УДК 676.164.8 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-133-138

Влияние колебаний массы бумажного полотна на качество товарной продукции

В.П. Сиваков[a], А.В. Вураско[b], А.Р. Минакова[c]

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт 37, Екатеринбург, Россия
[a]sivakov.vp@yandex.ru, [b]vurasko2010@yandex.ru, [c]galimova_ar@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-9387-1512, [b]https://orcid.org/0000-0002-9471-085X,
[c]https://orcid.org/0000-0003-0171-5801
Статья поступила 28.03.2018, принята 5.05.2018

В последнее время производители и потребители бумаги вкладывают в понятие «высокое качество» новый смысл, подразумевающий наличие такого важнейшего свойства, как постоянство (равномерность, однородность). Вследствие этого уделяется значительное внимание обеспечению технологических характеристик бумажной продукции. Напуск бумажной массы на сеточный стол сопровождается относительными колебаниями напорного ящика, сеточного стола, грудного вала, сетки и потока массы. При движении в обезвоживающей части сеточного стола на свободной поверхности бумажной массы формируются продольные и поперечные волны. Нижняя поверхность бумажной массы, располагающаяся на сетке, копирует ее поверхность. Обезвоживание бумажной массы на вакуумных ящиках, гауч-прессе, в прессовой части и последующих частях машины не устраняет волнистость поверхности бумажного полотна. Наличие образованных при формовании бумаги продольных и поперечных волн приводит к неравномерной массе квадратного метра бумаги, колебаниям ее прочностных и других технологических характеристик. Это отрицательно влияет на последующие операции по переработке бумаги в товарную продукцию. На многих предприятиях не придают должного внимания контролю отклонений квадратного метра изготавливаемого полотна бумаги от массы, установленной по технологическому регламенту, что снижает потребительские свойства бумажной продукции. В связи с этим исследования зависимости массы бумажного полотна от технологических и механических факторов процесса формования являются актуальными.

Цель данной работы формулируется как экспериментальная проверка статистическими методами отклонений массы квадратного метра бумажного полотна от технологического регламента и определение по спектральным и корреляционным функциям источников, вызывающих колебания массы бумажного полотна. В ходе работы исследованы статистические характеристики колебания массы бумажного полотна и установлены их среднее (4,99 г/дм^2), максимальное (5,09 г/дм^2) и минимальное (4,85 г/дм^2) допустимые значения. Показано, что наличие отклонений масс образцов бумаги от среднего арифметического ($\overline{m}$) «допустимо». Верхнее отклонение масс образцов бумаги от среднего арифметического ($\overline{m}$) превышает оценку «допустимо», что обеспечивает «запас» массы бумажного полотна, но приводит к излишнему расходу сырья, материалов, энергоносителей. Следует отрегулировать массу 1 м^2 бумажного полотна незначительным на (0,5…1) % понижением среднего арифметического значения ($\overline{m}$). Установлен вид связи масс образцов бумаги двух выборок из бумажного полотна, взятых через определенный промежуток времени. Случайный процесс колебания масс образцов исследуемого бумажного полотна соответствует условиям стационарности. Технология производства устойчива и обеспечивает заданные параметры массы квадратного метра бумаги. По методу спектральной плотности определена периодическая составляющая максимальных колебаний масс образцов бумаги в диапазоне 6,7…5,3 Гц. Влияние этой периодической составляющей на процесс колебаний масс образцов бумаги незначительно. Предположение о влиянии вибрации грудного вала на частоте 3,64 Гц относительно сеточного стола и напорного ящика на колебания массы квадратного метра бумаги исследованиями не подтвердилось.

Ключевые слова: качество; масса квадратного метра; бумажное полотно; корреляционная функция; спектральная плотность; колебания.

