

УДК 676.017

Э.Л. Алимпиев¹, Я.В. Казаков², **В.И. Комаров²**

¹ОАО «Архангельский ЦБК»

²Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Алимпиев Эдуард Львович родился в 1967 г., окончил в 1993 г. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина). Инженер отдела АСУТП и ОДУ ОАО «Архангельский ЦБК». Имеет 4 опубликованных работы в области управления технологией целлюлозно-бумажных материалов.
E-mail: alimpiev.eduard@appm.ru



Казаков Яков Владимирович родился в 1966 г., окончил в 1990 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, член международного научного общества EUROMECH. Имеет более 160 научных трудов в области деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.
E-mail: j.kazakov@narfu.ru



РАСЧЕТ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО АСУТП ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА КРАФТ-ЛАЙНЕРА

Рассмотрена возможность оптимизации технологического процесса, управляемого АСУТП, на примере производства картона крафт-лайнер на ОАО «Архангельский ЦБК». Получены регрессионные модели, на основании которых количественно оценен вклад отдельных факторов в изменение прочностных характеристик картона. Показана возможность оптимизации технологического процесса получения крафт-лайнера.

Ключевые слова: крафт-лайнер, технологический процесс производства картона, прочностные характеристики, статистические методы, влияющие факторы, регрессионная модель.

Необходимость исследований в области технологии и управления качеством бумаги и картона диктуется растущими требованиями к качеству картонно-бумажной продукции. Проблемы применения результатов экспериментов, полученных в лабораторных условиях, связаны с жесткими регламентными ограничениями реального технологического процесса. Следовательно, для производственных условий необходимы методы, исключаящие вмешательство в процесс, которое могло бы привести к ухудшению потребительских свойств готовой продукции. Доступность и широкое применение современных АСУТП обеспечивает возможность сбора и накопления данных о

технологическом процессе за длительный период времени. Применение статистических расчетов к получаемому массиву данных позволяет выявлять и анализировать влияние различных факторов на интересующие характеристики выпускаемых материалов. [3].

В данной работе представлены результаты исследования технологического процесса производства крафт-лайнера на картоноделательной машине КДМ-1 ОАО «Архангельский ЦБК». Композиция картона содержит хвойную сульфатную целлюлозу высокого выхода (ЦВВ), вырабатываемую на установках «Камюр», и нейтрально-сульфитную листовенную полуцеллюлозу (НСПЦ), получаемую на установках «Пандия».

Основные потребительские свойства картона, как тарно-упаковочного материала определяются его прочностными характеристиками. Поэтому при выполнении исследований из списка регламентируемых ГОСТ Р 53207–2008 [4] характеристик нами выбраны: абсолютное сопротивление продавливанию P , кПа; разрушающее усилие сжатия кольца в поперечном направлении R_{CT} , Н. Функционирование на КДМ-1 АСУТП и системы управления качеством DaVinci сводит к минимуму колебания массы 1 м^2 и влажности картона. Однако это не гарантирует стабильности потребительских характеристик готовой продукции, определяемых лабораторными методами. Как следствие, в общем выпускаемом объеме присутствует доля несортовой продукции.

В качестве факторных признаков выбраны 20 характеристик, определяемых по данным анализов, выполняемых лабораторией размольно-подготовительного отделения цеха картона, и данные системы АСУТП: M – масса, г/м^2 ; %НСПЦ – процентное содержание нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы в массе основного слоя; $СП_{о.с}$ – степень помола массы основного слоя, °ШР; $c_{о.с}$ – концентрация массы в баке постоянного уровня основного слоя, %; $c_{н.я1}$ – концентрация массы в напорном ящике основного слоя, %; $pH_{н.я1}$ – pH массы в напорном ящике основного слоя; $t_{н.я1}$ – температура массы в напорном ящике основного слоя, °С; $FS_{о.с}$ – соотношение напуска массы основного слоя; $СП_{п.с}$ – степень помола массы покровного слоя, °ШР; $c_{н.я2}$ – концентрация массы в напорном ящике покровного слоя, %; $pH_{н.я2}$ – pH массы в напорном ящике покровного слоя; $FS_{п.с}$ – соотношение напуска покровного слоя; $R_{кл}$ – расход канифольного клея, л/мин; $c_{кл}$ – концентрация канифольного клея, г/л; $\rho_{гл}$ – плотность серноокислого глинозема, г/см^3 ; $pH_{гл}$ – pH глинозема; $R_{гл1}$ – расход глинозема основного слоя, $\text{м}^3/\text{ч}$; $R_{гл2}$ – расход глинозема покровного слоя, $\text{м}^3/\text{ч}$; $SN_{о.с}$ – суммарный напор в напорном ящике основного слоя, м; $SN_{п.с}$ – суммарный напор в напорном ящике покровного слоя, м; $СП_{НСПЦ}$ – степень помола НСПЦ.

