

УДК 676.017.272

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-188-204

КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

*Н.В. Коряковская*¹, канд. техн. наук, доц.;

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6371-6936>

*О.И. Бедердинова*², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [F-3355-2019](https://orcid.org/0000-0002-3664-4276),

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3664-4276>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.koryakovskaya@narfu.ru, o.bederdinova@narfu.ru

²Филиал Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, ул. Капитана Воронина, д. 6, г. Северодвинск, Архангельская обл., Россия, 164520; e-mail: o.bederdinova@narfu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 27.03.20 / Принята к печати 21.06.20

Аннотация. Качество продукции является ключевым индикатором положительного результата работы целлюлозно-бумажных производств. Влажность – один из основных показателей качества бумаги. Рассматривая профиль влажности по ширине бумажного полотна, можно судить о возможных недостатках технологического оборудования, своевременное устранение которых улучшит потребительские свойства бумаги и повысит экономическую эффективность производства. Цель исследования – оценка соответствия результатов измерений влажности требованиям технологического регламента при установившемся и переходном режимах работы бумагоделательной машины, а также однородности профиля влажности в поперечном направлении. Для оценки качества работы автоматизированной системы управления влажностью бумажного полотна обработаны данные со сканирующего устройства при высоком и низком разрешении с помощью статистических методов. Определено, что при установившемся режиме работы бумагоделательной машины влажность соответствует требованиям регламента с доверительной вероятностью 0,95; при переходном режиме работы – превышает верхнюю границу на 6 %. Выявлено, что автоматизированная система управления влажностью устраняет данное нарушение за 340 с. В качестве критерия оценки однородности профиля влажности по ширине бумажного полотна использован коэффициент вариации. Подтверждена гипотеза о наличии линии тренда в профиле влажности по ширине бумажного полотна, и с помощью методов регрессионного анализа получено уравнение линии тренда. При устраненном технологическом факторе, систематически влияющем на однородность, проведено моделирование профиля влажности. Доказано, что устранение недостатка уменьшит коэффициент вариации, а значит улучшит однородность профиля на 41,2 % при установившемся режиме работы бумагоделательной машины. При переходном режиме работы профиль влажности улучшается незначительно. Предложенный алгоритм исследования профиля влажности бумаги, его моделирование после корректирующих воздействий на объект управления могут быть использованы в системах регулирования качества бумаги в поперечном направлении.

Для цитирования: Коряковская Н.В., Бедердинова О.И. Контроль и регулирование влажности бумажного полотна // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 188–204. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-188-204

Ключевые слова: влажность бумажного полотна, регулирование влажности, профиль влажности, однородность профиля, линия тренда, качество регулирования, сканирующее устройство, сканы влажности, бумагоделательная машина.

MONITORING AND CONTROL OF PAPER WEB MOISTURE

*Nataliya V. Koryakovskaya*¹, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6371-6936>

*Oksana I. Bederdinova*², *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [F-3355-2019](https://orcid.org/0000-0002-3664-4276), *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3664-4276>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: n.koryakovskaya@narfu.ru

²Branch of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, ul. Kapitana Voronina, 6, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, 164500, Russian Federation; e-mail: o.bederdinova@narfu.ru

Original article / Received on March 27, 2020 / Accepted on June 21, 2020

Abstract. Product quality is a key indicator of the positive outcome of pulp and paper production. Moisture content is one of the main paper quality characteristics. The moisture profile across the paper web width shows possible shortcomings of the process equipment which, if corrected, will improve the consumer properties of paper and enhance economic efficiency. The research aims to assess whether the moisture content measurement results meet the requirements of the process regulations in the steady-state and transient modes of paper machine operation as well as the uniformity of the moisture profile in the cross direction. Data from the scanning device at high and low resolution were processed using statistical methods in order to assess the quality of the automatic paper web moisture control system. It was determined that in the steady-state mode of paper machine operation the moisture content meets the requirements of the regulations with a confidence probability of 0.95; in the transient mode of operation it exceeds the upper limit by 6 %. It has been found that the automated moisture control system eliminates this fault in 340 s. The coefficient of variation was used as a criterion for evaluating the uniformity of the moisture profile across the paper web width. The hypothesis of a trend line in the moisture profile across the paper web width was confirmed and a trend line equation was obtained using regression analysis techniques. The moisture profile was modeled while eliminating the technological factor that systematically affects the uniformity. It is proven that the elimination of the fault will reduce the coefficient of variation and therefore improve the uniformity of the profile by 41.2 % in the steady-state mode of paper machine operation. In the transition mode of operation the moisture profile improves slightly. The proposed algorithm for studying the moisture profile of paper, its modeling after corrections of the control object can be used in systems for controlling the quality of paper in the transverse direction.

For citation: Koryakovskaya N.V., Bederdinova O.I. Monitoring and Control of Paper Web Moisture. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 188–204. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-188-204

Keywords: paper web moisture, moisture control, moisture profile, profile uniformity, trend line, control quality, scanning device, moisture scans, paper machine.

Введение

Процесс производства бумаги является сложным и многосвязным, распределенным во времени и пространстве. Технологические параметры во многих случаях обладают свойством взаимного влияния, что усложняет регулирование. Так, например, важный показатель качества – массу 1 м^2 бумажного полотна – корректируют изменением расхода массы в напорный ящик, что в свою очередь изменяет влажность бумаги. В настоящее время потребителя интересует не только выполнение требований регламента по средним значениям основных показателей качества бумаги, но и однородность показателей по ширине полотна [7, 13]. В работах [4, 15] исследованы методы оценки неоднородности просвета и ее влияние на печатные свойства. Авторы публикаций [1, 10] аргументируют важность контроля и регулирования профиля массы 1 м^2 бумажного полотна. Неравномерный профиль свидетельствует о перерасходе волокна, негативно влияет на качество просвета и механические характеристики.

