y,123}$ и четырех $r_{Y,1234}$ факторов. Множественные коэффициенты корреляции имеют несколько более высокие значения, чем парные (табл. 4). Величина множественных коэффициентов корреляции возрастает при увеличении числа учитываемых факторов. Следовательно, множественный корреляционный анализ дает более объективную оценку корреляционной связи, поскольку при варьировании технологических факторов различные оптические характеристики изменяются одновременно, хотя и в различной степени.

Для прогнозирования жесткости картона по его оптическим характеристикам в результате множественного регрессионного анализа получены линейные уравнения (табл. 5). В качестве входных параметров использованы те же характеристики просвета, что и во множественном корреляционном анализе. Для большинства видов картона уравнения регрессии имеют погрешность от 2 до 9 % и, следовательно, обладают высокой прогнозирующей способностью характеристик жесткости при растяжении, сжатии и изгибе.

Выводы

1. Получены экспериментальные данные о неоднородности структуры картонов-лайнеров и корреляции величин структурных и физико-механических характеристик.

2. Анализ характеристик неоднородности структуры для нескольких видов картонов-лайнеров показал, что по степени влияния на характеристики просвета факторы можно расположить в следующий ряд: вид картона (композиция по волокну), марка картона, масса 1 м^2 . При этом внутри каждого вида картона имеет место определенный разброс характеристик, оценивающих качество формования.

3. Получены уравнения регрессии и создано программное обеспечение, позволяющие по результатам неразрушающего контроля на анализаторе просвета «АНФОР 02-2» иметь прогнозные оценки для характеристик жесткости при растяжении, сжатии и изгибе различных видов картона-лайнера с погрешностью, не превышающей 2 ... 9 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вайсман, Л.М.* Структура бумаги и методы ее контроля [Текст] / Л.М. Вайсман. – М.: Лесн. пром-сть, 1973. – 152 с.
2. *Галактионов, Б.В.* Объективная оценка просвета бумаги [Текст] / Б.В. Галактионов, Е.И. Иванова, Ю.П. Сырников [и др.] // Изв. СПб ЛТА. – СПб, 1993. – С. 117–131.
3. *Денисенко, В.П.* Корреляционный анализ в целлюлозно-бумажном производстве / В.П. Денисенко, М.И. Тергицкий. – М.: Лесн. пром-сть, 1968. – 152 с.
4. *Казаков, Я.В.* Влияние оптической неоднородности структуры на деформационные и прочностные характеристики писче-печатной бумаги [Текст] / Я.В. Казаков, С.В. Зеленова, В.И. Комаров // Лесной и химический комплексы – пробле-

мы и решения: материалы Всерос. научно-практ. конф., посвященной 75-летию СибГТУ. Т. I. – Красноярск: СибГТУ, 2005. – С. 172–176.

5. ОСТ 13-299–87 Бумага. Неоднородность просвета. Номенклатура показателей [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1987.

6. Установка для определения качества просвета (формования) бумаги, картона и волокнистых полуфабрикатов «АНФОР 02-2» [Текст]: инструкция по эксплуатации. – СПб.: ООО НТЦ «Промприбор», 2003. – 22 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 1.04.06

Ya.V. Kazakov, S.V. Zelenova, V.I. Komarov

Influence of Structural Nonuniformity on Stiffness Characteristics of Linerboard

Mathematical models are proposed and software is developed for predicting stiffness characteristics of cardboard based on gap analysis results.