Influence of paper cloth mass fluctuations on the quality of commercial products

V.P. Sivakov[a], A.V. Vurasko[b], A.R. Minakova[c]

Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia
[a]sivakov.vp@yandex.ru, [b]vurasko2010@yandex.ru, [c]galimova_ar@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-9387-1512, [b]https://orcid.org/0000-0002-9471-085X,
[c]https://orcid.org/0000-0003-0171-5801
Received 28.03.2018, accepted 5.05.2018

Recently, paper producers and consumers have put a new meaning in the notion of "high quality", implying the constancy (uniformity, uniformity) of the most important properties. As a result, considerable attention is paid to the provision of technological characteristics of paper products. The discharge of the boom mass on the grid table is accompanied by relative oscillations of the pressure box, grid table, chest shaft, mesh and the mass flow. When moving in the dehydrating part of the grid table, longitudinal and transverse

waves are formed on the free surface of the paper mass. The lower surface of the paper mass, located on the grid, copies its surface. Dewatering of paper pulp on vacuum boxes, rubber press, in the press part and subsequent parts of the machine does not eliminate the waviness of the surface of the paper web. The presence of longitudinal and transverse waves, formed during paper forming, leads to uneven mass of a square meter of paper, fluctuations in strength and other technological characteristics of the paper. This has a negative impact on subsequent operations of paper processing into commercial products. At many enterprises they do not pay enough attention to the control of deviations of the square meter of the produced paper canvas from the mass established by the technological regulations, which reduces the consumer properties of paper products. In this regard, the study of the dependence of the mass of paper web from technological and mechanical factors forming process is important.

The aim of this work is an experimental verification of statistical method deviations of the square meter of the paper cloth from the technological solution and determination of the spectral and correlation functions of the sources causing fluctuations in the mass of the paper web. In the cause of the work the statistical characteristics of the variation of the mass of the canvas are investigated and their average (4.99 g/dm^2), maximum (5,09 g/dm^2) and minimal (4.85 g/dm^2) permissible values are established. It is shown that the presence of deviations of the masses of paper samples from the arithmetic mean ($\overline{m}$) is «acceptable». The upper deviation of the masses of paper samples from the arithmetic mean ($\overline{m}$) exceeds the estimate of «acceptable», which provides a «reserve» of the mass of the paper web, but leads to excessive consumption of raw materials, materials, energy carriers. It is necessary to adjust the weight of 1 m^2 of the paper web with minor lowering (0,5 to 1) percent decrease in average arithmetic value ($\overline{m}$). The type of connection of the masses of paper samples of two samples from a paper cloth taken after a certain period of time is established. The random process of oscillations of the masses of the studied paper web corresponds to the stationary conditions. The production technology is stable and provides the set parameters of mass per square meter of paper. The method of spectral density is used to determine the periodic component of the maximum mass oscillations of paper samples in the range of 6,7...5,3 Hz. The influence of this periodic component on the oscillation process of the masses of paper samples is insignificant. The assumption about the effect of the vibration of the chest shaft at a frequency of 3.64 Hz relative to the mesh table and the headbox on the fluctuations in the mass of a square meter of paper has not been confirmed by studies.

Keywords: quality; weight per square meter; paper web; correlation function; spectral density; fluctuations.

Введение

В последнее время производители и потребители бумаги вкладывают в понятие «высокое качество» новый смысл, подразумевающий наличие такого важнейшего свойства, как постоянство (равномерность, однородность) [1, 2]. Вследствие этого обеспечению технологических характеристик бумажной продукции уделяется значительное внимание [3–7]. Напуск бумажной массы на сеточный стол сопровождается колебаниями напорного ящика, сеточного стола, грудного вала, сетки и потока массы [8, 9]. При движении в обезвоживающей части сеточного стола на свободной поверхности бумажной массы формируются продольные и поперечные волны (рис. 1).

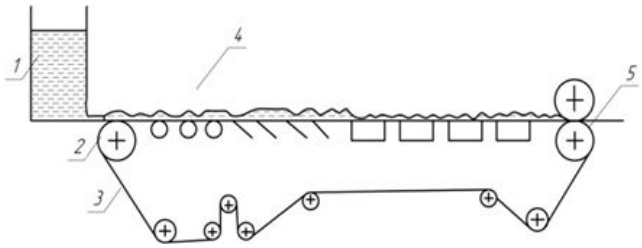

Рис. 1. Схема к обоснованию образования волнистости бумажного полотна: *1* — напорный ящик; *2* — грудной вал; *3* — сетка; *4* — бумажная масса; *5* — гауч-пресс