Значения характеристик качества картона сгруппированы по массе 1 м^2 и усреднены по ширине тамбура, им сопоставлены значения факторных признаков. Объем выборок (количество проанализированных тамбуров) составил: для образцов картона массой 125 г/м^2 – 2888; 140 г/м^2 – 3649; 150 г/м^2 – 1971; 175 г/м^2 – 2992.

Для проверки допустимости применения методов статистического анализа к выборкам данных, полученных, в том числе, и по данным АСУТП, были выполнены расчеты описательной статистики. Полученные результаты [1] показали, что распределения для большинства из выбранных переменных приблизительно соответствуют нормальному закону, что означает применимость к выборкам методики статистического анализа [5, 6].

Сравнительная оценка нестабильности технологических параметров и прочностных характеристик крафт-лайнера в условиях работы АСУТП показала, что коэффициент вариации V_{σ} прочностных характеристик составляет 5...8 %. В то же время, V_{σ} для ряда факторных признаков значительно больше, чем для прочностных характеристик картона [1]. В ходе анализа данных установлено, что в условиях работы системы регулирования и поддержания целевых параметров в регламентных диапазонах на легких сортах картона доля несортной продукции составляет около 10 %, на тяжелых (с отклонением значений от минимальных регламентных границ в пределах 10...15 %) – порядка 5 %. Тем не менее, прогнозирующая способность наборов переменных, сформированных по наибольшему значению V_{σ} , оказалась неудовлетворительной, поскольку данные наборы не обеспечивают стабильности значений коэффициентов множественной корреляции для картона разной массы, имеют более низкий критерий значимости, а также среди них нет факторов, напрямую определяющих бумагообразующие свойства волокна.

Для выявления из общего списка факторов с наиболее существенным влиянием на первом этапе был использован парный корреляционный анализ. Наибольшие значения вычисленных коэффициентов парной корреляции r_{xy} для всех сочетаний x_i, y_j находятся в пределах 0,25...0,42. Это свидетельствует о слабости парных связей [5], что не позволяет однозначно установить какие-либо парные зависимости. Примеры корреляционных полей для характеристик с наибольшей теснотой связи представлены на рис. 1. Выполненная проверка на значимость полученных коэффициентов r_{xy} по критерию Стьюдента и их интервальная оценка на репрезентативность для генеральной совокупности [7] показали действительность и репрезентативность коэффициентов парной корреляции. Однако малые (на абсолютной величине) коэффициенты парной корреляции создают трудности при подборе параметров многофакторной модели.

Для выявления альтернативного способа получения сокращенного перечня факторов, имеющих наибольшее влияние на прочностные характеристики крафт-лайнера, нами предложен и апробирован метод экстремальных значений, заключающийся в сопоставлении экстремальных значений факторного признака и усредненных значений зависимой переменной. Вычислены усредненные значения переменных, удовлетворяющих следующим условиям:

$$x_i \leq \min_{10}(x_i); x_k \geq \max_{10}(x_i); y_{j_m} \leq \min_{10}(y_j); y_{j_n} \geq \max_{10}(y_j);$$

