

Исследование зависимости показателей качества продукции от изменения технологических параметров

А. Б. Петроченков¹, Д. А. Даденков²
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
¹pab@msa.pstu.ru, ²dadenkov@msa.pstu.ru

Н. А. Черепанов
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
chna@msa.pstu.ru

Аннотация. Цель работы является определение оптимальных параметров для марок бумаги с помощью статистической модели прогнозирования показателей качества бумажного полотна в ходе технологического процесса. Рассматриваются современные статистические модели исследования данных для определения оптимальных параметров для производства бумажной продукции. В работе произведен анализ показателей качества бумаги в зависимости от отклонения технологических параметров в производственном процессе должен способствовать уменьшению бракованной продукции стадии производства с помощью оптимальных технологических параметров.

Ключевые слова: производственный процесс, показатели качества, технологические параметры, бумажное полотно, статистическая модель, регрессионный анализ

I. ВВЕДЕНИЕ

Производство бумаги является достаточно сложным технологическим процессом (ТП) на целлюлозно-бумажных комбинатах (ЦБК). Для получения той или иной продукции (целлюлозы, изделий из бумаги и картона) производство включает в себя соединение разных секций ТП. Анализ качества готовой продукции (бумаги) на предприятии производится в лабораторных условиях и уходит довольно много времени на определение категории качества (сорта) бумаги и при этом ее часть может отправляться на повторную переработку как бракованная продукция.

Из-за довольно протяженного и сложного производственного процесса на ЦБК может выявляться большое количество низкосортных или бракованных изделий. Поэтому в настоящее время актуальной является задача определения и анализа показателей качества непосредственно в ходе технологического процесса изготовления продукции для обеспечения оперативных мероприятий по коррекции качественных показателей.

Для решения обозначенных задач по анализу показателей качества бумаги, необходимо выделить основные этапы (секции) производства и основные технологические параметры, определить их возможные отклонения и выявить наиболее значимые параметры, непосредственно влияющие на качество выпускаемой продукции (бумаги).

Как уже отмечалось ранее, процесс производства бумаги достаточно распределен и обширен, поэтому его можно разделить на отдельные секции и общая технологическая схема производства включает в себя следующие этапы: процесс подготовки бумажной массы, проклейка бумажной массы, образование и использование оборотных вод, использование оборотного брака, напорные ящики, отлив и формование бумажного полотна, прессование бумажного полотна, сушка бумажного полотна, отделка и упаковка, промывка одежды машины.

Характерной особенностью процесса производства бумаги [1] является зависимость качества продукции как от управляемых факторов: расход и концентрация массы, скорость секций бумагоделательной машины (БДМ) [2], давление и температура пара в сушильных цилиндрах, расход крахмала для проклейки, так и неуправляемых факторов: качество макулатурного сырья, температура и влажность в цехе, текущий износ и натяжение сеточного полотна, возникновение обрывов бумажного полотна и т.д.

Таким образом, анализ показателей качества бумаги в зависимости от отклонения технологических параметров в производственном процессе должен позволить определить оптимальные параметры производства бумажного полотна и способствовать оптимизации процессов управления технологическими параметрами для уменьшения объема бракованной продукции на стадии производства.

II. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА БУМАГИ ДЛЯ ГОФРИРОВАНИЯ

A. Описание исследуемого технологического процесса

В процессе производства бумажного полотна обычно используют тип БДМ – плоскосеточный. В плоскосеточных машинах бумажные полотна формируются на движущейся горизонтальной сетке.

БДМ состоит из многочисленных частей, таких как: сеточная часть; прессовая часть; сушильная часть; отделочная часть; привода; машинный бассейн для аккумуляции бумажной массы; оборудование для рафинирования, подмола и очистки массы; насосы для подачи воды и массы; вакуумные насосы; устройства для переработки брака; бассейны оборотной воды; приточно-

вытяжная вентиляционная система; регулирующие и контрольно-измерительные приборы.

Повышение эффективности проектируемых систем и оборудования прежде всего связывают со снижением эксплуатационных расходов [3]. В этом разрезе на рис. 1 изображена общая схема ТП, которая включает в себя шесть участков: Участок 1 «Процесс массоподготовки»; Участок 2 «Отлив и формование бумажного полотна»; Участок 3 «Прессование бумажного полотна»; Участок 4 «Режим сушки бумажного полотна»; Участок 5 «Проклейка бумажной массы»; Участок 6 «Досушивание и намотка».