Нижняя поверхность бумажной массы, располагающаяся на сетке, волн не имеет и копирует поверхность сетки. Обезвоживание бумажной массы на вакуумных ящиках, гауч-прессе, в прессовой части и последующих частях машины незначительно изменяет волнистость поверхности бумажного полотна, но полностью ее не устраняет. Наличие образованных при формовании бумаги продольных и поперечных волн приводит к неравномерной массе квадратного метра бумаги, колебаниям разрывной длины, разрушающего усилия, абсолютного сопротивления раздиранию и других технологических характеристик. Кроме того, на разрывную длину более значительное влияние оказывает неравенство скоростей сетки и напуска бумажной массы из напорного ящика. Колебания массы квадратного метра полотна бумаги отрицательно влияют на последующие операции по ее переработке в товарную продукцию, например, при склеивании листов, нанесении красок, гофрировании. На многих предприятиях не придают должного внимания контролю отклонений квадратного метра изготавливаемого полотна бумаги от массы, установленной по технологическому регламенту, что снижает потребительские свойства бумажной продукции. В связи с этим исследования зависимости массы бумажного полотна от технологических и механических факторов процесса формования являются актуальными.

Постановка задачи. Целью данной работы является экспериментальная проверка статистическими методами отклонений массы квадратного метра бумажного полотна от технологического регламента и определение по спектральным и корреляционным функциям источников, вызывающих колебания массы бумажного полотна. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

– исследовать статистические характеристики колебания массы бумажного полотна и установить их среднее, максимальное и минимальное допустимые значения;

– установить вид связи масс образцов бумаги двух выборок из бумажного полотна, взятых через определенный промежуток времени;

– методами корреляционного и спектрального анализа установить влияние технологических и конструкционных факторов на колебания массы 1 м^2 бумажного полотна.

Решение задачи. Исследования колебаний массы квадратного метра полотна бумаги произведены на бумагоделательной машине, работающей со скоростью 480 м/мин.

Грудной вал сеточного стола машины установлен на шарнирных рычагах. Колебания грудного вала относительно напорного ящика и сеточного стола рассматриваем как одну из возможных причин колебаний массы квадратного метра бумаги. Определяем частоту вращения грудного вала по следующей формуле:

$$n_b = \frac{V}{60 \cdot \pi \cdot d_b} \cdot (1 - f_n) =$$

$$= \frac{480}{60 \cdot \pi \cdot 0{,}65} \cdot (1 - 0{,}07) = 3{,}64\ \text{с}^{-1} \qquad (1)$$

где V= 480 м/мин — скорость машины; d_b = 0,65 м – диаметр грудного вала; f_n= 0,07 – коэффициент проскальзывания грудного вала относительно сетки.

Принимаем для обследования две полосы бумаги ***x*** и ***y***, снятые с тамбурного вала с интервалом в два часа. Задаемся числом последовательных образцов полос бумажного полотна для статистической обработки, равным: ***x*** =76, ***y*** = 66.

Принимаем следующие размеры образцов бумажного полотна:

– в продольном направлении a = 0,25 м;

– в поперечном направлении b = 0,2 м.

Определяем длину исследуемых полос бумажного полотнаz,

$$L = z \cdot a = 76 \cdot 0{,}25 = 19\ \text{м}.$$

Определяем продолжительность наработки исследуемой полосы бумаги

$$t = \frac{L}{\pi \cdot d_b \cdot n_b} = \frac{19}{\pi \cdot 0{,}65 \cdot 3{,}64} = 2{,}56\ \text{с}.$$

Продолжительность изготовления образца определяем по формуле

$$t_o = \frac{l_o}{\pi \cdot d_b \cdot n_b} = \frac{0{,}25}{\pi \cdot 0{,}65 \cdot 3{,}64} = 0{,}034\ \text{с}.$$

Производим определение информативного частотного спектра колебаний массы квадратного метра бумаги. Для выделения периодических колебаний массы бумажного полотна с целью их устранения используем корреляционные и спектральные методы [10]. Случайный процесс колебания масс образцов бумажного полотна в продольном направлении представляет реализацию $m(t)$ (рис. 2).