Для влажности однородность профиля – это минимальный разброс количественных значений показателя относительно среднего значения по ширине полотна. Регулирование влажности осуществляют в сушильной части бумагоделательной машины (БДМ). Процесс сушки является самым энергозатратным, потребляющим 75 % тепловой энергии от всего процесса производства бумаги [2, 3, 18]. Излишнее пересушивание бумаги соответствует отрицательным отклонениям от среднего значения влажности, приводит к ухудшению качества продукции и перерасходу пара.

Исследованиям в области регулирования температурного режима сушки и влажности бумажного полотна по длине посвящено много работ [2, 3, 5, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 19, 21–26]. Следует выделить исследования Гринченко И.А. [2], Жученко А.И. [3], Akesson J. [8], Stenström S. [25], предлагающие математические модели температурного режима сушки при нормальном режиме работы БДМ с целью оптимизации расхода пара и уменьшения брака в случае выхода влажности за пределы технологического регламента.

Авторы [16, 21, 26] исследовали градиент профиля влажности по толщине полотна. Актуальность аргументирована необходимостью оптимизации энергозатрат в процессе сушки, улучшения механических свойств бумаги и уменьшения случаев брака продукции. В источнике [9] приведены математические модели градиентов влажности по толщине и даны рекомендации по технологии сушки бумаги с различной массой 1 м^2 .

Цель исследований – оценка однородности профиля влажности в поперечном направлении бумажного полотна и соответствия результатов измерений требованиям технологического регламента при установившемся и переходном режимах работы БДМ. Отличительной особенностью проведенных работ является характеристика влажности не только по длине полотна, но и по ширине профиля. Исследование актуально, т. к. может помочь улучшить качество продукции, ее потребительские свойства, снизить количество брака и оптимизировать энергозатраты.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – бумажное полотно. Предмет – качество регулирования влажности бумажного полотна в продольном и поперечном направлениях, а также однородность профиля в поперечном направлении. Методы – статистический и регрессионный анализ экспериментальных данных.

Данные о влажности получены с измерительного сканирующего устройства, входящего в состав автоматизированной системы управления качеством бумаги на БДМ-4 АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат».

Результаты измерений – сканы влажности по ширине бумажного полотна. Интервал времени между сканами составляет 17 с. Анализировали результаты измерений за 34 мин в количестве 120 сканов в высоком и низком разрешении. Обрезная ширина бумажного полотна – 4200 мм. Скан высокого разрешения содержит 420 значений влажности по ширине полотна, скан низкого разрешения – 42 значения.

На рис. 1 представлен профиль влажности в поперечном направлении бумажного полотна при высоком и низком разрешениях сканера.

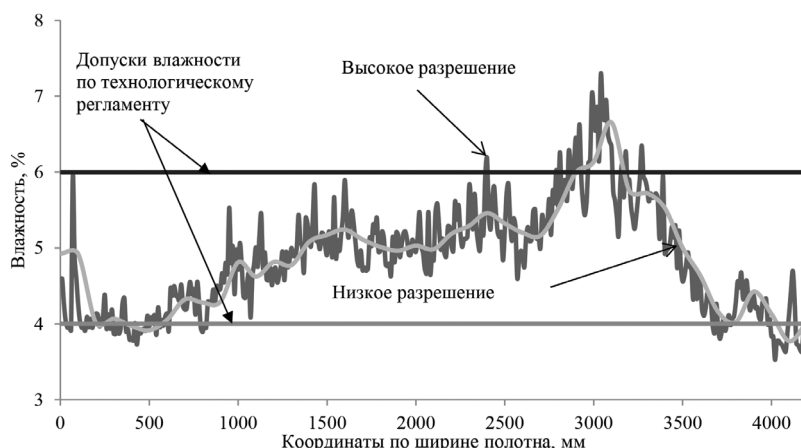


Рис. 1. Профиль влажности по ширине бумажного полотна при высоком и низком разрешениях сканера

Fig. 1. Moisture profile across the paper web width at high and low scanner resolutions

Измерения влажности проводили при переходном режиме работы БДМ, а именно при работе машины в режиме смены сорта продукции. Результаты измерений: 94 скана – данные о влажности бумаги с массой $1 \text{ м}^2 60 \pm 2,3 \text{ г}$, 26 сканов – с массой $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$. Согласно технологическому регламенту, влажность в обоих случаях должна находиться в пределах 4...6 %.

На рис. 2 показан тренд поверхностной плотности бумаги в машинном направлении. Линия тренда представляет собой ступенчатую функцию. В момент времени $t = 1581 \text{ с}$ масса $1 \text{ м}^2 m = 59,2 \pm 1,8 \text{ г}$. В следующий дискретный момент времени $t = 1598 \text{ с}$ $m = 100,4 \pm 2,5 \text{ г/м}^2$. Переход на новый сорт бумаги происходит в течение 17 с.