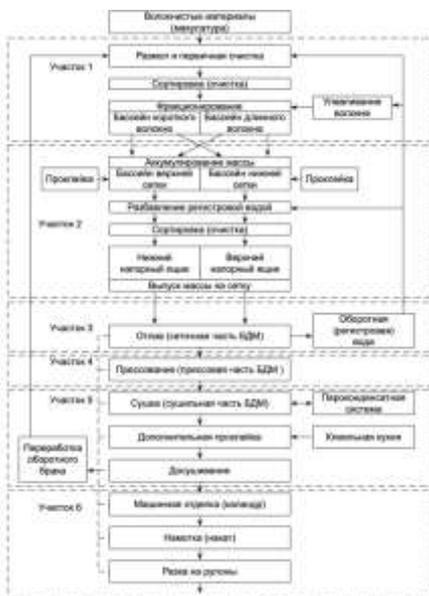


Рис. 1. Общая схема процесса производства бумаги

В. Характеристика производства бумаги для гофрирования

В зависимости от показателей качества бумажного полотна изготавливаются следующие марки: Б-0, Б-1, Б-2, Б-3, клееные (К) и неклееные (НК). Бумажное полотно изготавливается в соответствии с требованиями ГОСТ [4–6] и технологического регламента.

Бумажное полотно требует исполнения цвета натурального волокна. При изготовлении бумажного полотна необходимо следить за тем, чтобы не возникло складок, морщин, задигов, продушин, разрывов и других механических повреждений, а также частицы угля и песка. В бумаге допускаются перечисленные внутрирулонные дефекты по ГОСТ 13525.5 [7], которые невозможно обнаружить в процессе производства полотна при условии, что количество дефектов не превышает 2 %.

Бумага переводится во второй сорт при наличии следующих отклонений от норм: снижение или увеличение влажности на 1 %; снижение сопротивления плоскостному сжатию и сопротивления торцовому сжатию не более чем на 10 % для бумаги марки массой 1 м² 140г, 160г, 180г, 190г; снижение поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании до 15г; изменение колебания

массы 1м² бумаги по ширине рулона – до 10 % от среднего значения для всех марок.

Бумага производится в рулонах. Габаритные размеры бумажного полотна, указанные в таблице 1, устанавливаются в соответствии с техническим заданием заказчика.

ТАБЛИЦА I РАЗМЕРЫ РУЛОНОВ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

Размер	Значения	
	Номинальное значение	Допускаемое отклонение
Ширина рулона, мм	от 1050 до 2300	±5
Наружный диаметр рулона, мм	от 800 до 1500	±20
Внутренний диаметр гильз, мм	от 75 до 100	не нормируется

Рулоны бумаги для гофрирования должны иметь плотную намотку. Торцы рулонов должны быть ровными.

Число обрывов не должно превышать двух обрывов. Концы полотна рулона в местах обрыва по всей ширине должны быть склеены клеевой лентой на бумажной основе по ГОСТ 18251 [8]. Места склейки не должны вызывать склеивания соседних слоёв. Ширина склейки – не менее 50 мм. Места обрывов или склейки – отмечены видимыми с торца рулона цветными сигналами.

Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение бумаги – по ГОСТ 7691 [9]. Упаковкой рулона являются шесть верхних слоев бумаги, и обтянутые полипропиленовой лентой на расстоянии 15–35 мм от краёв. При транспортировании и хранении рулоны бумаги устанавливаются на торец или в горизонтальном положении.

III. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

А. Обработка первоначальных данных

Для исследования были получены данные со сканера SCADA с предприятия. Идея состоит в том, что данные могут быть полностью определены только в контексте решаемой задачи. Данные могут иметь разные (в зависимости от задачи, стоящей перед конкретной системой) представления [10]. Данные в себя включают 24 параметра, такие как:

- дата (число.месяц.год);
- время (час:минута:секунда);
- вес 1 м²(г);
- влажность (%);
- скорость БДМ (м/мин);
- сухой вес 1 м²(г);
- суммарный напор верхнего напорного ящика (м);
- суммарный напор нижнего напорного ящика (м);

- расход массы нижней сетки (м3/ч);
- расход массы верхней сетки (м3/ч);
- концентрация нижней сетки (%);
- концентрация верхней сетки (%);
- концентрация короткого волокна (%);
- концентрация длинного волокна (%);
- концентрация фракционатора (%);
- давление насоса верхней сетки (Бар);
- давление насоса нижней сетки (Бар);
- давление пара БДМ (Бар);
- давление пара 1-3 цилиндров (Бар);
- давление пара 21-32 цилиндров (Бар);
- давление пара 4-8 цилиндров (Бар);
- давление пара 9-20 цилиндров (Бар);
- давление пара верхняя группа прессовой части (Бар);
- давление пара нижняя группа прессовой части (Бар).

Первоначально данные были получены в количестве 127409 наблюдений в формате *.xlsx*. Далее подготавливались данные для исследования, необходимо найти некорректные значения, которые мешают реализовать необходимую точность модели, затем провести очистку.

