

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.056.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-186-200

Снижение колебаний массы бумаги в бумагоделательной машине

В.П. Сиваков, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-6084-2021*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>

А.В. Вураско[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-5594-2021*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>

А.Л. Шерстобитов, *инж.*; *ResearcherID: AAC-3200-2022*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-2878>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; sivakovvp@m.usfeu.ru, vurasko2010@yandex.ru[✉], theonesunday@gmail.com

Поступила в редакцию 18.02.22 / Одобрена после рецензирования 13.05.22 / Принята к печати 16.05.22

Аннотация. Предмет исследования – санитарно-гигиеническая бумага. Объект – массоподводящая часть и круглосеточное формующее устройство напуска суспензии бумажной массы на сетку. Цель – выявление факторов, обуславливающих колебания массы санитарно-гигиенической бумаги, и уменьшение колебаний массы 1 м² бумаги, снижение неравномерности прочности в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги. Методология работы состоит в изучении пульсации бумажной массы, колебаний массы снятых с янки-цилиндра (без крепирования) образцов полотна бумаги, определении разрывного усилия полотна бумаги в продольном и поперечном направлениях для установления влияния пульсации бумажной массы на колебания массы и прочности полотна бумаги. Исследования выполнены при выработке санитарно-гигиенической бумаги массой 17...18 г/м² на установившейся рабочей скорости машины 5 м/с. В массонапускном устройстве преобладают пульсации бумажной массы в низкочастотном спектре 0,14...1,35 Гц. Изготовлены образцы бумаги прямоугольной формы 432×230 мм. Размер 432 мм принят в продольном направлении движения бумаги в машине и равен 0,125 длины наружной окружности круглосеточного цилиндра. Размер 230 мм – наиболее распространенная на предприятиях ширина полотна бумаги в товарной бобине. Образцы изготовлены из одного полотна бумаги последовательно без промежуточных вырезов. Установлено, что частоты колебаний массы образцов на 86 % совпадают с частотами пульсации бумажной массы и на 14 % зависят от других факторов. Преобладают колебания частоты 1,45 Гц. Амплитуда отклонения массы образцов бумаги на этой частоте от среднего арифметического значения достигает 0,026 г. Разрывное усилие образцов в машинном направлении в 5,6 раза больше, чем в поперечном. Это вызвано отсутствием регулирования частоты вращения перфорированного вала и засорением его отверстий. Значительное изменение скорости потока бумажной

© Сиваков В.П., Вураско А.В., Шерстобитов А.Л., 2023



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

массы на коротком цилиндрическом участке вакуумных камер в сочетании с низким качеством промывки сетки круглосеточного цилиндра приводят к синхронности низкочастотной пульсации бумажной массы и колебаний массы образцов бумаги и, соответственно, бумажного полотна. Колебания массы бумажного полотна обуславливают частые обрывы бумаги и снижение качества товарной продукции.

Ключевые слова: масса 1 м² бумаги, пульсация бумажной массы, колебания массы бумаги, масса образцов бумаги, разрывное усилие, круглосеточный цилиндр, вакуумная камера, перфорированный вал, бумагоделательная машина, санитарно-гигиеническая бумага

Для цитирования: Сиваков В.П., Вураско А.В., Шерстобитов А.Л. Снижение колебаний массы бумаги в бумагоделательной машине // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 186–200. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-186-200>

Original article

Reduction of Paper Pulp Fluctuations in Tissue Paper Making Machine

Valeriy P. Sivakov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-6084-2021](https://orcid.org/0000-0002-9387-1512),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>

Alesia V. Vurasko[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-5594-2021](https://orcid.org/0000-0002-9471-085X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>

Alexey L. Sherstobitov, Engineer; ResearcherID: [AAC-3200-2022](https://orcid.org/0000-0002-7428-2878),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-2878>

Ural State Forestry Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; sivakovvp@m.usfeu.ru, vurasko2010@yandex.ru[✉], theonesunday@gmail.com

Received on February 18, 2022 / Approved after reviewing on May 13, 2022 / Accepted on May 16, 2022

Abstract. The subject of the research is a paper for sanitary-hygienic purposes. The objects of the study are a pulper infeed system and a round grid perforated forming device. The purposes of the work are to identify sources and reduce fluctuations of 1 m² of pulp for sanitary-hygienic paper, which decrease the structural irregularities of the paper web in longitudinal and transverse directions. The methodology of the study is to investigate the flow pulsation of the pulp, the fluctuations of the pulp web at the Yankee cylinder (without crepe), to verify the tensile strength of the paper web in longitudinal and transverse directions for identification of a correlation between the pulsation, the vibration of the pulp and the strength of the paper web. The trials were made during the production of sanitary-hygienic paper with the mass 17–18 g/m² at a steady working speed of the machine 5 m/s. Pulsations of paper pulp in the low-frequency spectrum of 0.14–1.35 Hz prevail in the mass-intake device. The rectangular paper samples 432×230 mm² were created for examination of structural irregularities of the paper web. The length 432 mm was taken in the longitudinal direction of paper movement in the machine. It was equal to 0.125 mm in the circumference of the round grid screen cylinder. The width of the paper web in the commodity bobbin was 230 mm. The samples were made from a single sheet of paper sequentially without intermediate cuts at 5 m/s speed of the machine. It was determined that the frequencies of fluctuations of the masses of sanitary paper samples coincide by 86 % with the pulsation frequencies of the pulp and depend on



other factors by 14 %. The major frequency was 1.45 Hz. The amplitude of the deviation of the mass at this frequency from the arithmetic mean was 0.026 g. The tensile strength of the paper web in the machine direction was 5.6 times greater than in the transverse direction. It was caused by unregulated rotation frequency of the holey roll and clogging of its holes. The significant change of speed of the pulp flow on the short cylindrical part of the vacuum chambers initiated synchronically low frequency pulsation of the pulp and fluctuations of masses of the paper samples, therefor, the paper web in the machine. The irregularities of the structure of the paper web create the frequent paper breaks and reduced quality of the commodity products.

