

УДК 676.022.4

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНОВ ШЕФФЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
КОМПОНЕНТНЫХ СОСТАВОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МАССЫ И БУМАГИ НА ЕЕ ОСНОВЕ

APPLICATION OF SCHEFFE'S PLANS FOR OPTIMIZATION OF COMPONENT
OF COMPOSITIONS IN THE PRODUCTION OF THERMOMECHANICAL
MASS AND PAPER ON ITS BASIS

Е. В. Дубоделова,

доцент кафедры физико-химических методов сертификации продукции УО «Белорусский государственный технологический университет», канд. техн. наук, г. Минск, Республика Беларусь

Н. А. Герман,

ассистент кафедры химической переработки древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», канд. техн. наук, г. Минск, Республика Беларусь

С. И. Шпак,

доцент кафедры химической переработки древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», канд. техн. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

Т. В. Соловьева,

профессор кафедры химической переработки древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», д-р техн. наук, профессор, г. Минск, Республика Беларусь

E. Dubodelova,

Associate Professor of the Department of Physical and Chemical Methods of Products Certification of the Belarusian State Technological University, PhD in Engineering, Minsk, Republic of Belarus

N. Herman,

Assistant lecturer of the Department of Chemical Processing of Wood of the Belarusian State Technological University, PhD in Engineering, Minsk, Republic of Belarus

S. Shpak,

Associate Professor of the Department of Chemical Processing of Wood of the Belarusian State Technological University, PhD in Engineering, Associate Professor, Minsk, Republic of Belarus

T. Solov'yeva,

Professor of the Department of Chemical Processing of Wood of the Belarusian State Technological University, DSc in Engineering, Professor, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 18.03.2020 г.

В статье приводятся результаты исследований по оптимизации компонентного состава на примере получения ТММ и газетной бумаги из нее с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе, включающих графическую визуализацию результатов.

The article presents the results of research on the optimization of component composition by the example of obtaining TMM and newsprint from it using Scheffe's simplex-lattice plans, including graphical visualization of the results.

Ключевые слова: планы Шеффе, оптимизация, термомеханическая масса, газетная бумага.

Keywords: Scheffe's plans, optimization, thermomechanical mass, newsprint.

Введение.

Основу современного подхода к моделированию химических технологических производств составляет системный анализ, в соответствии с которым постановка цели и за-

дач исследования, анализа, расчета и оптимизации отдельных технологических процессов, решаются тесной связью друг с другом [1]. Эффективность функционирования

химико-технологических производств базируется на своевременной оценке и принятии решения по управлению производственным процессом. Этому значительно способствует исследования операций — научная дисциплина, основанная на изучении поведения системы за счет создания модели, воспроизводящей свойства оригинала. Любая модель при этом пригодна для прогнозирования поведения системы в определенных условиях, но только математический подход позволяет провести ее оптимизацию. Однако существенным недостатком математических моделей является их невысокая адекватность к реальному объекту, связанная с его переменной структурой [2].

В процессе компьютерного моделирования исследователь имеет дело с тремя объектами: системой (реальной, проектируемой, воображаемой), математической моделью и программой ЭВМ, реализующей алгоритм решения уравнений модели [3]. Поэтому в данной работе был учтен тот факт, что на стабильность производственного процесса определяющую роль оказывают исходные материалы и в мировой практике принято использовать статистические методы (ИСО 3534.1-3534.7). Стандарты указанной серии при этом рекомендуют организовать на предприятии систему производственного контроля, которая в классическом варианте включает входной операционный и приемочный контроль (ИСО 3534.2). Повышению эффективности системы производственного контроля способствует учет композиционных сочетаний, так как они оказывают существенное влияние на основные свойства конечной продукции, которая должна соответствовать требованиям системы технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. На производственных предприятиях имеются базы разнообразных рецептов (составов) на основе одних и тех же исходных материалов для получения конкретного вида (марки) продукции, но они не систематизированы, поэтому должны подлежать оценке. В связи с этим целесообразно

систематизировать эти данные путем математического моделирования, которое, по нашему мнению, может быть использовано в системе управления качеством производства.

Объектом исследований выбрана термомеханическая масса (ТММ), которая выпускается массово, и ее свойства значительно определяются породным составом композиции.

В статье приводятся результаты по исследованию влияния различных компонентных составов производства ТММ на комплекс свойств, определяющих ее качество, и качество получаемой из нее газетной бумаги с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе [3].

Постановка задачи.

Данная статья преследует следующие цели:

- показать эффективность моделирования композиционных составов с помощью симплекс-решетчатых планов Шеффе, включающих графическую визуализацию результатов;

- исследовать влияние композиционного состава трехкомпонентной системы, представленной такими древесными породами, как ель, осина и береза, на производство ТММ.

- сформулировать задачу оптимизации и определить оптимальный состав для получения ТММ и газетной бумаги из нее, которые должны соответствовать требованиям ГОСТ 10014-73 и ГОСТ 6445-74 соответственно.