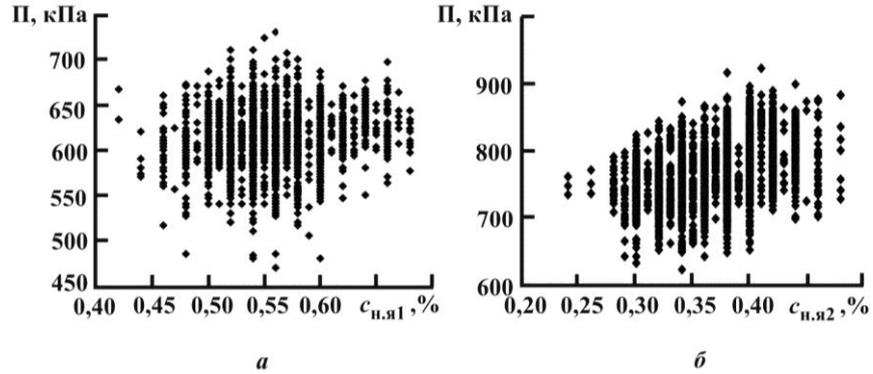


Рис. 1. Примеры корреляционных полей для абсолютного сопротивления продавливанию (Π) и концентрации массы в напорном ящике ($c_{н.я}$): *a* – основной слой (картон 125 г/м^2 ; $r_{xy} = 0,32$), *б* – покровный слой (175 г/м^2 ; $r_{xy} = 0,42$)

$$\overline{y_j(x_{i_k})}_{\max} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k y_j(x_{i_n}); \quad \overline{y_j(x_{i_l})}_{\min} = \frac{1}{l} \sum_{n=1}^l y_j(x_{i_n}), \quad (1)$$

где $\min_{10}(x_i)$; $\max_{10}(x_i)$; $\min_{10}(y_i)$; $\max_{10}(y_i)$ – десятое наименьшее и наибольшее для наборов значений каждой переменной (x_i) и (y_i).

Величина Δ_y , рассчитываемая по уравнению

$$\Delta_y = \frac{\overline{y_j(x_{i_k})}_{\max} - \overline{y_j(x_{i_l})}_{\min}}{\max_{10}(y_j) - \min_{10}(y_j)} = \frac{\frac{1}{k} \sum_{n=1}^k y_j(x_{i_n}) - \frac{1}{l} \sum_{n=1}^l y_j(x_{i_n})}{\max_{10}(y_j) - \min_{10}(y_j)}, \quad (2)$$

позволяет судить о степени зависимости результативного признака от факторного в диапазоне его изменения и устойчивости наблюдаемой связи в различных интервалах времени [2]. В отличие от парного корреляционного анализа этот метод не учитывает расположение средних значений, но чувствителен к изменениям в граничных областях диапазона.

В качестве критерия пригодности к дальнейшим исследованиям для наборов факторных переменных использованы коэффициенты множественной корреляции [2]. Действительность полученных коэффициентов подтверждена критерием Фишера–Снедекора [6].

Для проведения регрессионного анализа использованы перечни влияющих факторов, выбранные по коэффициентам парной корреляции $|r_{xy}| > 0,2$ и соответствию экстремальных значений прочностных характеристик экстремальным значениям влияющих факторов $|\Delta_y| > 0,15$.

Использованный нами метод многошагового регрессионного анализа дает возможность исключить наименее значимые факторы из исходного набора переменных, упрощая практическое использование и повышая прогнозирующую способность полученных моделей. При этом для оценки значимости

Коэффициенты уравнений регрессии a_i , изменение характеристик картона y_i , обусловленное изменением x_i для выбранных факторов