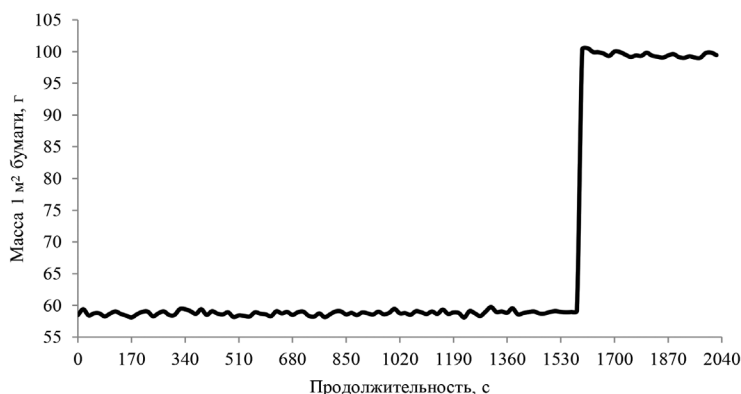


Рис. 2. Переходный режим смены сорта бумаги

Fig. 2. Transition mode for paper grade changing

Увеличение массы 1 м² бумаги осуществляется за счет увеличения влажности вследствие роста расхода массы из напорного ящика на сетку БДМ. Система управления качеством построена по принципу инвариантности [5]: при поступлении задания на смену сорта бумаги в систему автоматизированного регулирования влажности идет корректирующее воздействие, увеличивающее давление пара в сушильных цилиндрах для повышения температуры их поверхности с целью стабилизации влажности до рабочих значений 4...6 %.

Алгоритм проведения исследований приведен на рис. 3 в виде функциональной модели по нотации BPMN. Для исследования качества регулирования влажности в машинном направлении необходимо решить следующие задачи:

установить закон распределения экспериментальных данных;

в случае нормального закона распределения определить: среднее значение, стандартное отклонение и допустимые границы влажности с доверительной вероятностью (P) 0,95.

Для исследования качества регулирования влажности в поперечном направлении требуется:

оценить однородность дисперсий и средних значений влажности при разных объемах выборки;

оценить однородность профиля влажности по ширине бумажного полотна; выявить наличие систематической составляющей (линии тренда) в колебательной характеристике профиля влажности по ширине бумажного полотна.

Нормальность закона распределения экспериментальных данных устанавливаются путем сравнения стандартных отклонений σ_1 и σ_2 , вычисленных по разным формулам.

Формула Бесселя имеет вид

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}},$$

где n – объем выборки (число сканов); v_i – i -е значение остаточного отклонения, $i = 1 \dots n$.

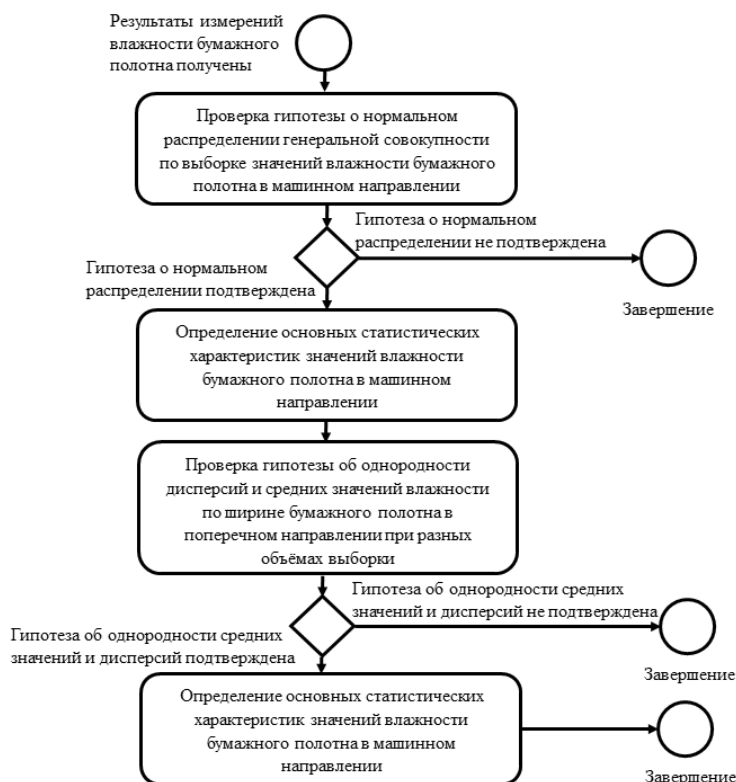


Рис. 3. Модель проведения исследований качества регулирования влажности бумажного полотна

Fig. 3. Model for carrying out studies on quality of paper web moisture control

Остаточное случайное отклонение v_i средней влажности $u_{срi}$ в поперечном направлении определяется по формуле

$$v_i = u_{срi} - \bar{x},$$

где \bar{x} – средняя влажность в машинном направлении.

Средние значения влажности в поперечном направлении для разных разрешений сканера находятся так:

$$u_{срi} = \frac{\sum_{j=1}^N u_j}{N},$$

где N – объем выборки (количество значений параметра в одном скане: для высокого разрешения $N = 420$, для низкого $N = 42$); u_j – влажность по ширине полотна.

Средняя влажность \bar{x} в машинном направлении вычисляется следующим образом:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n u_{срi}}{n}.$$

Формула стандартного отклонения для нормального распределения случайной дискретной величины имеет вид

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1,5707}{n(n-1)}} \cdot \sum_{i=1}^n |v_i|.$$

Если стандартные отклонения σ_1 и σ_2 отличаются меньше чем на 10 %, значит, результаты измерения влажности подчиняются нормальному закону распределения.

Для проверки статистической гипотезы об однородности двух дисперсий используют F -критерий Фишера [20].

Вначале вычисляют $F_{\text{расч}}$, равный отношению большей из выборочных дисперсий к меньшей:

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_1^2}{s_2^2},$$

где s_1^2, s_2^2 – выборочные дисперсии.

Далее по уровню значимости q и степеням свободы дисперсий числителя и знаменателя f_1 и f_2 таблиц распределения Фишера находят $F = F_{\text{табл}}$.