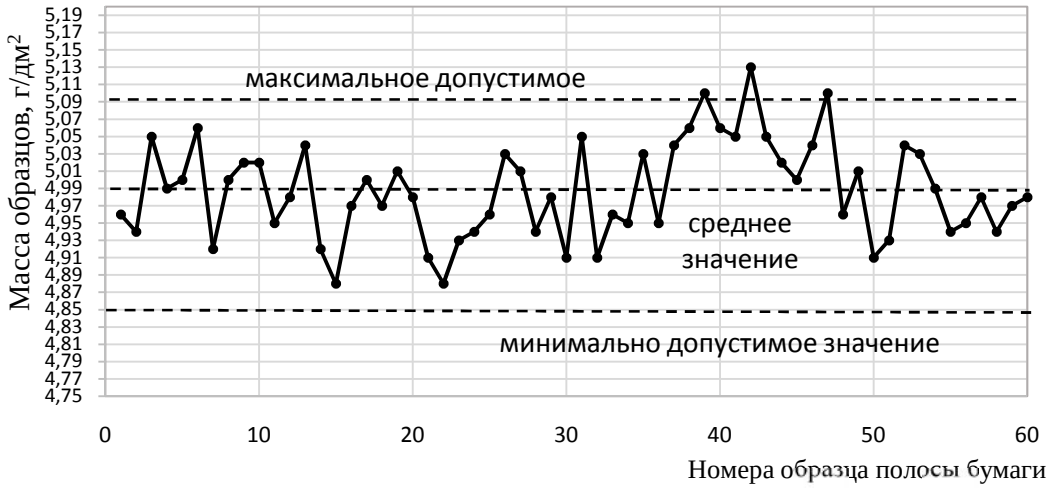

Рис. 2. График колебания масс образцов исследуемой полосы бумаги

Образцы бумажного полотна изготовлены из средней части продольной полосы бумаги. Полосы бумаги сняты с рулонов на тамбурном валу. Намотка бумаги на тамбурный вал производилась при установившемся режиме работы бумажной машины со скоростью 480 м/мин.

При изготовлении образцов выдержана их параллельность относительно продольной и поперечной осей бумаги. Образцы вырезаны и пронумерованы последовательно, без промежутков на исследуемой полосе бумаги.

Случайный процесс колебания масс образцов бумаги в продольном направлении проверяем на стационарность.

Определяем среднее арифметическое значение масс образцов бумаги по формуле:

$$\overline{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} m_i \ . \qquad (2)$$

Среднее квадратическое отклонение масс m_i от среднего арифметического значения выборки $\bar{m}$ определяем по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (m_i - \overline{m})^2} \qquad (3)$$

Для определения допустимых отклонений масс образцов бумаги применяем критерий Стьюдента. Табличное значение критерия Стьюдента t = 1,6 выбрано при числе степени свободы $f = n - 1 = 65$ и доверительной вероятности $P = 0{,}9$. Максимально допустимая масса образцов бумаги, г/дм^2

$$m_{min} = \overline{m} - t \cdot S = 4{,}97 - 1{,}64 \cdot 0{,}075 = 4{,}85\ \frac{\text{г}}{\text{дм}^2}$$

Среднее арифметическое $\bar{m}$ и допустимые массы образцов бумаги показаны на графике (рис. 2).

На этом графике можно выделить следующие частоты колебания масс образцов: 16,0; 10,7; 8,0; 6,4; 5,3; 4,6; 1,8 Гц. Наиболее часто повторяются колебания масс на частотах 16,0; 10,7; 8,0 Гц.

При статистической обработке построена гистограмма распределения масс 76-ти образцов одной из исследуемых полос бумаги. Установлено, что экспериментальная гистограмма удовлетворительно соответствует теоретическому графику нормального закона распределения (рис. 3).