Масса $1 \text{ м}^2, \text{ г}$	Параметры уравнения	Характери- стика Y	Влияющие факторы							Суммарное ΔY	R^2	n
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7			
Выбранные по соответствию экстремальных значений												
	RCT		%НСПЦ	СП _{loc}	рН _{ка1}	рН _{ка2}	$R_{пл}$	$R_{пл2}$	SN_{loc}			
140	a_i	161	0,1	1,3	1,2	6,3	0,9	1,0	-3,0			
	Y_{min}	150	0,0	13,0	4,4	3,4	0,0	0,9	2,2			
	Y_{max}	290	41,7	20,0	8,0	5,6	4,5	5,8	5,0			0,11
	$Y_{max}-Y_{min}$	140	4,0	8,9	4,4	13,8	4,1	5,1	8,6		48,8	
	Π		M	СП _{loc}	$t_{пл}$	$c_{ка2}$	$R_{пл2}$	SN_{loc}	SN_{loc}			
175	a_i	201	1,3	5,8	2,7	425,4	-15,0	-0,2	*			
	Y_{min}	620	170,0	13,0	34,0	0,2	0,3	1,7	-			
	Y_{max}	923	180,0	20,0	57,0	0,5	5,1	4,6	-			0,28
	$Y_{max}-Y_{min}$	303	13,1	40,3	61,0	102,1	-71,6	-0,6	-		144,3	
Выбранные по условию $ r_{xy} > 0,2$												
	Π		$c_{ка1}$	$t_{ка1}$	$c_{ка2}$	SN_{loc}	СП _{плст}					
125	a_i	407	71,2	-	177,3	11,8	2,8	-	-			
	Y_{min}	470	0,4	-	0,2	2,9	13,0	-	-			
	Y_{max}	730	0,7	-	0,5	5,4	23,0	-	-			0,13
	$Y_{max}-Y_{min}$	260	18,5	-	46,1	28,7	27,6	-	-		120,9	
140	a_i	451	45,0	0,7	108,6	6,1	5,1	-	-			
	Y_{min}	500	0,5	33,0	0,2	2,5	12,0	-	-			
	Y_{max}	780	0,7	59,0	0,5	5,4	22,0	-	-			0,08
	$Y_{max}-Y_{min}$	280	12,6	18,2	26,1	17,5	51,3	-	-		125,6	
150	a_i	568	90,1	2,2	64,1	-22,2	2,2	-	-			
	Y_{min}	520	0,5	31,0	0,2	2,3	12,0	-	-			
	Y_{max}	820	0,8	57,0	0,5	5,4	19,0	-	-			0,09
	$Y_{max}-Y_{min}$	300	27,0	56,9	17,3	67,7	15,2	-	-		184,2	
175	a_i	623	-	3,6	493,4	-32,2	-5,5	-	-			
	Y_{min}	620	-	34,0	0,2	1,9	13,0	-	-			
	Y_{max}	923	-	57,0	0,5	5,3	20,0	-	-			0,25
	$Y_{max}-Y_{min}$	303	-	81,8	118,4	107,3	38,8	-	-		346,4	

Окончание табл.

Масса 1 м ³ , г	Параметры уравнения	Характери- стика \bar{Y}	Влияющие факторы							Суммарное ΔY	R^2	n
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7			
		RCT	Выбранные по условию $ r_{xy} > 0,2$									
			СП _{ос}	$c_{o,c}$	$c_{н,я1}$	$c_{н,я2}$	$SM_{п,c}$					
125	a_i	190	-	-	-19,2	19,0	-3,8	-	-	-		
	Y_{min}	135	-	-	0,4	0,2	2,9	-	-	-		
	Y_{max}	270	-	-	0,7	0,5	5,4	-	-	-	0,05	
	$Y_{max}-Y_{min}$	135	-	-	5,0	4,9	9,3	-	-	-	19,3	
140	a_i	184	1,4	1,9	4,3	17,9	-2,0	-	-	-		
	Y_{min}	150	13,0	2,1	0,5	0,2	2,5	-	-	-		
	Y_{max}	290	20,0	3,7	0,7	0,5	5,4	-	-	-	0,07	
	$Y_{max}-Y_{min}$	140	9,9	3,2	1,2	4,3	5,8	-	-	-	24,3	
150	a_i	127	3,4	4,9	-	70,9	1,7	-	-	-		
	Y_{min}	140	13,0	2,3	-	0,2	2,3	-	-	-		
	Y_{max}	320	21,0	3,8	-	0,5	5,4	-	-	-	0,11	
	$Y_{max}-Y_{min}$	180	7,0	7,3	-	19,1	5,1	-	-	-	58,5	
175	a_i	136	2,9	11,7	35,8	118,8	-	-	-	-		
	Y_{min}	220	13,0	2,8	0,4	0,2	-	-	-	-		
	Y_{max}	350	20,0	3,9	0,9	0,5	-	-	-	-	0,17	
	$Y_{max}-Y_{min}$	130	20,1	12,5	18,3	28,5	-	-	-	-	79,3	

* Коэффициент незначим по t-критерию.