Степени свободы определяют по формулам:

$$\begin{aligned} f_1 &= n_1 - 1; \\ f_2 &= n_2 - 1, \end{aligned}$$

где n_1, n_2 – объемы соответствующих выборок.

Если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, можно принять гипотезу об однородности дисперсий.

Для проверки гипотезы об однородности средних результатов измерений в случае однородности дисперсий вычисляют расчетное t -отношение по формуле [6]

$$t_{\text{расч}} = \frac{|\bar{y}_1 - \bar{y}_2|}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \left[\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}\right]}}. \quad (1)$$

Из таблиц распределения Стьюдента при уровне значимости q и числе степеней свободы $f = n_1 + n_2 - 2$ находят табличное значение $t_{\text{табл}}$. Если $t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$, то можно принять гипотезу об однородности средних значений.

В качестве оценки неоднородности профиля влажности по ширине полотна будем использовать коэффициент вариации

$$C_v = \frac{s}{u_{\text{ср}}} \cdot 100 \%,$$

где s – стандартное отклонение.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты обработки экспериментальных данных для оценки качества регулирования влажности бумажного полотна в машинном направлении.

Стандартные отклонения σ_1 и σ_2 отличаются меньше чем на 10 % для двух сортов бумаги при разных разрешениях сканирующего устройства, следовательно, результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения,

а их статистическую оценку можно произвести с помощью таких показателей, как среднее значение, стандартное отклонение и доверительный интервал.

По результатам расчетов, представленных в табл. 1, для бумаги с массой $1 \text{ м}^2 60 \pm 3 \text{ г}$ доверительные границы значений влажности $4,5 \leq u \leq 5$ при $P = 0,95$. Как следует из табл. 1, максимальное и минимальное значения не выходят за установленные пределы.

Следовательно, автоматизированная система управления влажностью бумажного полотна удовлетворяет требованиям регламента, диапазон колебаний находится в средней части установленных границ.

Таблица 1

Результаты расчета основных статистических характеристик

Показатель	Сорт бумаги, требования к качеству по технологическому регламенту БДМ-4			
	Бумага офсетная, масса $1 \text{ м}^2 60 \pm 3 \text{ г}$, влажность – 4...6 %		Бумага офсетная, масса $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$, влажность – 4...6 %	
Разрешение сканера	Высокое	Низкое	Высокое	Низкое
Объем выборки	94	94	26	26
Средняя влажность, %	4,692	4,688	5,423	5,453
Стандартное отклонение по формуле Бесселя	0,113	0,114	0,563	0,567
Стандартное отклонение по формуле нормального распределения	0,115	0,115	0,586	0,588
Отличие σ_1 от σ_2 , %	1,063	1,379	4,040	3,772
Табличное значение t -критерия Стьюдента	1,986	1,986	2,056	2,056
Минимально допустимая влажность при $P = 0,95$	4,467	4,461	4,265	4,287
Максимально допустимая влажность при $P = 0,95$	5,035	5,039	6,545	6,558
Максимальная влажность в машинном направлении	5,035	5,039	6,545	6,558
Минимальная влажность в машинном направлении	4,466	4,480	4,692	4,703

Для бумаги с массой $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$ доверительные границы значений влажности $4,265 \leq u \leq 6,545$ при $P = 0,95$. Максимальное и минимальное значения, как видно из табл. 1, попадают в доверительный интервал, однако верхняя граница интервала выходит за пределы, установленные технологическим регламентом.

На рис. 4 представлен тренд средней влажности для высокого и низкого разрешения сканера. От 0 до 1598 с тренд соответствует влажности бумаги с массой $1 \text{ м}^2 60 \pm 3 \text{ г}$. Остальная часть тренда отображает качество бумаги с массой $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$.

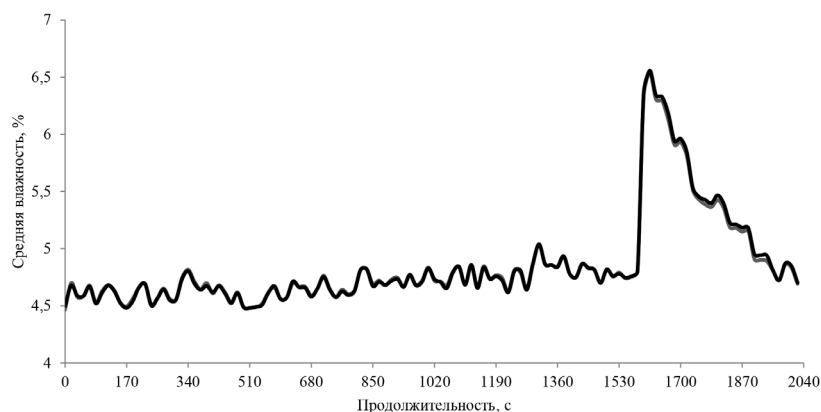


Рис. 4. Тренд средней влажности бумажного полотна в машинном направлении

Fig. 4. The trend line of the average moisture content of paper web in the machine direction

Из рис. 4 видно, что за 340 с система управления влажностью возвращает регулируемый параметр в заданные границы. Таким образом, в течение 340 с производится бумага, удовлетворяющая требованиям технологического регламента по массе 1 м^2 (рис. 2), но ее влажность значительно превышает предельные границы. Рабочая скорость БДМ 350 м/мин, следовательно, при переходном режиме работы производится 0,5 т бракованной бумаги.

Для исследования равномерности профиля влажности по ширине полотна было решено использовать данные низкого разрешения. Чтобы убедиться в однородности измерительной информации выборок разного объема, проверены гипотезы об однородности дисперсий и средних значений по методикам, упомянутым выше.