Keywords: mass of 1 m² paper web, pulp pulsation, pulp vibration, mass of paper samples, tensile strength of paper web, round grid screen cylinder, vacuum chamber, holey roll, tissue paper making machine, tissue paper

For citation: Sivakov V.P., Vurasko A.V., Sherstobitov A.L. Reduction of Paper Pulp Fluctuations in Tissue Paper Making Machine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 186–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-186-200>

Введение

Бумагоделательные машины (БДМ) по классификации оборудования можно рассматривать как автоматические поточные линии с жесткими связями (без заделов полуфабрикатов) между технологическими частями. Такие поточные линии эффективны при условиях непрерывного режима работы, узкого спектра видов вырабатываемой продукции, повышенного запаса надежности оборудования. Сокращение времени переналадки БДМ на выработку продукции, значительно отличающейся по массе 1 м² полотна бумаги, актуально.

В условиях рыночных отношений потребители бумажной продукции ориентированы в основном на небольшие партии закупок разных видов бумаги. Малые и средние предприятия целлюлозно-бумажной промышленности для удовлетворения требования рынка вынуждены расширять линейку вырабатываемых видов бумаги. В частности, на обследуемой БДМ планируют вырабатывать санитарно-гигиеническую бумагу (СГБ) массой 17...18 г/м² и этикеточную бумагу массой 40 г/м².

Частая переналадка БДМ при выработке малых партий продукции занимает много времени. Переналадка происходит с обрывами и сопровождается длительной регулировкой вывода массы 1 м² полотна бумаги до заданного технологического значения. От потребителей поступают жалобы на неравномерную прочность полотна бумаги в машинном и поперечном направлениях. При изготовлении салфеток наблюдается периодическое изменение эффекта «раскрывания» листа салфетки по линиям сгиба, как продольного, так и поперечного направлений относительно полотна бумаги в товарном рулоне.

Перевод БДМ на производство продукции широкого спектра массы 1 м² бумаги сопряжен с исследованием таких динамических факторов, как пульсация бумажной массы в массоподводящей системе, колебания массы 1 м² полотна бумаги и неравномерность разрывного усилия в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги.

Материалы по исследованию источников колебаний полотна этикеточной бумаги в машинном направлении представлены на международной научно-технической конференции [12]. В данной работе приведены результаты изучения динамических процессов и даны рекомендации по снижению их негативного

влияния при производстве санитарно-гигиенических и этикеточных видов бумажной продукции массой 18...40 г/м². Колебания массы 1 м² бумаги влияют на обрывность полотна бумаги в процессе производства и являются одной из причин отклонения качественных показателей однородности бумаги от установленного технологического регламента. Вопросы изменения динамических состояний вибрационных технологических машин [5, 6, 10, 11, 14, 19], оптимизации параметров моделей БДМ [20], транспортирования полотна бумаги в БДМ, экспериментального моделирования напуска потока бумажной массы на формующие устройства [3, 17] и сушки полотна бумаги рассмотрены в работах авторов [15, 16, 18]. Способы напуска волокнистой массы на сетку БДМ и устройства для демпфирования колебаний бумажной массы при ее подаче в БДМ разработаны до уровня патентов [7–9], что свидетельствует об актуальности изучения динамики формования полотна бумаги.

Цель работы – выявление источников пульсации суспензии бумажной массы, уменьшение колебаний массы 1 м² бумаги и снижение неравномерной прочности в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги.

Задачи:

определение частоты и амплитуды пульсации давления суспензии бумажной массы в массонапускном устройстве БДМ;

установление метрологических характеристик, частоты и амплитуды колебаний массы образцов полотна бумаги и разработка методов расчета массы 1 м² бумаги по статистическим характеристикам колебаний массы образцов;

проведение сравнительного анализа характеристик пульсации давления суспензии бумажной массы в массонапускном устройстве и колебания массы образцов полотна бумаги;

выявление источников неравномерной прочности в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются массоподводящая часть и круглосеточное формующее устройство напуска бумажной массы на сетку БДМ. Предметом – СГБ. Методы – вибрационные исследования пульсации суспензии в массонапускном устройстве, установление факторов, обуславливающих колебания полотна бумаги, экспериментально-статистические измерения массы 1 м² и разрывного усилия полотна бумаги (ГОСТ ИСО 1924-1–96). Изготовлены образцы СГБ в количестве 104 шт. из одного полотна бумаги последовательно без промежуточных вырезов. Скорость машины при выработке бумаги равна 5 м/с.

БДМ для производства бумаги бытового и санитарно-гигиенического назначения закуплена за рубежом, где работала 15 лет, в России эксплуатируется более 5 лет. Обследование машины осуществляли при переводе производства СГБ с массы 1 м² полотна бумаги 26...27 г на массу 1 м² полотна бумаги 17...18 г. Скорость БДМ увеличена до 300 м/мин.