каждого фактора используется t-критерий Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,95$. Исключению в этом случае подлежит регрессор со значением t-критерия меньше табличного при данном уровне значимости.

Приведем пример расчета регрессионной модели для прогнозирования абсолютного сопротивления продавливанию (П) крафт-лайнера массой 125 г/м^2 . Исходный набор факторов определен по результатам парного корреляционного анализа: $x_1 - c_{н.я1}$; $x_2 - t_{н.я1}$; $x_3 - c_{н.я2}$; $x_4 - SN_{п.с}$; $x_5 - СП_{НСПЦ}$.

Шаг 1. Расчет уравнения регрессии с учетом всех влияющих факторов:

$$Y = 420,52 + 74,65x_1 - 0,38x_2 + 178,34x_3 + 12,67x_4 + 2,71x_5.$$

Табличное значение критерия Стьюдента для выборки данного объема (1318 наблюдений) $t_{0,05; 1318} = 1,96$. Второй регрессор ($x_2 - t_{н.я1}$) – незначим, поскольку для него абсолютное значение t-критерия (1,51) меньше табличного.

Шаг 2. После исключения $x_2 (t_{н.я1})$ из набора факторов имеем

$$Y = 407,36 + 71,17x_1 + 177,34x_3 + 11,76x_4 + 2,76x_5.$$

Все коэффициенты полученного уравнения действительны, уравнение является окончательным.

Коэффициенты полученных адекватных регрессионных моделей для крафт-лайнера разной массы 1 м^2 представлены в таблице. В строчках $|Y_{\max} - Y_{\min}|$ приведен вклад каждого фактора в изменение исследуемой характеристики.

Для оценки целесообразности практического использования полученных моделей выполнены расчеты распределений вероятностных значений прочностных характеристик картона. Примеры гистограмм представлены на рис. 2.

Для наборов факторов, полученных по максимальным значениям коэффициентов парной корреляции, применение уравнений регрессии для абсолютного сопротивления продавливанию (П) крафт-лайнера может дать увеличение от 52 (125 г/м^2) до 165 кПа (175 г/м^2), для разрушающего усилия сжатия кольца в поперечном направлении (RСТ) – от 11 (125) до 40 Н (175 г/м^2). Это позволит существенно сократить долю несортовой продукции по прочностным характеристикам без дополнительных затрат на дорогостоящее оборудование и изменения в технологии производства.

Для управления технологией крафт-лайнера возможность манипулирования параметрами, кроме статистических характеристик, определяется ресурсоемкостью соответствующих этапов переработки. В уравнения для абсолютного сопротивления продавливанию входит $СП_{НСПЦ}$, для RСТ – $СП_{о.с}$, которые связаны с работой размольного оборудования. Изменение степени помола в большую сторону влечет дополнительные энергетические затраты. Такие переменные, как $c_{н.я1}$, $c_{н.я2}$, $t_{н.я1}$, $c_{о.с}$, $SN_{п.с}$, определяются соответствующими контурами регулирования, имеют согласованный вклад в результирующие характеристики, поэтому при использовании полученных