На рис. 5 изображен тренд расчетного значения F -критерия Фишера. Из графика следует, что для 112 выборок из 120 выполняется условие $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$. Для данных выборок можно принять гипотезу об однородности дисперсий.

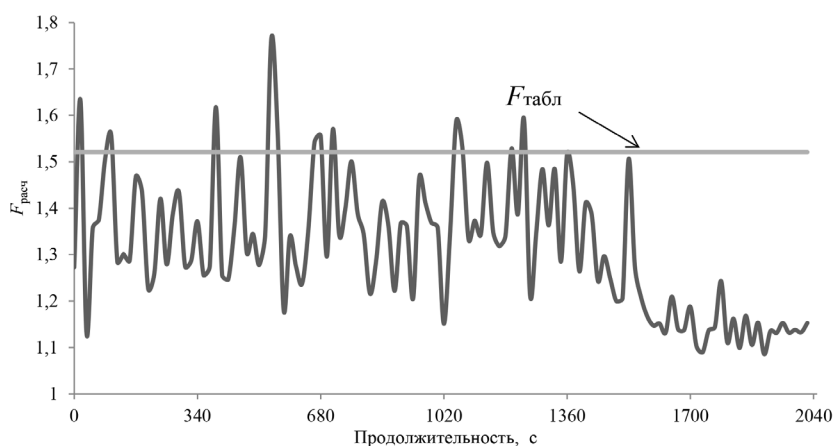


Рис. 5. Расчетные значения F -критерия Фишера

Fig. 5. The calculated values of the F -test

В целях проверки однородности средних значений по формуле (1) определены значения t -критерия Стьюдента $t_{\text{расч}}$. Так как $t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$ для всех результатов наблюдений (рис. 6), можно принять гипотезу об однородности средних значений. Средняя влажность при высоком и низком разрешениях практически одинакова (см. рисунок 4).

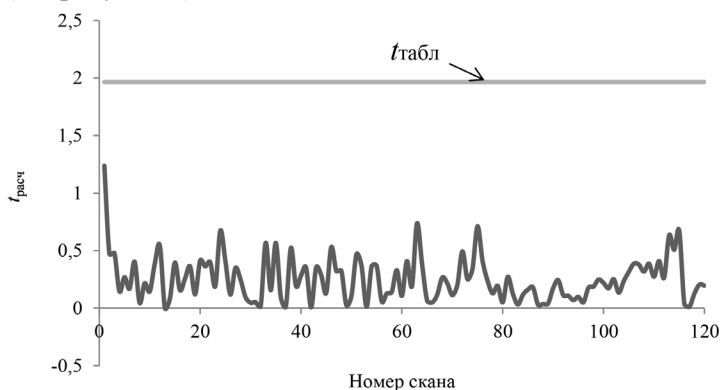


Рис. 6. Расчетные значения t -критерия Стьюдента

Fig. 6. The calculated values of the t -test

Определенные значения коэффициента вариации профиля влажности бумажного полотна при установившемся и переходном режимах работы БДМ представлены на рис. 7.

Резкое ухудшение однородности профиля влажности наблюдается при переходном режиме работы БДМ. В соответствии с графиком (рис. 7), коэффициент вариации по окончании переходного процесса должен вернуться к значениям установившегося режима работы БДМ — $8,5 \pm 1,6$ %.



Рис. 7. Оценка однородности профиля влажности бумажного полотна при установившемся и переходном режимах работы БДМ

Fig. 7. Evaluation of the paper web moisture profile uniformity during the steady-state and transient modes of paper machine operation

Для исследования тренда колебаний влажности по ширине полотна выбраны 15 массивов результатов измерений низкого разрешения из 112 сканов, в которых соблюдается однородность дисперсий и средних значений влажности.

9 сканов соответствуют установившемуся режиму работы БДМ, бумаге с массой $1 \text{ м}^2 60 \pm 2_3 \text{ г}$, 6 сканов – переходному режиму работы, бумаге с массой $1 \text{ м}^2 100 \pm 5 \text{ г}$.

При построении графиков влажности по ширине полотна наблюдалась линия тренда на всех случайно выбранных сканах влажности (рис. 8).

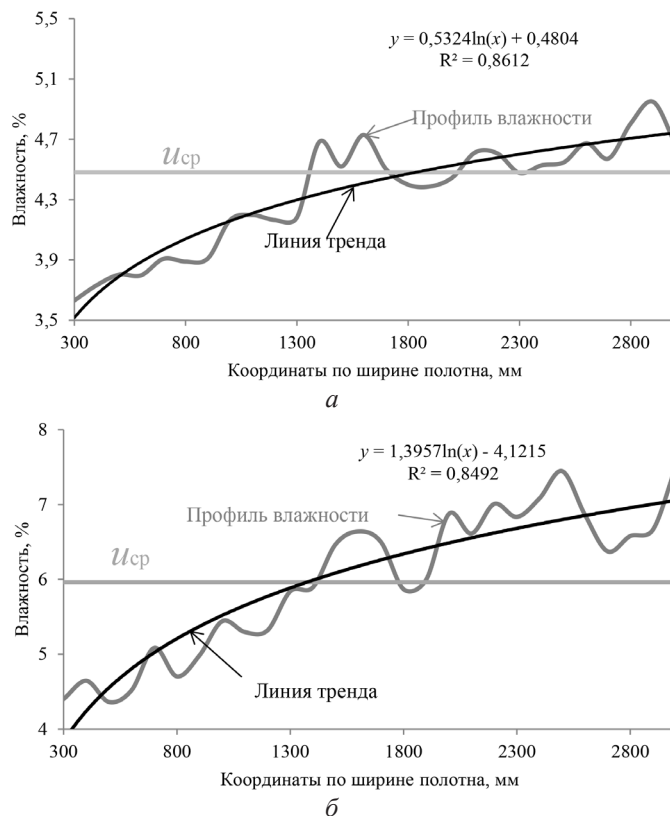


Рис. 8. Профиль влажности при установившемся (а) и переходном (б) режимах работы БДМ

Fig. 8. Moisture profile during the steady state (a) and transient (b) modes of paper machine operation

Для всех исследуемых профилей характерно, что средняя влажность достигается после координаты по ширине полотна 1300 мм.