БДМ имеет круглосеточное вакуумформующее устройство (рис. 1). На круглосеточном цилиндре вакуумформующего устройства под действием давления массы, вакуума и центробежных сил происходит формирование полотна бумаги на коротком цилиндрическом участке. Внутри вакуумформующего цилиндра установлены 3 вакуумные камеры (передняя камера при исследовании не имела разрежения воздуха) [4]. Бумажная масса подается к круглосеточному

цилиндру в зону формирования бумаги по сужающемуся каналу между сеткой цилиндра и губой массонапускного устройства. Сверху зона формирования бумаги ограничена сукном, снимающим бумагу с круглосеточного цилиндра.

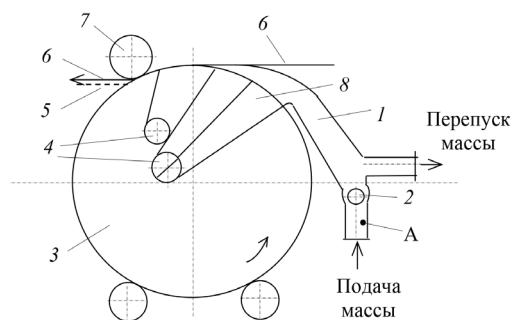


Рис. 1. Круглосеточное формующее устройство: 1 – массонапускное устройство; 2 – перфорированный вал; 3 – круглосеточный цилиндр; 4 – вакуумные камеры; 5 – полотно бумаги; 6 – съемное сукно; 7 – прижимной вал; 8 – камера без разрежения воздуха; А – точка измерения пульсации

Fig. 1. Round grid perforated forming device: 1 – pulper infeed system; 2 – holey roll; 3 – round grid screen cylinder; 4 – vacuum chambers; 5 – paper web; 6 – spare fabric; 7 – rider roll; 8 – air chamber; А – pulsation measurement point

В процессе формирования полотна бумаги скорость массы в начале канала массонапускного устройства превышает окружную скорость круглосеточного цилиндра, а в конце становится равна ей, так как вода фильтруется через сетку. Для регулирования начальной скорости в массонапускном устройстве предусмотрен канал перепуска массы.

В работе применены методы исследования пульсации бумажной массы и вибрации технологического оборудования [1, 2]. Измерения выполнены прибором СД-12. Пульсация бумажной массы определялась до и после смесительного насоса массоподводящей части, на выходе из сортировки «Ламорт» и в коллекторе массонапускного устройства БДМ.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования пульсации суспензии бумажной массы и вибрации оборудования. Спектр пульсации давления в коллекторе вакуумформирующего устройства напорного ящика представлен на рис. 2.

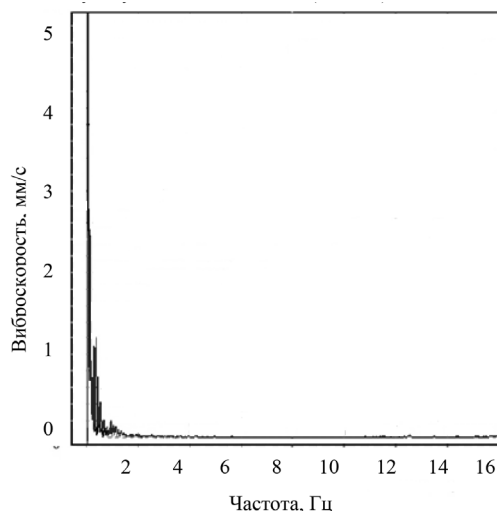


Рис. 2. Спектр пульсаций давления в коллекторе вакуумформирующего устройства напорного ящика

Fig. 2. Spectrum of pressure in the collector of vacuum forming device of the head box

На спектре отчетливо видны низкочастотные составляющие пульсации давления. Из низкочастотного спектра выделено 7 дискретных частот f_j , $j \in 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10$ и 7 соответствующих им амплитуд пульсации давления. Значения характеристик пульсации давления приведены в табл. 1. По мере увеличения частот f_j происходит снижение амплитуд пульсации давления (табл. 1).

На полученных спектрах видны частоты, соответствующие частотам пульсаций бумажной массы в коллекторе массонапускного устройства, оборотной частоте вращения круглосеточного цилиндра и ее гармоникам и субгармоникам.

Таблица 1

Частоты, периоды и амплитуды пульсаций давления в коллекторе формирующего устройства
Frequencies, periods and amplitudes of pressure pulsations in the collector of the forming device

Дискретные частоты	Частота, Гц	Период, с	Амплитуда, кПа
f_1	0,14	7,14	2,4
f_2	0,29	3,45	1,1
f_3	0,40	2,50	1,2
f_4	0,53	1,89	0,4
f_5	0,68	1,47	0,1
f_7	0,98	1,02	0,1
f_{10}	1,35	0,74	0,05

Результаты исследования колебания массы образцов полотна бумаги. Определение общей погрешности измерения массы образцов бумаги [13]. Для вырезания образцов бумаги применяли прямоугольный шаблон с размерами 432×230 мм. Размер 432 мм равен 0,125 длины окружности круглосеточного цилиндра. Одна развертка бумаги с окружности круглосеточного цилиндра соответствует длине 8 образцов. Размер 230 мм – наиболее востребованная потребителями ширина полотна бумаги в товарной бобине. При изготовлении шаблона использовали метрическую линейку с минимальной ценой деления 1 мм и транспортир с минимальной ценой деления 1°. Взвешивание образцов производили на лабораторных весах с ошибкой измерения 0,005 г. Перед взвешиванием образцов бумаги выполнено выравнивание влажности бумажного листа.