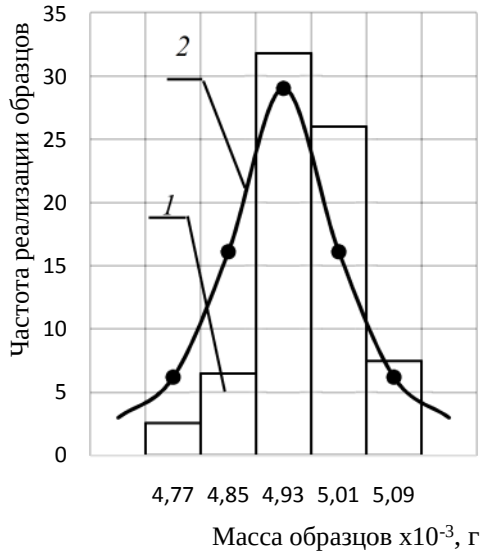

Рис. 3. Статистические характеристики колебаний масс образцов бумажного полотна: *1* – гистограмма экспериментального распределения масс; *2* – теоретический график нормального распределения масс

Линейность связи масс образцов двух выборок из исследуемых полос ***x***, ***y*** бумаги определяем по коэффициенту корреляции:

$$r = \frac{M_{xy}}{D_x \cdot D_y} \qquad (4)$$

где M_{xy} – среднее арифметическое произведение отклонений $(i - x)$ масс образцов от среднего арифметического значения выборок; D_x, D_y – дисперсии масс соответствующих выборок: $D_x = S_x^2; D_y = S_y^2$.

Среднее арифметическое произведений масс выборок ***x***, ***y*** определяем по формуле [16]:

$$M_{xy} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_{xi} - \overline{m}_x)\cdot(m_{yi} - \overline{m}_y)$$

Статистические характеристики масс образцов полос бумаги приведены в табл. 1.

Коэффициент корреляции 0,5 < r = 0,81 < 1, следовательно, между случайными выборками образцов ***x*** и ***y*** полос бумаги имеется линейная корреляционная связь.

Случайный процесс изменения масс образцов исследуемых полос бумаги можно рассматривать как стационарный. Для случайного стационарного процесса закон распределения один и тот же в каждый момент времени, т. е. плотность вероятности не зависит от времени.

В связи с проявлением стационарности случайного процесса колебаний масс образцов бумаги спектральную плотность определяем только для автокорреляционной функции исследуемой полосы бумаги ***y*** из 66-ти образцов.

Корреляционную функцию $\left(\frac{\text{г}}{\text{дм}^2}\right)^2$ процесса изготовления образцов бумаги для дискретных отсчетов времени определяем по формуле

$$R_{mm}(\tau) = \frac{1}{n-\tau}\sum_{i=1}^{n-\tau} m_n(t)\cdot m_n(t+\tau) \qquad (5)$$

где $m_n(t)$ – масса образца m_nкак функция времени, $\frac{\text{г}}{\text{дм}^2}$; $m_n(t+\tau)$ – масса образца сдвинутого по исследуемой полосе бумаги на τ; n – число образцов исследуемой полосы бумаги, n = 66; τ – корреляционный сдвиг на дискретное число отсчетов времени, принимаем τ = 6.

Для удобства последующих вычислений корреляционную функцию нормируем:

$$\rho_{mm} = \frac{R_{mm}(\tau)}{D}$$

где D – дисперсия m,

$$D = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_i - \overline{m})^2 \qquad (6)$$

Спектральную плотность определяем по формуле

$$S_t = \sum_{\mu=0}^{n}\left(1 - \frac{\mu}{n}\right)\cdot \rho_{mn}\cdot\cos(\omega\varphi) \qquad (7)$$

где μ = 0, …, n-1; n – число измерений.

График спектральной плотности приведен на рис. 4.

По графику спектральной плотности определен диапазон частот колебаний масс образцов исследуемой полосы бумаги в пределах 0,6…32,2 Гц. Связь между спектральной плотностью $S(t)$ и экспериментальной функцией наработки масс образцов $m(t)$ проявляется в том, что чем меньше частота представлена в $S(t)$, тем медленнее изменяется величина масс образцов $m(t)$, и наоборот. На графике $S(t)$ имеется максимальный пик в диапазоне частот 6,7…5,3 Гц, следовательно, случайная функция колебаний масс образцов бумаги содержит периодическую составляющую в этом диапазоне частот. Отметим, что интенсивность периодической составляющей, определенная по отношению площади графика $S(t)$ для диапазона 6,7…5,3 Гц к общей площади графика $S(t)$, равна 7,8 %. Влияние периодической составляющей на процесс колебаний масс образцов бумаги при интенсивности менее 10 % логично рассматривать как незначительное.