Регрессионная модель линии тренда имеет вид

$$y = C \ln(x) + B, \quad (2)$$

где C – коэффициент; x – координата по ширине полотна; B – свободный член функции.

На основании результатов аппроксимации (табл. 2) построены зависимости коэффициента C и свободного члена логарифмической функции B уравнения линии тренда от средней влажности (см. рис. 8, а, б соответственно).

Таблица 2

Результаты аппроксимации линии тренда

Среднее значение влажности, %	Коэффициент C	Свободный член	Достоверность аппроксимации
4,498	0,4739	0,9809	0,7537
4,678	0,5736	0,4014	0,8520
4,643	0,5081	0,8260	0,7589
4,481	0,5324	0,4804	0,8612
4,803	0,5416	0,7931	0,7926
4,606	0,4905	0,9664	0,7685
4,392	0,4622	1,2622	0,6124
4,864	0,4657	1,3978	0,6985
4,818	0,5741	0,5840	0,8045
6,558	1,5917	-5,0111	0,7843
5,962	1,3957	-4,1215	0,8492
5,848	1,0421	-1,8335	0,8335
5,453	0,9547	-1,4748	0,7892
5,212	0,9714	-1,8985	0,8440
4,872	0,8203	-1,0235	0,8403

Коэффициент корреляции для C и средней влажности равен 0,962 (рис. 9) и является статистически значимым. Уравнение парной линейной регрессии для коэффициента определяется формулой

$$C = 0,535u_{\text{cp}} - 1,952.$$

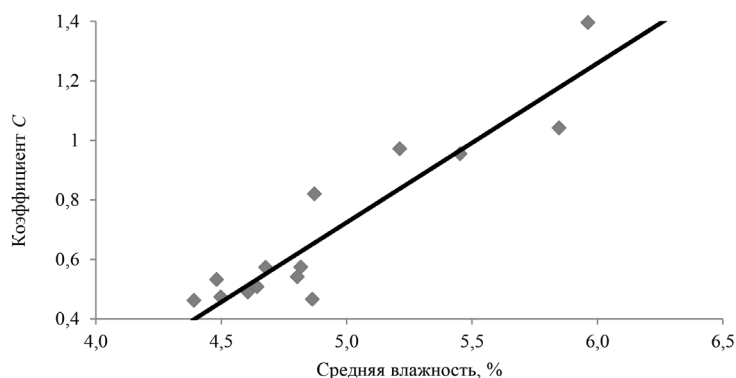


Рис. 9. Зависимость коэффициента C уравнения линии тренда от средней влажности

Fig. 9. The dependence of the C coefficient of the trend line equation on the average moisture content

Коэффициент корреляции между свободным членом функции B и средней влажностью равен $-0,937$ (рис. 10) и является статистически значимым.

Уравнение парной линейной регрессии для свободного члена функции B находится по выражению

$$B = -2,885u_{\text{cp}} + 14,130.$$

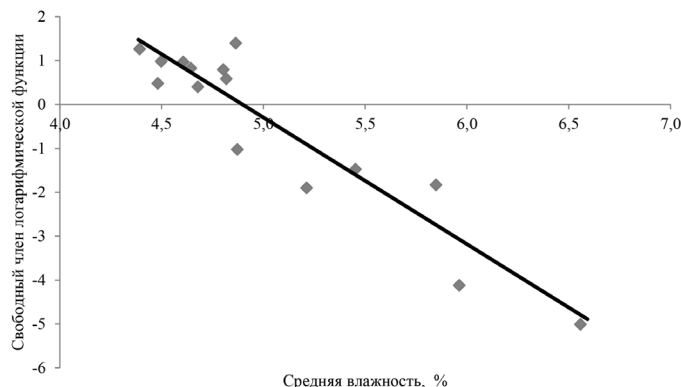


Рис. 10. Зависимость коэффициента B уравнения линии тренда от среднего значения влажности

Fig. 10. The dependence of the B coefficient of the trend line equation on the average moisture content

Функция тренда, описываемая уравнением (2), примет вид

$$y(x) = (0,535u_{\text{cp}} - 1,952) \ln x - 2,885u_{\text{cp}} + 14,130. \quad (3)$$

Ранее было отмечено, что для всех исследуемых профилей характерно достижение средней влажности после координаты 1300 мм. Это говорит о систематическом воздействии на профиль влажности со стороны технологического процесса.

Проверим наличие данной проблемы, приравняв правую часть уравнения (3) к u_{cp} :

$$u_{\text{cp}} = (0,535u_{\text{cp}} - 1,952) \ln x - 2,885u_{\text{cp}} + 14,130. \quad (4)$$

Решение данного уравнения имеет вид

$$X_{u_{\text{cp}}} = e^{\frac{3,885u_{\text{cp}} - 14,130}{0,535u_{\text{cp}} - 1,952}},$$

где $X_{u_{\text{cp}}}$ – координата достижения линией тренда значения средней влажности, мм.

Определенные $X_{u_{\text{cp}}}$ по ширине бумажного полотна в соответствии с выражением (4) и данными табл. 2 представлены на рис. 11.

