ISSN 2079-8199

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК
Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна

Серия 1

Естественные и технические науки

№ 1/2021

УДК 676.011

DOI 10.46418/2079-8199_2021_1_16

В. И. Сидельников, И. В. Ремизова, А. В. Кокшаров

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологии и дизайна
191186 РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18

ПРИБЛИЖЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРОЧНОСТИ БУМАГИ НА ПРИМЕРЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОРЦЕВОМУ СЖАТИЮ

© В. И. Сидельников, И. В. Ремизова, А. В. Кокшаров, 2021

Статья посвящена разработке математической модели сопротивления торцевому сжатию, позволяющей оценить влияние отдельных параметров технологического процесса на физико-механические показатели вырабатываемой продукции. Разработанная, на основании экспериментальных данных математическая модель сопротивления торцевому сжатию (ССТ) флютинга отражает зависимость ССТ от значения массы 1 м^2, влажности, композиции и степени помола отдельных компонентов.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, математическая модель, качественные показатели, флютинг.

Математическое моделирование процессов производства бумаги и картона на бумагоделательной машине является важным инструментом, позволяющим проводить анализ работы оборудования и технологических процессов на любом участке производства, а также оценить влияние изменения режимов работы на качество выпускаемой продукции. Оценка и корректировка показателей качества выпускаемой продукции является следствием качества работы производственного технологического процесса и осуществляется по параметрическим показателям свойств самого процесса.

При этом следует отметить, что качественные показатели зависят от множества контролируемых и неконтролируемых параметров, что не позволяет оптимизировать процесс путем изменения (перебора) каждого из них [1]. В связи с этим предлагается подход, когда на основе эксплуатации выявляются основные закономерности исследуемого процесса и для установившегося режима при выработке определенной марки и сорта продукции создается имитационная модель, на основании которой обеспечивается настройка режима работы машин.

Ассортимент выпускаемых бумаг на производстве многообразен и основывается на атласе спецификаций, где описываются требования к основным прочностным показателям качества производимой продукции. Рассмотрим этапы получения эвристической математической модели, позволяющей оценить влияние отдельных параметров технологического процесса на физико-механические показатели вырабатываемой продукции. С учетом анализа востребованности бумажной продукции при производстве тары основным продуктом, объектом для моделирования, выбран флютинг — бумага для гофрирования, предназначенная для изготовления гофрированного слоя гофрокартона. Согласно альбому спецификаций обязательны отражающие основные физико-механические показатели на примере флютинга — бумаги для гофрирования, предназначенной для изготовления гофрированного слоя гофрокартона с учетом большой востребованности этого продукта при производстве тары. Согласно альбому спецификаций обязательные характеристики, которым должен соответствовать в первую очередь гофрокартон, — это показатели сопротивления торцевого сжатия (ССТ), сопротивления плоскостного сжатия (СМТ), сопротивления сжатию (SCT), разрушающего усилия (RCT), так как гофрокартон испытывает значительные динамические и статистические нагрузки при перевозке товаров [2].

Для примера приводится последовательность разработки математической модели для одного из показателей механической прочности флютинга — ССТ (сопротивление торцевому сжатию гофрированного образца — ГОСТ 28686). Экспериментальные данные для разработки математической модели получены непосредственно на производстве, что обеспечивает привязку разрабатываемой модели к конкретной бумагоделательной машине (БДМ). В ходе технологического процесса производства получена репрезентативная выборка измерений по каждому из контролируемых показателей. Анализ данных позволил выявить степень их влияния на механические показатели.

По результатам обработки экспериментальных данных при заданной влажности (в данном случае 8.5 %) выводится соотношение массы 1 кв. метра и гарантированных значений ССТ. Гарантированные значения представляют собой характеристики промышленного продукта, выполнение которых обязательно при производстве продукции. Зависимость гарантированных значений ССТ от массы метра квадратного приведена на рис. 1.

Для использования математической модели на реальном производстве в ней должны быть учтено влияние на конечный показатель качественных свойств бумаги. Исходя из этого, при расчете показателя сопротивления торцевого сжатия появляется поправочный коэффициент $K_П$.