Таблица 1

Статистические характеристики масс образцов полос бумаги

Обозначение полос	Количество образцов	Среднеарифметическое значение, $\overline{m}(\frac{г}{дм^2})$	Среднее квадратичное отклонение, $\sigma_m(\frac{г}{дм^2})$	Дисперсия, $D\ (\frac{г}{дм^2})^2$	Среднее арифметическое произведений масс выборок, $M_{xy}\ (\frac{г}{дм^2})^2$	Коэффициент корреляции, r
x	76	4,98	0,032	$3{,}84 \cdot 10^{-3}$	$0{,}015 \cdot 10^{-3}$	0,81
y	66	4,97	0,07	$4{,}9 \cdot 10^{-3}$		

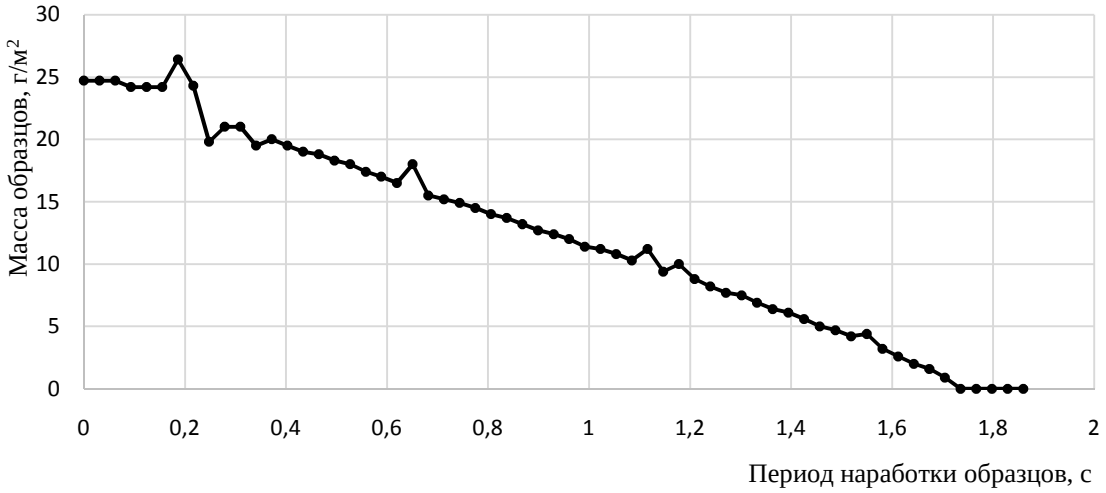

Рис. 4. Спектральная плотность стационарного случайного процесса колебаний масс образцов бумаги

Заключение

1. Наличие отклонений масс образцов бумаги от среднего арифметического ($\overline{m}$) «допустимо». Верхнее отклонение масс образцов бумаги от среднего арифметического ($\overline{m}$) превышает оценку «допустимо», что обеспечивает «запас» массы квадратного метра бумажного полотна, но приводит к излишнему расходу сырья, материалов, энергоносителей. Следует отрегулировать массу 1 м^2 бумажного полотна незначительным (на 0,5…1 %) понижением среднего арифметического значения ($\overline{m}$).

2. Случайный процесс колебания масс образцов исследуемого бумажного полотна соответствует условиям стационарности. Технология производства устойчива и обеспечивает заданные параметры массы квадратного метра бумаги.

3. По методу спектральной плотности определена периодическая составляющая максимальных колебаний масс образцов бумаги в диапазоне 6,7…5,3 Гц. Влияние этой периодической составляющей на процесс колебаний масс образцов бумаги незначительно.

4. Предположение о влиянии вибрации грудного вала на частоте 3,64 Гц относительно сеточного стола и напорного ящика на колебания массы квадратного метра бумаги исследованиями не подтвердилось.

Литература

1. Синчук А.В., Лавров И.В., Спиридонов В.А. Стабилизация важнейших свойств тарного картона из макулатуры – устойчивая тенденция на ближайшую перспективу // Материалы I междунар. науч.-технической конф. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов». Архангельск, 2011. С. 160-166.