При расчете относительной погрешности P_1 (%) измерений метрической линейкой принимали абсолютную погрешность измерений $\Delta X_1 = 1,5$ мм:

$$P_1 = \frac{\Delta X_1}{X_{1\min}} \cdot 100 = \frac{1,5}{230} \cdot 100 = 0,65,$$

где $X_{1\min} = 230$ мм.

Расчет относительной погрешности транспорта P_2 (%) производили при абсолютной погрешности измерений $\Delta X_2 = 3^\circ$:

$$P_2 = \frac{\Delta X_2}{X_{2\min}} \cdot 100 = \frac{3}{87} \cdot 100 = 3,45,$$

где $X_{2\min}$ – минимально измеренный угол, зафиксированный у одного из образцов бумаги, $X_{2\min} = 87^\circ$.

При расчете относительной погрешности весов P_3 (%) принимали абсолютную погрешность измерений $\Delta X_3 = 0,01$ г:

$$P_3 = \frac{\Delta X_3}{X_{3\min}} \cdot 100 = \frac{0,010}{1,708} \cdot 100 = 0,585,$$

где $X_{3\min}$ – минимальная масса образца в исследуемой выборке, $X_{3\min} = 1,708$ г.

Общую систематическую погрешность измерений (%) в эксперименте рассчитывали по формуле

$$P_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^3 P_i^2} = \sqrt{0,65^2 + 3,45^2 + 0,585^2} = 3,56.$$

Для последующего выбора статистических характеристик (Кохрена, Стьюдента) задавали доверительную вероятность P из соотношения $P \leq 100 - P_\Sigma \leq 100 - 3,56 \leq 96,44$ %, принимали $P = 95$ %, или 0,95.

При математической обработке массы образцов бумаги определены среднее арифметическое значение массы $\bar{m} = 1,743$ г/образец и среднее квадратическое отклонение $\sigma_m = 0,0137$ г/образец для исследуемой выборки.

Допустимые верхнее и нижнее отклонения массы \bar{m} (г) образцов бумаги вычисляли по формулам:

$$m_B = \bar{m} + t \sigma_m = 1,743 + 1,98 \cdot 0,0137 = 1,77;$$

$$m_H = \bar{m} - t \sigma_m = 1,743 - 1,98 \cdot 0,0137 = 1,72,$$

где t – квантиль t -распределения Стьюдента [12]; $t = 1,98$ при $P = 0,95$ и числе образцов 104.

Зависимость массы последовательного ряда образцов бумаги от периода наработки и расчетные характеристики \bar{m} , m_B , m_H приведены на рис. 3.

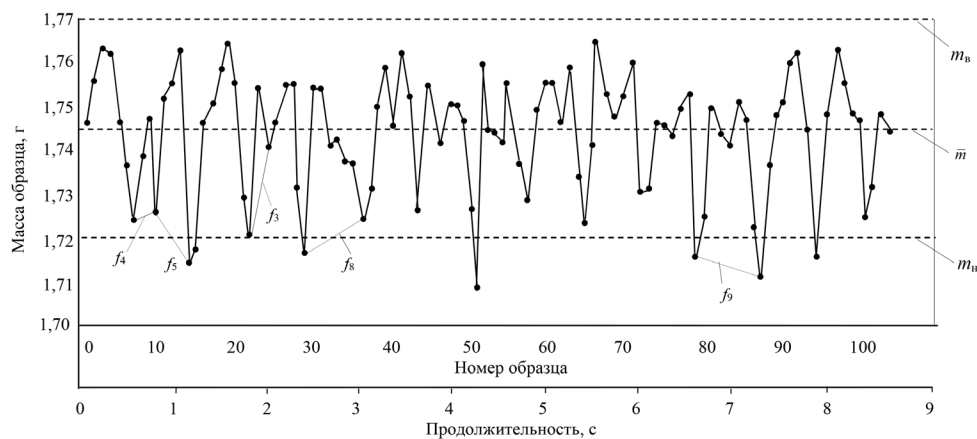


Рис. 3. Зависимость массы последовательного ряда образцов бумаги от наработки: \bar{m} , m_H , m_B – расчетные массы образцов; f_i – периоды частот i -х колебаний масс образцов

Fig. 3. The dependence of the mass of the paper samples in a sequential series to the operating time: \bar{m} , m_H , m_B – calculated mass of the samples; f_i – frequency periods of the i -th oscillations of the masses of the samples

Экспериментальную вероятность P_3 обследованной выработки массы образцов (рис. 3) вычисляли по формуле

$$P_9 = \frac{z - (z_n + z_b)}{z} = \frac{104 - 7}{104} = 0,933, \quad (1)$$

где z – количество образцов в исследуемой выборке, $z = 104$; z_n, z_b – количество образцов в исследуемой выборке, имеющих массу, соответственно выходящую за пределы нижнего и верхнего отклонений, $z_n = 7, z_b = 0$.