При удалении нулевых значений, была выявлена следующая проблема, при аварийных остановках и очередных запусках были выявлены «выбросы», которые были удалены с помощью алгоритма написанного в RStudio [11–13]. В итоге получилось 89108 наблюдений в формате *.CSV*.

В. Модель, основанная на построении дерева регрессии

За основу обучающей выборки было взяты первые десять тысяч значений. Для исследования были выбраны параметры выбраны с участков «Отлив и формование бумажного полотна» и «Прессование бумажного полотна», а именно:

- сухой вес;
- скорость БДМ;
- суммарный напор верхнего напорного ящика (ВНЯ);
- суммарный напор нижнего напорного ящика (ННЯ);
- расход массы нижней сетки (НС);
- расход массы верхней сетки (ВС);

- концентрация нижней сетки (НС);
- концентрация верхней сетки (ВС).

Изначально построим корреляционную матрицу предикторов для, чтобы сделать предварительные выводы (рис. 2).

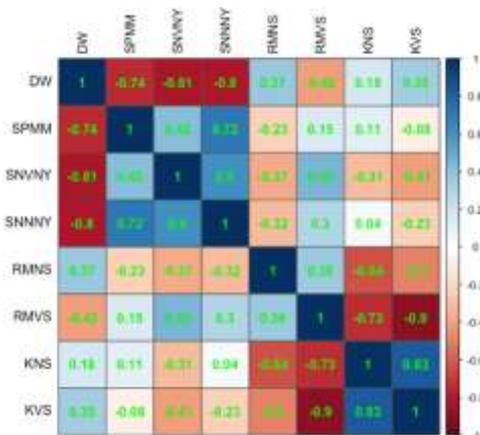


Рис. 2. Корреляционная матрица производственных параметров при отливе бумаги для гофрирования

На основе рис. 2 существует умеренная взаимосвязь между предикторами, но взаимосвязь целевого параметра «Сухой вес» и остальными параметрами при десяти тысячах значений наблюдаются сильная, слабая и крайне слабая корреляционная связь.

Затем строим модель, в котором участвует полный набор переменны с помощью встроенных функций в R (рис. 3).

```
Call:
lm(formula = DW ~ ., data = sl[, 1:8])

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-13.4244  -1.0508  -0.3523   1.8291   9.5533

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.369e+02  3.731e+00  36.688 < 2e-16 ***
SPMM         1.930e-01  2.127e-03  90.770 < 2e-16 ***
SNVNY       -0.885e+00  3.025e-01 -30.827 < 2e-16 ***
SNNNY       -7.340e+00  1.438e-01 -59.344 < 2e-16 ***
RMNS        1.881e-02  2.812e-04  53.742 < 2e-16 ***
RMVS        -4.190e-03  8.904e-04 -4.705 2.57e-06 ***
KNS         7.772e+01  6.773e-01  44.196 < 2e-16 ***
KVS         5.588e-01  3.224e-01  1.733  0.8831 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.651 on 9992 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9064,    Adjusted R-squared:  0.9063
F-statistic: 1.382e+04 on 7 and 9992 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Рис. 3. Построение модели с полным набором переменных относительного целевого параметра

При заметной адекватности модели в целом по F-критерию, все параметры оцениваются как статистически значимые, кроме Концентрации ВС (KVS). Далее проверяем значимость параметров, которые попадают в значение $p_value < 0,01$, поэтому если обратить внимание, то все предикторы значимы и их значение $p_value < 2,2e-16$, как указывалось выше Концентрации ВС (KVS) не является значимым [13].

При большом количестве значимых предикторов необходимо найти «слабые» параметры и исключить их с помощью встроенной функции в R (рис. 4)

```
Call:
lm(formula = DW ~ SPM + SMNY + SMNY + RMNS + KNS, data = a1[,
1:k])

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-13.398  -1.654  -0.359   1.837   9.560

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.395e+02  3.424e+00  40.75 < 2e-16 ***
          SPM   -1.927e-01  2.118e-03  -90.99 < 2e-16 ***
          SMNY  -9.133e+00  3.053e-03  -30.31 < 2e-16 ***
          SMNY  -7.156e+00  1.468e-03  -50.61 < 2e-16 ***
          RMNS  1.875e-02  1.975e-04  94.89 < 2e-16 ***
          KNS  -5.262e-03  4.482e-04  -11.74 < 2e-16 ***
          KNS   2.886e+01  5.919e-02  47.45 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.851 on 9993 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9963,    Adjusted R-squared:  0.9963
F-statistic: 1.611e+04 on 4 and 9993 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Рис. 4. Поиск слабых предикторов

При использовании функции step количество параметров не уменьшилось. По критерию Стьюдента отбираем два параметра Расход массы (RMNS) и Концентрация (KNS), где необходимое условие $t > 2$. Далее строим дерево регрессии (рис. 5).