Показатель сопротивления торцевого сжатия (Y_{CCT}) как зависимость от массы м^2 представлен следующей формулой:

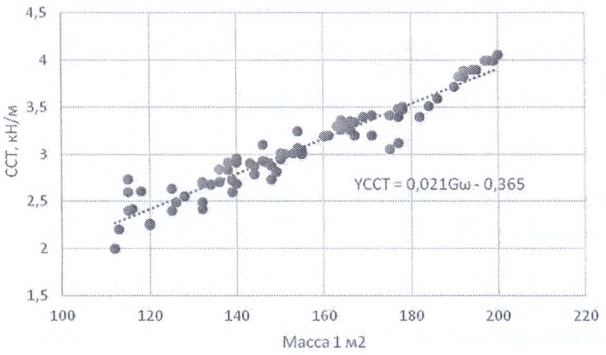

Рис. 1. Зависимость показателя ССТ от массы м²

$$Y_{CCT} = (G_{\omega} * 0,021 - 0,365) \cdot K_{П},$$

где G_{ω} — масса 1 м² при заданной влажности, $K_{П}$ — поправочный коэффициент, учитывающий влияние основных факторов на модель показателя ССТ.

Значения массы 1 м², использованные для получения математической модели, приведены по результатам эксперимента с определенной заданной влажностью — 8.5%. При расчете необходимо учесть влияние изменений влажности на показатели ССТ. Опыты показали, что при увеличении влажности прочностные характеристики целлюлозы ухудшаются. Учет влияния влажности осуществляется согласно условию постоянства количества абсолютно сухого вещества при изменении влажности. Тогда коэффициент влияния влажности K_{ω}. на показатель сжатия будет рассчитываться по следующей формуле:

$$K_{\omega} = \frac{(100 - \omega)}{(100 - 8,5)},$$

где ω — текущая влажность, %.

Физико-механические и прочностные свойства бумаги зависят от взаимодействия между волокнами. Взаимодействие определяется композицией по волокну, размолом, содержанием наполнителя и т. д. В связи с тем, что в процессе производства флютинга на БДМ происходит смешение нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы (НСПЦ) и сульфатной целлюлозы (САЦ), проводилось исследование влияния композиции бумаги на показатели прочности (и в частности ССТ). Анализ лабораторных данных показал, что значения бумагообразующих кривых показателей механической прочности по исследуемым маркам бумаги при изменении композиционного состава изменяются пропорционально содержанию САЦ и НСПЦ в данной марке.

Учет влияния степени помола указывает, что для сульфатной целлюлозы происходит значительное возрастание прочностных показателей при увеличении степени помола от 12–14° ШР до 20–22 °ШР, после чего показатели прочности практически не изменяются. Те же исследования для нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы показали, что увеличение физико-механических показателей от степени помола наблюдается при увеличении степени помола до 30–35 °ШР, после чего показатели прочности практически не изменяются при увеличении степени помола. Зависимости прочностных показателей от жесткости САЦ и НСПЦ в рабочем диапазоне, получаемом на производстве целлюлозы, не наблюдалось.

Выше описанные результаты исследований учитываются в поправочном коэффициенте $K_{\%хл}$.

$$K_{\%хл} = K_{спх} * \%_{х} + K_{спл} * \%_{л},$$

где $K_{\%хл}$ — коэффициент процентного содержания хвойной сульфатной целлюлозы и лиственной нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы при составлении композиции бумажной массы; $K_{спх}$ — коэффициент, учитывающий степень помола сульфатной целлюлозы хвойных пород (САЦ); $\%_{х}$ — процент содержания САЦ в композиции бумаги; $K_{спл}$ — коэффициент, учитывающий степень помола нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы лиственных пород (НСПЦ); $\%_{л}$ — процент содержания НСПЦ в композиции бумаги.

В результате проведенных в рамках производства экспериментов были получены зависимости сопротивления торцевого сжатия от степени помола САЦ и НСПЦ. Для повышения точности расчета и получения поправочных коэффициентов влияния степени помола на конечный показатель была проведена операция нормировки [3]. Результаты выразились в следующих зависимостях, рис. 2–3.