Из формулы (1) следует, что принятая в расчетах доверительная вероятность $P = 0,95$ близка к зафиксированной в эксперименте и что в рабочем режиме, особенно при переналадке, есть вероятность обрывов полотна бумаги 6,7%. На основе анализа графика (рис. 3) выполнен расчет среднего арифметического значения массы \bar{M} (г) 1 м² полотна бумаги:

$$\bar{M} = k_a k_b \bar{m} = 2,3148 \cdot 4,3478 \cdot 1,743 = 17,54;$$

$$k_a = L/a = 1000/432 = 2,3148; \quad k_b = L/b = 1000/230 = 4,3478,$$

где k_a, k_b – коэффициенты подобия длин продольной ($a = 432$ мм) и поперечной ($b = 230$ мм) сторон образца соответственно и длины стороны 1 м² полотна бумаги ($L = 1000$ мм).

Допустимую ошибку ΔM массы (г) 1 м² бумаги вычисляли по передаточной функции, учитывая коэффициент подобия геометрических размеров:

$$\Delta M = k_a k_b t \sigma_m = 2,3148 \cdot 4,3478 \cdot 1,98 \cdot 0,0137 = 0,273.$$

Максимальную и минимальную массу (г) 1 м² полотна бумаги рассчитывали по формулам:

$$M_{\max} = \bar{M} + \Delta M = 17,54 + 0,273 = 17,81;$$

$$M_{\min} = \bar{M} - \Delta M = 17,54 - 0,273 = 17,27.$$

Для снижения обрывности полотна бумаги при переналадке и в установленном режиме работы предложено увеличить массу 1 м² полотна бумаги регулированием концентрации бумажной массы в напускном устройстве до $\bar{M}_p = 18$ г/м².

Расчет воспроизводимости эксперимента. Оценку экспериментальных измерений массы образцов бумаги производили для проверки их повторяемости в определенных пределах измерений с заданной доверительной вероятностью P . Выполнили 2 серии измерений массы образцов бумаги. В каждой серии устанавливали массу 5 образцов бумаги. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений массы образцов бумаги

The results of measurements and the calculates parameters based on the masses of the paper samples

Серия опытов	Масса m_j образцов бумаги, г					Масса вычисленных характеристик, г	
	1	2	3	4	5	\bar{m}_j	\bar{S}_j^2 *
1	1,7638	1,7265	1,7539	1,7160	1,7308	1,7382	0,018
2	1,7470	1,7265	1,7627	1,7185	1,7165	1,739	0,016

*Дисперсии массы образцов бумаги.

Средние арифметические значения массы образцов бумаги находили по формуле

$$\bar{m}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m_{ij}, \quad i = \overline{1, \dots, k}.$$

Дисперсии массы образцов бумаги

$$S_j^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (m_{ij} - \bar{m}_j)^2, \quad i = \overline{1, \dots, k}.$$

Расчетный критерий Кохрена

$$G_p = \max S_j^2 / \sum_{j=1}^2 S_j^2 = 0,018 / (0,018 + 0,016) = 0,5294.$$

Расчетный критерий Кохрена G_p сравнивали с табличным критерием G . При доверительной вероятности $P = 0,95$, общем количестве дисперсий $j = 2$ и числе $f = k - 1 = 5 - 1 = 4$ имели $G = 0,768$. Так как $G_p = 0,529 < G = 0,768$, экспериментальные измерения масс образцов бумаги можно считать воспроизводимыми [10].

Определение частот колебаний массы образцов полотна бумаги. Для расчета частот колебаний массы образцов полотна бумаги использовали исходные данные: товарный рулон бумаги выработан при установившейся скорости машины $V = 5$ м/с; образцы полотна бумаги изготовлены из одного товарного рулона бумаги последовательно без промежуточных вырезов. При рабочей скорости машины $V = 5$ м/с с круглосеточного цилиндра съемным сукном (см. рис. 1) за время $t_v = 1$ с происходит съем полотна бумаги длиной $L_v = 5$ м.

Частоты колебаний (Гц) массы последовательного ряда образцов в продольном направлении вычисляли по формуле

$$f_i = \frac{L_v}{t_v z_i a} = \frac{5}{1 \cdot 8 \cdot 0,432} = 1,447 \approx 1,45,$$

где z_i – количество образцов в i -м периоде колебаний массы образцов, $z_i = 8$; $i \in 3, 4, 5, 8, 9$; $a = 0,432$ м.

Расчетные частоты колебаний массы образцов бумаги f_i приведены в табл. 3. Принято допущение, что усадка полотна бумаги при контактно-конвективной сушке не превышает 2,8 % [4], в расчете этот показатель не учтен.

Таблица 3

Характеристики колебаний массы смежных образцов санитарно-гигиенической бумаги с наружной поверхности круглосеточного цилиндра

Characteristics of mass fluctuations of sanitary-hygienic paper samples taken from the round grid screen cylinder

Образец	Количество образцов	f_i , Гц	Период колебаний массы образцов, с	Максимальная амплитуда колебаний массы, г/образец	Количество реализаций частоты в выборке, шт.
f_3	3	3,86	0,73	0,011	3
f_4	4	2,90	0,34	0,017	6
f_5	5	2,30	0,43	0,020	9
f_8	8	1,45	0,69	0,026	10
f_9	9	1,30	0,77	0,022	3

Далее было проведено сравнение частот пульсации давления суспензии бумажной массы f_j (см. табл. 1) и частот колебаний массы образцов бумаги f_i (табл. 3). Частота пульсации $f_j = f_{10} = 1,35$ Гц совпадает с частотами $f_i = f_8 = 1,45$ Гц и $f_i = f_9 = 1,3$ Гц с незначительным отклонением (табл. 4). При равенстве частот $f_i = f_j$ отмечено наиболее активное (близкое к резонансу) действие сил от пульсации давления на колебания массы формируемых образцов полотна бумаги.