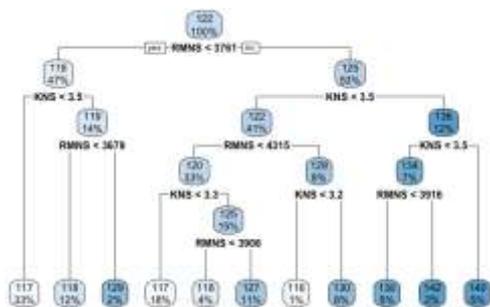


Рис. 5. Построение дерева регрессии относительно целевого параметра

На рис. 5 построено 11 узлов и далее отображен процент данных, приходящихся на этот узел, и средняя среднее значения для каждого параметра в этой ветви.

Далее проводится перекрестная проверка для того, чтобы определить существует ли ошибка в выборе количества узлов (рис. 6).

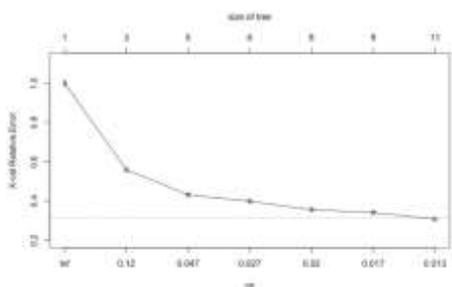


Рис. 6. Построение дерева регрессии относительно целевого параметра

На рис. 6 видно, что после 11 терминальных узлов будет происходить уменьшение отдачи, при уменьшении ошибок по мере того, как дерево растет глубже, а значит возможно значительно сократить дерево регрессии и получить минимальную ожидаемую ошибку (рис. 7). В данном исследовании с построением дерева регрессии

построено 10 узлов, что позволило получить минимальную ошибку.

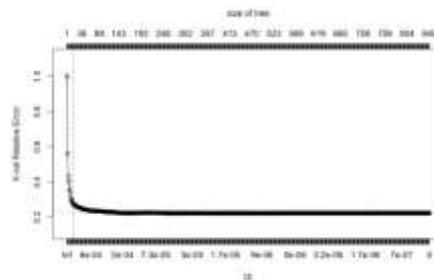


Рис. 7. Автоматическая настройка с оптимальным поддеревом и перекрестной проверкой ошибки 0,272

При использовании деревьев регрессии были определены оптимальные значения для Концентрации НС и Расхода массы НС при производстве бумажного полотна, что повлияет на уменьшение количества брака.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При построении дерева регрессии, были определены оптимальные (усредненные) значения для «Концентрации НС» и «Расхода массы НС» при производстве бумажного полотна для гофрирования. Данные параметры могут «плавать» при поломке оборудования, что повлечет за собой большое количество бракованной продукции, а также поможет сигнализировать для диспетчеров необходимость проверки и настройки оборудования. Выделены оптимальные параметры для получения качественной продукции выраженные в процентном соотношении за которые нежелательно выходить и отрегулированы под данное производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Иванов С.Н. Технология бумаги: учебное пособие / С.Н. Иванов. 3-е изд. М.: Шк.бумаги, 2006. 695 с.
- [2] Куров В.С., Кокушин Н.Н. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли. Бумаго- и картоноделательные машины: уч. пособие / В.С. Куров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 588 с.
- [3] Bochkarev S.V., Ovsyannikov M.V., Petrochenkov A.B., Bukhanov S.A. Structural synthesis of complex electrotechnical equipment on the basis of the constraint satisfaction method. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol.86, no. 6, pp. 362-366
- [4] ГОСТ 7377-85 Бумага для гофрирования. Технические условия.
- [5] ТУ 5441-005-10578065-2007 Бумага для гофрирования. Технические условия.
- [6] ТУ 5471-091-72197712-2007 Бумага для гофрирования товарная.
- [7] ГОСТ 13525.5 Метод определения внутрирулонных дефектов.
- [8] ГОСТ 18251 Лента клеевая на бумажной основе. Технические условия.
- [9] ГОСТ 7691 Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение.
- [10] Petrochenkov A.B., Khudorozhkova M.A., Lyakhomskii A.V. Technological docflow for vendors of energy and automated products: Information system and study case. Proceedings of 2017 IEEE 6th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), SPUE 2017, vol. 2018-January, pp.44-47. DOI: 10.1109/IVForum.2017.8246046.
- [11] <http://www.r-project.org>
- [12] <https://www.rstudio.com>
- [13] Krasnykh K.N., Petrochenkov A.B., Krause B. Developing the logical framework of the scoring process. 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 2016, pp.466-469.