2. Weig X., Kalden W.-A. Vom Karton zur Faltschachtel – Welche Potcnziaie verbergen sich an der Schnittstelle zwischen beidcn Produktionsstufen? // ipW. 2009. № 1-2. P. 26-29.

3. Erhard K., Miletzky F. Fasereigenschaften und 1 asereinsatzbcdingungcn / ipW. 2006. № 11-12. P. 57-63.

4. Pinnington T. The Corrugated Industry // England. Hampshire. SP11 8PRr. 2002. P. 350.

5. Mäkelä P., Fellers C. An Analytic Procedure for Determination of Fracture Toughness of Paper Materials // Nordic Pulp Paper Res. J. 2012. Vol. 27, is. 2. P. 352–361.

6. Muhonen P. Brittleness of Paper: MSc Thesis. Lappeenranta, Finland, 2013. 110 p.

7. Bernie J-P. Measuring formation of paper – PaperPerfect method. Lorentzen & Wettre. Kista Snabbtryck, Sweden, 2004. 25 p.

8. Сиваков В.П., Вихарев С.Н., Вураско А.В., Мешков А.Д. Исследование технологических характеристик полотна бумаги и вибрации оборудования для обеспечения качества продукции // Материалы II междунар. науч.-технической конф. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов». Архангельск, 2013. С.81-86.

9. Вураско А.В., Вихарев С.Н., Сиваков В.П., Мешков А.Д., Мухамедзянова Э.Р. Исследование технологических

характеристик полотна бумаги и вибрации оборудования для обеспечения качества продукции // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 23. С. 248-250.

10. Леонович А.А., Сиваков В.П., Вураско А.В. Основы научных исследований в химической и механической переработке растительного сырья. Екатеринбург: УГЛТУ. 2010. 137 с.

11. Грачев В.В., Щербаков С.Г., Яковлев Е.И.. Динамика трубопроводных систем. М., 1987. 436 с.

References

1. Sinchuk A.V., Lavrov I.V., Spiridonov V.A. The most important properties of stabilization container paperboard from recycled paper-a stable trend in the near future // Materialy I mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. «Problemy mekhaniki cellyulozno-bumazhnyh materialov». Arhangel'sk, 2011. P. 160-166.

2. Weig X., Kalden W.-A. Vom Karton zur Faltschachtel - Welche Potcnziaie verbergen sich an der Schnittstelle zwischen beidcn Produktionsstufen? // ipW. 2009. № 1-2. P. 26-29.

3. Erhard K., Miletzky F. Fasereigenschaften und 1 asereinsatzbcdingungcn / ipW. 2006. № 11-12. P. 57-63.

4. Pinnington T. The Corrugated Industry // England. Hampshire. SP11 8PRr. 2002. P. 350.

5. Mäkelä P., Fellers C. An Analytic Procedure for Determination of Fracture Toughness of Paper Materials // Nordic Pulp Paper Res. J. 2012. Vol. 27, is. 2. P. 352-361.

6. Muhonen P. Brittleness of Paper: MSc Thesis. Lappeenranta, Finland, 2013. 110 p.

7. Bernie J-P. Measuring formation of paper - PaperPerfect method. Lorentzen & Wettre. Kista Snabbtryck, Sweden, 2004. 25 p.

8. Sivakov V.P., Viharev S.N., Vurasko A.V., Meshkov A.D. Study on technological characteristics of cloths of paper and vibration equipment to ensure product quality// Materialy II mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. «Problemy mekhaniki cellyulozno-bumazhnyh materialov». Arhangel'sk, 2013. P. 81-86.

9. Vurasko A.V., Viharev S.N., Sivakov V.P., Meshkov A.D., Muhamedzyanova Eh.R.Study on technological characteristics of cloths of paper and vibration equipment to ensure product quality // Vestn. Kazan. tekhnol. un-ta. 2013. T. 16, № 23. P. 248-250.

10. Leonovich A.A., Sivakov V.P., Vurasko A.V. Fundamentals of scientific research in the chemical and mechanical processing of vegetable raw materials. Ekaterinburg: UGLTU. 2010. 137 p.

11. Grachev V.V., Shcherbakov S.G., Yakovlev E.I. Dynamics of pipeline systems. M., 1987. 436p.