Другие частоты пульсации давления f_j в разы меньше частот колебаний массы образцов. Активное влияние сил от пульсации давления с частотами f_j на колебания массы образцов f_i возможно при их кратности:

$$f_{ji} = k_{ji} f_i \cong f_i, \quad (2)$$

где k_{ji} – коэффициент кратности, определяемый подбором из ряда целых положительных чисел.

Например, для частот $f_i = f_3 = 3,86$ Гц и $f_j = f_7 = 0,98$ Гц коэффициент $k_{73} = 4$.

По формуле (2) получаем $f_{ji} = f_{73} = 4 \cdot 0,98 = 3,92$ Гц.

Расчетные значения f_{ji} , k_{ji} и отклонений частот f_{ji} от f_i приведены в табл. 4. Из 7 дискретных частот пульсации f_j (табл. 3) 6 совпадают с частотами колебаний массы образцов f_i или кратны им (см. табл. 1). Можно принять, что 6/7, или 86 %, пульсации активно влияет на частоты колебаний массы образцов.

Максимальные (амплитудные) отклонения массы образцов от среднего арифметического значения \bar{m} (рис. 3) наблюдаются при совпадении частот пульсации давления суспензии $f_i = f_{10}$ и колебаний массы образцов $f_j = f_8$ и $f_j = f_9$.

Таблица 4

Сравниваемые характеристики пульсации давления в формирующем устройстве и колебания массы образцов бумаги

Compared characteristics of pressure pulsation in the forming device and fluctuations in mass of paper samples

Частота пульсации давления f_j , Гц $j \in 1, 2, 3, 5, 7, 10$	Коэффициент кратности k_{ji}	Кратная частота пульсации f_{ji}		Частота колебаний массы образцов f_i , Гц	Отклонения частот f_{ji} от f_i , %
		обозначение	величина		
0,98	4	f_{73}	3,92	3,86	1,6
0,40	7	f_{34}	2,80	2,90	3,0
0,29	8	f_{25}	2,32	2,30	1,0
0,14	10	f_{18}	1,40	1,45	4,0
1,35	1	f_{108}	1,36		7,0
0,68	2	f_{59}		1,35	1,30
1,35	1	f_{109}	3,8		

Отклонения кратных частот пульсации давления f_{ji} от частот колебаний массы образцов полотна бумаги f_i (табл. 4) обусловлены погрешностями измерений.

Из результатов сравнения обработанных данных о пульсации бумажной массы и колебаниях массы образцов СГБ сделаны выводы:

частоты колебаний массы образцов СГБ на 86 % совпадают с частотами пульсации бумажной массы в массонапускном устройстве и на 14 % зависят от других факторов;

на графике рис. 3 преобладают колебания массы 8 смежных образцов на частоте 1,45 Гц (частоте колебания массы одной развертки окружности формулирующего цилиндра) с амплитудами отклонения массы до 0,026 г/образец;

второй по повторяемости в обследованной выборке является частота колебаний массы 2,3 Гц (5 смежных образцов) с амплитудой отклонения массы до 0,02 г/образец;

в пределах исследуемой выборки максимальное повторение колебаний массы (10 раз) одной развертки бумаги с наружной поверхности формулирующего цилиндра выявлено на частоте 1,45 Гц;

основной причиной синхронности низкочастотной пульсации 1,35...1,6 Гц суспензии в массонапускном устройстве и колебаний массы образцов бумажного полотна является «закупоривание–очистка» фрагментов сетки круглосеточного цилиндра, происходящее из-за отсутствия промывки сетки свежей водой.

Рассмотрели целесообразность подключения камеры без разрежения воздуха (см. рис. 1) к вакуумной системе. Круглосеточные вакуум-формулирующие цилиндры применяют при скоростях БДМ до 300 м/мин. При скорости машины 300 м/мин и более высоких скоростях в последней из 2 вакуумных камер создается глубокое разрежение воздуха, а перепад вакуума между камерами значителен [4]. Глубокое разрежение воздуха увеличивает скорость фильтрации и ухудшает отлив полотна бумаги. Для обеспечения качества отлива и снижения перепада вакуума между камерами применяют подключение к вакуумной системе передней (не имевшей разрежения воздуха) камеры и перераспределяют разрежение воздуха между 3 вакуумными камерами.

Исследование разрывного усилия бумаги. Образцы полотна бумаги выбраны в соответствии с технологией определения разрывного усилия (ГОСТ ИСО 1924-1–96). Данные исследования разрывного усилия бумаги опосредованно связаны с колебаниями массы образцов бумаги. При установленной длине и ширине образца колебания массы влияют только на толщину полотна бумаги, т. е. на разрывное усилие. Разрывное усилие (Н) вычисляли по формуле

$$F_p = \frac{\sigma}{b\delta},$$

где σ – максимальное напряжение в поперечном сечении образца бумаги, Па; b , δ – соответственно ширина и толщина образца бумаги, м.

Разрыву подвержено по 32 образца в продольном и поперечном направлениях. Массивы измеренных значений разрывного усилия образцов обработаны статистическими методами.