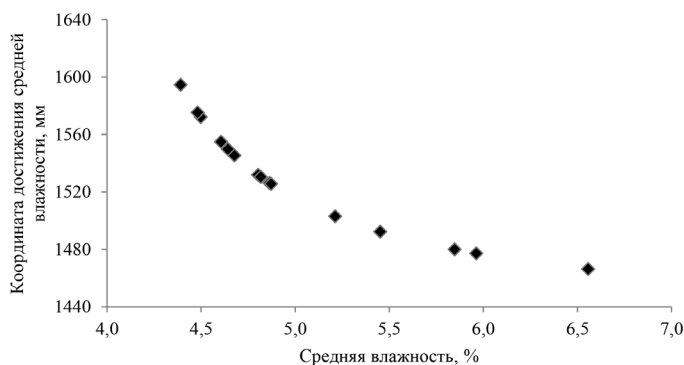


Рис. 11. Значения координаты достижения средней влажности по ширине бумажного полотна

Fig. 11. The values of the coordinate of achieving the average moisture content across the paper web width

По результатам статистической обработки данных, среднее значение $X_{u_{cp}}$ составляет 1528 мм, коэффициент вариации – 2,1 %.

Можно сделать выводы:

чем меньше средняя влажность, тем больше координата достижения среднего значения;

средняя влажность достигается после 1440 мм от края полотна;

коэффициент вариации 2,1 % говорит о малых отличиях значений $X_{u_{cp}}$;

определение координаты $X_{u_{cp}}$ поможет установить область технологического процесса, вызывающую появление тренда в профиле влажности.

Моделирование результатов устранения возмущающего воздействия, систематически влияющего на неравномерность профиля влажности по ширине бумажного полотна, проведено по формуле

$$\tilde{u}(x) = u(x) - y(x) + u_{cp},$$

где $\tilde{u}(x)$ – результат измерения влажности в точке x после устранения влияния возмущения; $u(x)$ – исходный результат измерения влажности в точке x ; $y(x)$ – значение функции тренда в точке x .

На рис. 12 представлены результаты моделирования.



Рис. 12. Результаты моделирования профиля влажности бумаги после устранения влияния технологического фактора

Fig. 12. The modeling results of the paper moisture profile after elimination of the influence of the technological factor

Результаты моделирования (рис. 13) наглядно демонстрируют улучшение однородности профиля влажности бумаги после устранения систематического возмущающего воздействия. Разброс влажности относительно среднего значения сокращается.

Для количественной оценки улучшения однородности профиля проведен расчет коэффициентов вариации для 15 сканов влажности (табл. 2). На рис. 13 показаны графики значений коэффициента вариации для 15 сканов влажности до и после устранения влияния технологического фактора.

В соответствии с этими результатами можно сделать следующие выводы:

устранение возмущающего воздействия позволит приблизительно в 2 раза снизить коэффициент вариации при установившемся режиме работы БДМ: с 8,4 до 4,9 % – уменьшение на 41 %;

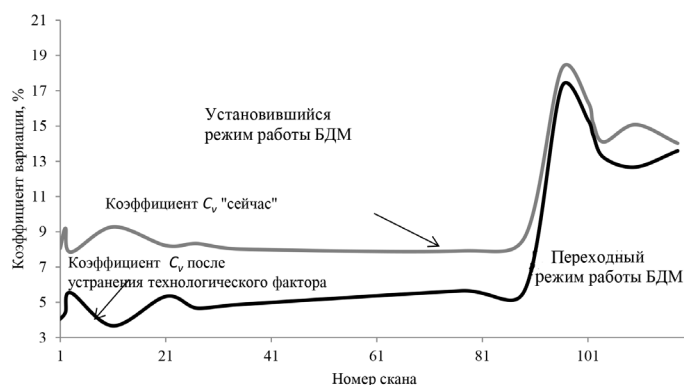


Рис. 13. Эффект улучшения однородности профиля влажности после устранения систематического возмущающего воздействия

Fig. 13. The effect of improving the uniformity of the moisture profile after eliminating the systematic disturbance

при переходном режиме работы БДМ снижение коэффициента вариации после устранения возмущающего воздействия будет незначительным: с 15,5 до 14,4 %, уменьшение на 7,0 %.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что автоматизированная система управления качеством бумаги при переходе на новый сорт продукции переходит на новый установившийся режим по поверхностной плотности через 17 с после начала процесса; по влажности – через 340 с. За это время вырабатывается приблизительно 0,5 т бракованной продукции. Большая инерционность канала управления влажностью объясняется физическими процессами, происходящими в сушильной части бумагоделательной машины. Доказано, что автоматизированная система управления влажностью бумаги поддерживает заданное регламентом значение регулируемого параметра в допустимых пределах при нормальном режиме работы бумагоделательной машины. Установлены однородности средних значений и дисперсий для массивов данных высокого и низкого разрешений сканера, что говорит об их одинаковой информативности. Выявлено наличие систематического возмущающего воздействия, которое не зависит от автоматизированной системы управления влажностью, а связано с технологическим оборудованием. Моделирование профиля влажности до и после устранения этого воздействия показало возможность улучшения однородности профиля влажности производимой на бумагоделательной машине БДМ-4 в АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат» бумаги на 41,2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бахтин А.В., Слюта М.О. Сравнительный анализ использования математической и нейронной модели в системе управления поперечным профилем бумажного полотна // Матрица научного познания. 2018. № 12. С. 22–24. Bakhtin A.V., Slyuta M.O. Comparative Analysis of Using Mathematical and Neural Models in Control System of Paper Web Transverse Profile. *Matritsa nauchnogo poznaniya*, 2018, no. 12, pp. 22–24.