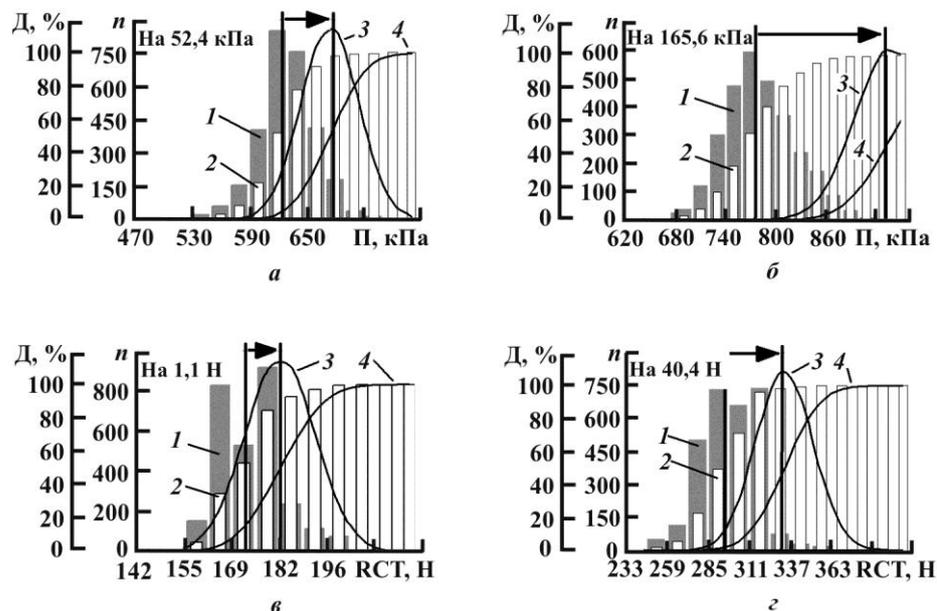


Рис. 2. Гистограммы оптимизированных распределений прочностных характеристик для наборов факторов, полученных по максимальным значениям коэффициентов парной корреляции: а, б – абсолютное сопротивление продавливанию (П); в, г – сопротивление сжатию кольца (RCT); а, в – 125 г/м^2 ; б, г – 175 г/м^2 ; 1 – число попаданий (n) в интервал; 2 – доля (Д), %; 3 – расчетная дифференциальная функция распределения; 4 – расчетная интегральная функция распределения, %

статистических зависимостей перечисленные переменные следует считать приоритетными факторами с учетом их абсолютного вклада в прочностные характеристики крафт-лайнера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимтеев Э.Л., Казаков Я.В. Возможность применения статистических методов для отбора технологических факторов процесса, управляемого АСУТП, критичных для прочностных характеристик крафт-лайнера // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. Архангельск: Изд-во САФУ, 2011. С. 219–224.
2. Алимтеев Э.Л., Комаров В.И., Казаков Я.В. Использование методики экстремальных значений для оценки влияния вариации технологических параметров процесса, управляемого АСУТП, на показатели качества крафт-лайнера // Современные тенденции в развитии производства бумаги, картона, гофрокартона из макулатурного сырья: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. Караваево, 2010. С. 32–41.
3. Алимтеев, Э.Л., Комаров В.И., Казаков Я.В. Использование статистического анализа для оптимизации параметров технологического процесса // Развитие научных основ современных способов комплексной химической и биохимической переработки

растительного сырья: Наука – северному региону: сб. науч. тр. Архангельск: Изд-во САФУ, 2010. Вып. 83 С. 76–84.

4. ГОСТ Р 53207–2008. Картон для плоских слоев гофрированного картона. Технические условия. Введ. 2010-01-01. М.: Изд-во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. 11 с.

5. Денисенко, В.П., Тертицкий Н.М. Корреляционный анализ в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1968. 152 с.

7. Применение статистических методов контроля и управления качеством технологических процессов, услуг и продукции / В.И. Комаров [и др.]: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2009. 179 с.

6. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.

Поступила 20.10.11

*E.L. Alimpiev*¹, *Ya.V. Kazakov*², *V.I. Komarov*²

¹JSC "Arkhangelsk Pulp and Paper Mill"

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Calculation of Regression Models for Optimization of APCS-Controlled Process in Kraft-Liner Production

The possibility of optimization of APCS-controlled process has been considered through the example of kraft-liner production at JSC "Arkhangelsk Pulp and Paper Mill". There have been obtained and presented some regression models, which served as the basis for calculating the quantitative estimate of contribution of certain factors to the changes in strength characteristics of cardboard. The possibility of optimization of APCS-controlled process of kraft-liner production is shown.

Key words: kraft-liner, process of cardboard production, strength characteristics, statistical methods, contributing factors, regression model.