Средние арифметические значения разрывного усилия \bar{F} в машинном и поперечном направлениях полотна бумаги находили по формуле

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i, \quad n = 32.$$

В машинном направлении

$$\bar{F}_m = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} F_i = \frac{1}{32} \cdot 163,6 = 5,11.$$

В поперечном направлении

$$\bar{F}_n = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} F_i = \frac{1}{32} \cdot 29,25 = 0,91.$$

Коэффициент отношения среднеарифметических значений разрывных усилий устанавливали по формуле

$$k_f = \bar{F}_m / \bar{F}_n = 5,11 / 0,91 = 5,6.$$

Разрывное усилие образцов полотна в машинном направлении в 5,6 раза превышает усилие в поперечном направлении. Следовательно, при напуске бумажной массы из массонапускного устройства на круглосеточный цилиндр волокна ориентированы преимущественно в машинном направлении. В процессе изготовления салфеток (полотенец) полотно бумаги сгибают. При сгибании бумаги силы упругости от продольно ориентированных волокон раскрывают лист относительно линии сгиба, что нарушает форму и толщину пакета салфеток. Для устранения эффекта раскрывания необходимо обеспечить равномерную ориентацию волокон в плоскости листа бумаги. Это достигается равенством скоростей бумажной массы, выходящей из массонапускного устройства на сетку, и окружной скорости наружного диаметра круглосеточного цилиндра.

Исследованием разрывного усилия полотна бумаги в продольном и поперечном направлениях и визуальным осмотром отверстий установлено, что перфорированный вал массонапускного устройства имеет значительные засорения отверстий. Привод перфорированного вала работает с постоянной частотой вращения. При изменении скорости машины частота вращения перфорированного вала не меняется и не обеспечивает турбулентность потока. Необходимо установить привод перфорированного вала с регулируемой частотой вращения и периодически очищать отверстия вала от засорения.

По результатам исследования разработаны следующие рекомендации по усовершенствованию конструкции БДМ для уменьшения колебаний массы 1 м² бумаги, снижения неравномерности прочности в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги:

установить устройство промывки сетки круглосеточного цилиндра и организовать постоянную промывку сетки свежей водой;

установить привод перфорированного вала с регулируемой частотой вращения и варьировать частоту вращения при изменении скорости машины, организовать периодическую очистку отверстий перфорированного вала при остановках БДМ;

подключить переднюю камеру круглосеточного цилиндра к вакуумной системе и отрегулировать вакуум в 3 вакуумных камерах;

при изменении скорости машины обеспечить равенство скорости напуска бумажной массы на сетку и окружной скорости круглосеточного цилиндра.

Заключение

Выполнены измерения пульсации бумажной массы в массоподводящей системе круглосеточного формующего устройства бумагоделательной машины при производстве бумаги массой от 17 до 18 г/м², исследованы колебания массы образцов бумажного полотна в машинном направлении, разрывного усилия образцов в машинном и поперечном направлениях. Установлено, что частоты колебаний масс санитарно-гигиенической бумаги совпадают на 86 % с частотами пульсации давления и на 14 % зависят от других факторов.

Выявлено, что разрывное усилие образцов бумаги в машинном направлении в 5,6 раза больше, чем в поперечном. Это обусловлено отсутствием регулирования частоты вращения перфорированного вала и низким качеством очистки его отверстий.

Значительное изменение скорости потока массы на коротком цилиндрическом участке вакуумных камер в сочетании с отсутствием устройства промывки круглосеточного цилиндра свежей водой и плохой очисткой перфорированного вала приводят к пульсации суспензии, колебаниям массы полотна бумаги и обрывам бумаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Vuong Q.C.* Новые возможности изменения динамических состояний вибрационных технологических машин // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2(38). С. 25–31.

Vuong Q.C. New Possibilities for Changing Dynamic Conditions of Vibration Technology Machines. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 2(38), pp. 25–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-25-31>

2. *Калита Г.А.* Напорный ящик бумагоделательной машинам // Электрон. науч. изд. «Уч. заметки ТОГУ». 2018. Т. 9, № 2. С. 1165–1168.

Kalita G.A. Headbox of Paper Machines. *Scientists Notes PNU*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1165–1168. (In Russ.).

3. *Коряковская Н.В., Бедердинова О.И.* Контроль и регулирование влажности бумажного полотна // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 188–204.

Koryakovskaya N.V., Bederdinova O.I. Monitoring and Control of Paper Web Moisture. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 1, pp. 188–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-188-204>

4. *Кугушев И.Д., Терентьев О.А., Куров В.С., Кокушин Н.Н., Бельский А.П., Кондрашкова Г.А., Коновалов А.Б., Королев В.И., Новиков Н.Е., Подковырин А.И., Смолин А.С., Швецов Ю.Н., Шульман Г.З., Эйдлин И.Я.* Машины для производства бумаги и картона / под ред. В.С. Курова, Н.Н. Кокушина. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. 646 с.

Kugushev I.D., Terent'yev O.A., Kurov V.S., Kokushin N.N., Bel'skiy A.P., Kondrashkova G.A., Konovalov A.B., Korolev V.I., Novikov N.E., Podkovyrin A.I., Smolin A.S., Shvetsov Yu.N., Shul'man G.Z., Eydlin I.Ya. *Machines for Production of Paper and Cardboard*. Ed. by V.S. Kurov, N.N. Kokushin. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2017. 646 p. (In Russ.).

5. *Кузубина Н.В., Санников А.А.* Виброзащита технологических машин и оборудования лесного комплекса: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. 210 с.

Kutsubina N.V., Sannikov A.A. *Vibrodamping of Technological Machines and Equipment of Forestry Complex*: Monograph. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2008. 210 p. (In Russ.).

6. *Муромцев Ю.А.* Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах: Методы, модели, алгоритмы. М.: Химия, 1990. 144 с.