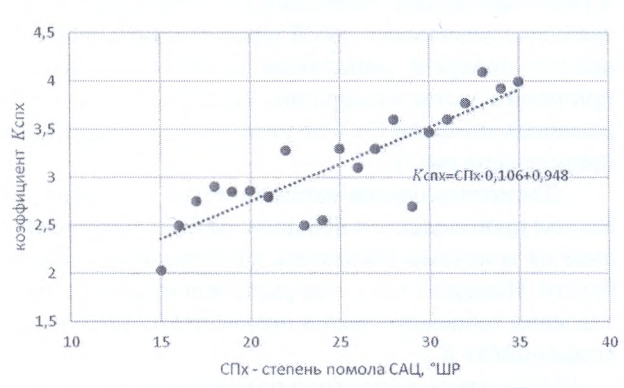

Рис. 2. Зависимость коэффициента поправки по помолу САЦ для ССТ

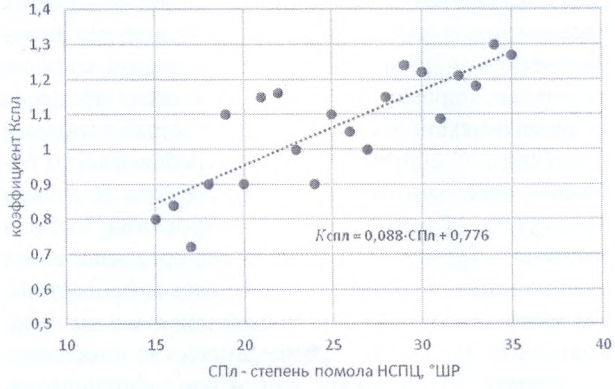

Рис. 3. Зависимость коэффициента поправки по помолу НСПЦ для ССТ

Линейные зависимости поправочных коэффициентов по влиянию на сопротивление торцевого сжатия степеней помола лиственной и хвойной целлюлозы представлены:

$$K_{спх} = СП_х \cdot 0{,}106 + 0{,}948,$$

$$K_{спл} = СП_л \cdot 0{,}088 - 0{,}776,$$

где $СП_х$ — степень помола САЦ,°ШР; $СП_л$ — степень помола НСПЦ,°ШР.

Также на прочность бумаги влияют факторы, действующие в полуфабрикатных цехах, например, продолжительность варки целлюлозы, состав варочной кислоты, температура варки, технологический режим размола и т. п. Зависимость прочностных показателей флютинга от прочностных показателей полуфабрикатов, поступающих с варки НСПЦ и САЦ, прямо пропорциональна. Она может быть отражена в поправочных коэффициентах $K_{вар_х}$ и $K_{вар_л}$, показывающих отношение текущего показателя сопротивления торцевого сжатия, выходящего после варки к усредненному показателю для заданных условий.

Таким образом, при расчете поправочного коэффициента $K_П$ учитывалось влияние основных факторов на показатель ССТ — влажности бумажного полотна, композиционного состава, степени помола составляющих флютинга, данных по прочности хвойной и лиственной целлюлозы после варки:

$$K_П = K_ω \cdot K_{\%хл} \cdot K_{вар_х} \cdot K_{вар_л}$$

Собрав воедино все зависимости и коэффициенты, получили результирующую математическую модель, в которой отражены все основные показатели, влияющие на выходной показатель сопротивления торцевого сжатия ($Y_{ССТ}$.)

$$Y_{ССТ} = \left(G_ω * 0{,}021 - 0{,}365\right) \cdot \frac{(100 - ω)}{(100 - 8{,}5)} *$$

$$* \left(\left(СП_х \cdot 0{,}106 + 0{,}948 \right) \cdot \%_х + \right.$$

$$\left. + \left(СП_л \cdot 0{,}088 - 0{,}776 \right) \cdot \%_л \right) \cdot K_{вар_х} \cdot K_{вар_л}$$

где $G_ω$ — масса 1 м²; ω — текущая влажность, %; $СП_х$ — степень помола САЦ,°ШР; $\%_х$ — процент содержания САЦ в композиции бумаги; $СП_л$ — степень помола НСПЦ,°ШР; $\%_л$ — процент содержания НСПЦ в композиции бумаги; $K_{вар_х}$ — коэффициент влияния ССТ САЦ после варки; $K_{вар_л}$ — коэффициент влияния ССТ НСПЦ после варки.

На основании полученной математической модели разработан алгоритм моделирования учета влияния показателя режимов работы БДМ на показатели сопротивления торцевого сжатия.

По мере получения дополнительных экспериментальных данных по колебаниям массы 1 м², влажности, степеням помола САЦ и НСПЦ численные значения коэффициентов в модели будут корректироваться согласно изменениям технологических режимов работы БДМ.