2. Гринченко И.А., Пожитков В.В., Жукова Ю.С. Совершенствование систем управления процессом сушки бумаги // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2009. № 01. С. 80–81. Grinchenko I.A., Pozhitkov V.V., Zhukova Yu.S. Improvement of Paper Drying Control Systems. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2009, no. 01, pp. 80–81.
3. Жученко А.И., Черёпкин Е.С. Постановка задачи оптимального управления процессом прогрева бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины // Автоматизация технологических и бизнес-процесов. 2015. Vol. 7, iss. 1. С. 25–31. Zhuchenko A.I., Cheryopkin E.S. Problem Statement for Optimal Control of Paper Web Heating in the Drying Part of a Paper Machine. *Avtomatizatsiya tekhnologichnikh i biznes-protsesiv*, 2015, vol. 7, iss. 1, pp. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.21/2015.42859>
4. Лебедев И.В., Казаков Я.В. Моделирование структуры бумажного листа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 160–172. Lebedev I.V., Kazakov Ya.V. Paper Sheet Texture Simulation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 2, pp. 160–172. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.160>
5. Леонтьев В.Н., Ваганов В.В. Основы метода анализа динамических свойств систем автоматического регулирования. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. 225 с. Leont'yev V.N., Vaganov V.V. *Fundamentals of the Method for Analysis of Dynamic Properties of Automatic Control Systems*. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2017. 225 p.
6. Орлов А.И. Проверка статистической гипотезы однородности математических ожиданий двух независимых выборок: критерий Крамера-Уэлча вместо критерия Стьюдента // Науч. журн. КубГАУ. 2015. № 110(06). С. 197–218. Orlov A.I. Statistical Hypothesis Testing of Homogeneity of Mathematical Expectations of Two Independent Samples: Cramer-Welch Test Instead of *t*-Test. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2015, no. 110(06), pp. 197–218.
7. 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. Influence of Paper Cloth Mass Fluctuations on the Quality of Commercial Products. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 2(38), pp. 133–138. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-133-138>
8. Åkesson J., Ekvall J. *Parameter Optimization of a Paper Machine Model*. Paper Presented at Reglermöte. Stockholm, Lund University, 2006. 7 p.
9. Batchelor W.J., Wu Z., Johnston R.E. Measurement of z-Direction Moisture Transport and Shrinkage in the Drying of Paper. *Proceedings of 56 Appita Annual Conference*. Melbourne, Appita Inc., 2002, pp. 111–117.
10. Brinkmann D., Pound C. Sonoco Verifies CD Profile Control Using Advanced Statistical Analysis Method. *Pulp & Paper*, 2003, vol. 77, no. 5, p. 54.
11. 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. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4942251>
12. 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, no. 3, pp. 563–573 DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322013000300014>
13. Harrmann M., Schulz S. Convective Drying of Paper Calculated with a New Model of the Paper Structure. *Drying Technology*, 2007, vol. 8, iss. 4, pp. 667–703. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373939008959910>
14. Haslach Jr. H.W. The Moisture and Rate-Dependent Mechanical Properties of Paper: A Review. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2000, vol. 4, iss. 3, pp. 169–210. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009833415827>
15. Ikeda T. Appearance Quality Inspection System for Paper Making Industry. *JFE Technical Report*, 2016, no. 21, pp. 161–167.

16. Keränen J., Paaso J., Timofeev O., Kiiskinen H. Moisture and Temperature Measurement of Paper in the Thickness Direction. *Appita*, 2009, vol. 62, iss. 4, pp. 308–313.
17. Koedudom T., Yoiod P. Paper Moisture Content Determination from Microwave Reflection Measurement. *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. Phuket. 2017, pp. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISANP.2017.8228951>
18. Kong L., Liu H. A Static Energy Model of Conventional Paper Drying for Multicylinder Paper Machines. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, iss. 3, pp. 276–296. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.635253>
19. Kouko J., Retulainen E., Kekko P. Straining and Relaxation Properties of Wet Paper during Heating. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2014, vol. 18, iss. 4, pp. 697–719. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9246-4>
20. Lemeshko B.Y., Lemeshko S.B., Semenova M.A. On Application of k-Samples Homogeneity Tests. *Applied Methods of Statistical Analysis. Statistical Computation and Simulation, AMSA'2019: Proceedings of the International Workshop*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019, pp. 138–151.
21. Lindner M. Factors Affecting the Hygroexpansion of Paper. *Journal of Materials Science*, 2018, vol. 53, pp. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1358-1>
22. Lovikka V.A., Rautkari L., Maloney T.C. Changes in the Hygroscopic Behavior of Cellulose Due to Variations in Relative Humidity. *Cellulose*, 2018, vol. 25, pp. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1570-9>
23. Pakarinen P., Kiiskinen H., Kekko P., Paltakari J. Drying and Paper Quality. Ch. 7. *Papermaking Part 2, Drying*. Ed. by M. Karlsson. Helsinki, Paperi ja Puu Oy, 2010, pp. 236–295.
24. Sigifredo N., Guillemette M., Emmond G., Ball J. Canfor Achieves Better Moisture Control, Quality with New Loop Tuning Strategy. *Pulp & Paper*, 2003, vol. 77, no. 6, pp. 42–46.
25. Stenström S. Drying of Paper: A Review 2000–2018. *Drying Technology*, 2019, vol. 38, iss. 7, pp. 825–845. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1596949>
26. Yogi R.A., Parolia R.S., Karekar R.N., Aiyer R.C. Microwave Microstrip Ring Resonator as a Paper Moisture Sensor: Study with Different Grammage. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, iss. 10, pp. 1558–1562. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/10/308>