Muromtsev Yu.A. *Fail-Safety and Diagnostics of Violations in Chemical Industries: Methods, Models, Algorithms*. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 144 p. (In Russ.).

7. Патент 417565, М. Кл. D 21F 1/02. Напорный ящик бумагоделательной машины: № 1857918/29-33: заявл. 18.12.1972: опубл. 28.11.1974 / А.Л. Николаев, Ф.И. Ноздрачев.

Nikolayev A.L., Nozdrachev F.I. *Head Box for Paper Making Machine*. Patent USSR, no. SU 417565 A1, 1974. (In Russ.).

8. Патент 735184, М. Кл². D21F 1/06. Устройство для демпфирования колебаний давления волокнистой массы при подаче ее в бумагоделательную машину: № 2528255/29-12: заявл. 05.10.1977: опубл. 25.05.1980 / А. Кирьявайнен.

Kiryavajnen A. *Apparatus for Damping Oscillation of Paper Pulp Pressure while Feeding a Paper-Making Machine*. Patent USSR, no. SU 735184 A3, 1980. (In Russ.).

9. Патент 2061813 С1 РФ, МПК D21F 1/02 Способ напуска волокнистой массы на сетку бумагоделательной машины: 92016114/12: заявл. 24.12.1992: опубл. 10.06.1996 / Ю.А. Тихонов, О.А. Терентьев, Г.Г. Шервашидзе.

Tikhonov Ju.A., Terent'ev O.A., Shervashidze G.G. *Method for Admission of Pulp onto Net of Paper-Making Machine*. Patent RF, no. RU 2 061 813 C1, 1996. (In Russ.).

10. Санников А.А., Куцубина Н.В., Васильев В.В. К вопросу определения нагруженности, напряженного и вибрационного состояний трубчатых валов бумагоделательных машин // Новая наука: от идеи к результату. 2016. № 10-3. С. 98–101.

Sannikov A.A., Kutsubina N.V., Vasiliev V.V. On the Issue of Determining The Loading, Stress and Vibration States of Tubular Shafts of Paper Making Machines. *Novaya nauka: ot idei k rezul'tatu*, 2016, no. 10-3, pp. 98–101. (In Russ.).

11. Санников А.А., Куцубина Н.В., Дубатовк В.А., Калимулина Т.В., Перескоков И.В. О методах прогнозирования вибрационного состояния бумагоделательных машин при планируемом увеличении их скорости // Вестн. ИжГТУ. 2012. № 2(54). С. 16–19.

Sannikov A.A., Kutsubina N.V., Dubatovk V.A., Kalimulina T.V., Pereskokov I.V. Methods of Forecasting the Vibration State of Papermaking Machines at Their Speed Planned Increase. *Vestnik IzhGTU*, 2012, no. 2(54), pp. 16–19. (In Russ.).

12. Сиваков В.П., Вураско А.В., Вихарев С.Н., Артемов А.В. Определение источников колебаний массы полотна этикеточной бумаги в машинном направлении // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.И. Комарова, Архангельск, 09–11 сент. 2021 г. Архангельск: САФУ, 2021. С. 372–377.

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Vikharev S.N., Artemov A.V. Determination of Sources of Fluctuations in Mass of Label Paper Web in the Machine Direction. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the 6th International Conference in Memory of Professor Valery Komarov*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2021, pp. 372–377. (In Russ.).

13. Сиваков В.П., Вураско А.В., Леонович А.А. Основы научных исследований в химической и химико-механической переработке растительного сырья. Екатеринбург: УГЛТУ, 2021. 169 с.

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Leonovich A.A. *Fundamentals of Scientific Research in Chemical and Chemical-Mechanical Processings of Vegetal Raw Materials*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2021. 169 p. (In Russ.).

14. Сиваков В.П., Вураско А.В., Минакова А.Р. Влияние колебаний массы бумажного полотна на качество товарной продукции // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2(38). С. 133–138.

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Minakova A.R. The Influence of Fluctuations in the Mass of Paper Cloth on the Quality of Marketable Products. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 2(38), pp. 133–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-133-138>

15. Batchelor W.J., Wu Z., Johnston R.E. Measurement of z-Direction Moisture Transport and Shrinkage in the Drying of Paper. *Appita Journal*, 2004, vol. 57, no. 2, pp. 107–127.

16. Forughi A.F., Green S.I., Stoeber B. Optical Transparency of Paper as a Function of Moisture Content with Applications to Moisture Measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, iss. 2, art. 023706. <https://doi.org/10.1063/1.4942251>

17. Hallajisani A., Shahbeig H., Hashemi S.J., Murray Douglas W.J. An Experimental Simulation Model for Coated Paper Drying. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2013, vol. 30, iss. 3, pp. 563–573. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322013000300014>

18. Harrmann M., Schulz S. Convective Drying of Paper Calculated with a New Model of the Paper Structure. *Drying Technology*, 1990, vol. 8, iss. 4, pp. 667–703. <https://doi.org/10.1080/07373939008959910>

19. Kuharchuk V.V., Katsiv S. Application of Wavelet-Transformations to the Tasks of Monitoring and Diagnostics of Machines and Equipment. *Наукові праці ВНТУ = Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2015, no. 4, pp. 1–7.

20. Åkesson J., Ekvall J. *Parameter Optimization of a Paper Machine Model*. Paper Presented at Reglermöte. Stockholm, Lund University, 2006. 7 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article