Качество полученной математической модели оценивалось сравнением значений сопротивления торцевому сжатию, полученных в результате эксперимента и расчета. Результаты обработки при достаточно большом числе повторений эксперимента показывают высокую степень адекватности полученной модели.

Согласно рассмотренным выше правилам анализа и учета влияния основных параметров технологического процесса на основные прочностные показатели качества производимой продукции разработаны подобные модели для таких параметров, как сопротивления плоскостного сжатия, сопротивления сжатию, разрушающего усилия.

Модели для остальных показателей прочности флютинга строятся аналогичным образом. Для более сложных образцов продукции — с наполнителем, многослойной — вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие количество наполнителя и влияние каждого слоя на прочностные показатели конечной продукции.

Разработанные математические модели позволят моделировать процессы, происходящие на реально действующей машине, оценить влияние технологических режимов на показатели качества продукции, а также решать оптимизационные задачи по режиму работы БДМ.

Также возможно использование данной системы как обучающей программы для технологического персонала и разработки тренажера для операторов, управляющих технологическими процессами производства бумаги и картона. Обучающая программа позволит при заданных исходных показателях технологического процесса рассчитать физико-механические показатели продукции и подсказывать, что нужно делать при несоответствии этих показателей требуемым нормам каких-либо показателей (например, увеличить помол целлюлозы, добавить САЦ, уменьшить влажность). В этом случае модель работает следующим образом. Оператор задает значения композиционного состава флютинга, массы метра квадратного, влажности, степени помолов САЦ и НСПЦ. На выходе модель прогнозирует показатель ССТ, что позволяет оператору наглядно оценить влияние отдельных параметров на результирующие показатели.

Модели для остальных показателей прочности флютинга строятся аналогичным образом. Для более сложных образцов продукции — с наполнителем, многослойной — вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие количество наполнителя и влияние каждого слоя на прочностные показатели конечной продукции.

Выводы: Разработана математическая модель зависимости показателя сопротивления торцевого сжатия от основных параметров, влияющих на показатель. Учтено влияние массы метра квадратного, влажности бумажного полотна, композиции бумажной массы, степени помола составляющих, показателей сопротивления продавливанию после варки. Все это позволяет решать задачи оптимизации работы БДМ, а также использовать при создании визуального имитационного тренажера для отработки навыков и повышения эффективности работы операторов БДМ в нормальных и аварийных режимах работы бумагоделательного оборудования.

Список литературы

1. *Петроченков А. Б., Даденков Д. А.* Построение математической модели технологического процесса производства картона методом планирования эксперимента. // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017.
2. *Мочалова Е. Н., Галиханов М. Ф.* Проектирование тары и упаковки из гофрированного картона: учеб. пособие. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2014. 156 с. ISBN 978-5-7882-1642-3.
3. *Пен Р. З.* Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства: учеб. пособие. Красноярск: КГУ, 1982. 192 с.

V. I. Sidelnikov, I. V. Remizova, A. V. Koksharov

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design
191186 Russia, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 18

APPROXIMATE MATHEMATICAL MODEL OF PAPER STRENGTH INDICATORS ON THE EXAMPLE OF END COMPRESSION RESISTANCE

The article is devoted to the development of a mathematical model for assessing the influence of individual parameters of the technological process on the physicomechanical parameters of the produced products. Based on the experimental data, a mathematical model of the mechanical compression resistance (CCT) of fluting has been developed depending on the value of 1m2 mass, humidity, composition and the degree of grinding of individual components.

Keywords: paper machine, mathematical model, quality indicators, fluting.

References

1. Petrochenkov A. B., Dadenkov D. A. Construction of a mathematical model of the technological process of cardboard production by the method of experiment planning. // Scientific and technical statements of SPbPU. Natural and engineering sciences. 2017 (in Rus.).
2. Mochalova E. N., Galikhanov M. F. Design of containers and packaging from corrugated cardboard: textbook. allowance. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2014.156 p. ISBN 978-5-7882-1642-3 (in Rus.).
3. Pen R. Z. Statistical methods of modeling and optimization of processes of pulp and paper production: textbook. allowance. Krasnoyarsk: KSU Publishing House, 1982.192 p. (in Rus.).