Термомеханическая масса — волокнистый полуфабрикат, вырабатываемый, как правило, из древесины ели (*P. abies Karst*) [4, 5], которая позволяет выпускать востребованные на рынке виды бумаги для печати. Среди них целесообразно выделить газетную бумагу, которая является одним из самых массовых видов бумажной продукции. В настоящее время мировые объемы ее производства составляют более 70 % от всех видов бумаги для печати [1, 6]. Особенности воспроизводства ели и ее широкое использование

в деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной промышленности привело к возникновению дефицита этого древесного сырья, которое становится все более дорогостоящим.

Альтернативой ели является древесина лиственных пород, широко произрастающая в регионах, где организовано древесно-массное производство. Для Республики Беларусь это древесина осины и березы. Древесина этих пород имеет светлую окраску, сравнительно невысокие показатели плотности и твердости, ее волокнистая структура отличается однородностью и достаточной прочностью составляющих компонентов, содержание целлюлозы в ней лишь на 5–10 % меньше, чем у древесины ели [7]. Кроме того, использование древесины березы и осины в качестве сырья для получения ТММ может позволить, наряду со снижением ее себестоимости, улучшить печатные свойства газетной бумаги.

Известно [8], что древесина хвойных и лиственных пород существенно отличается по анатомическому строению и содержанию основных компонентов (целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз), что затрудняет ее совместную переработку в ТММ. Это определило необходимость проведения исследований по изучению влияния свойств ТММ и получаемой из нее газетной бумаги от композиционного состава по названным выше древесным породам с установлением их оптимального сочетания. Формулировка задачи оптимизации звучит следующим образом: определить такое соотношение древесины ели, осины и березы в композиции, при котором основные свойства ТММ и получаемой из нее газетной бумаги будут соответствовать требованиям ГОСТ 10014-73 и ГОСТ 6445-74 соответственно.

Исследование влияния содержания древесины осины и березы в композиции с древесиной ели на свойства ТММ проводили путем совместного размола по RTS-технологии (частота вращения диска ножевой мельницы — порядка 2000 мин⁻¹).

Составленные композиции щепы пропаривали при температуре 165 °С ± 2 °С, а расход сульфита натрия составил 1 % [9].

При решении задач оптимизации по определению композиционного состава трехкомпонентной системы хорошо зарекомендовали себя симплекс-решетчатые планы Шеффе, включающие графическую визуализацию результатов в виде диаграмм «состав — свойство», удобных для многофункционального анализа [10].

В соответствии с методикой, приведенной в [11], использовали симплекс-решетчатый план для трехкомпонентной системы 4-го порядка. Расположение экспериментальных точек в факторном пространстве представлено на рис. 1. Массовую долю ели в композиции ТММ обозначали через Z1, осины — Z2, березы — Z3. Изменение параметров Z1, Z2, Z3 при этом происходит от 0 до 100 %.

В рассматриваемом классе задач поверхности отклика довольно сложны, в связи с чем для их аппроксимации пользуются полиномами сравнительно высокой степени.

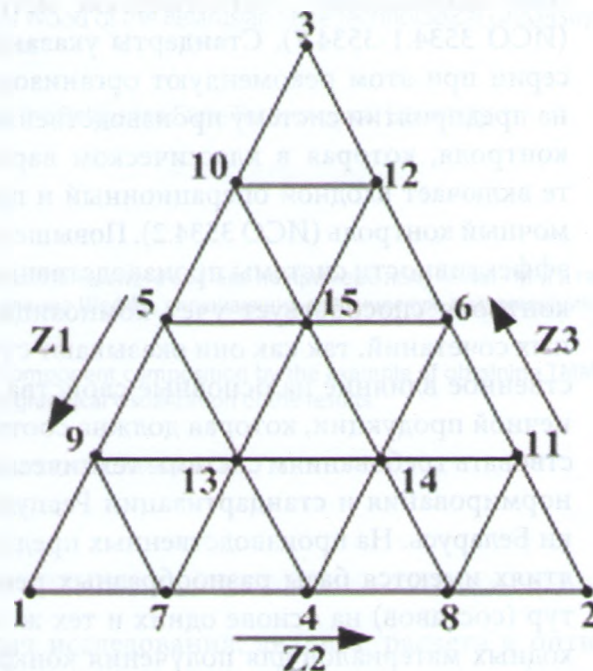


Рис. 1. Решетка трехкомпонентного симплекса четвертого порядка

В соответствии с планом эксперимента были определены композиции для изготовления опытных составов в каждой точке. Для них составлено адекватное математическое описание в виде уравнений регрессий с применением программы Microsoft Excel, коэффициенты которых характеризуют степень влияния каждой породы древесины и их попарного сочетания на комплекс свойств ТММ и изготовленной из нее бумаги. Далее с помощью пакета STATISTICA проведена визуализация результатов в виде диаграмм «состав — свойство» (рис. 2 и 3).

Комплексная оценка результатов визуализации, в том числе включающая выделение областей, обеспечивающих значения показателей качества ТММ и газетной бумаги требованиям ГОСТ 10014-73 и ГОСТ 6445-74 соответственно, представлена в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что доля древесины ели, осины и березы варьируется в широком диапазоне значений в каждой из выделенных областей. Следует отметить при этом сложный и противоречивый характер влияния каждой породы древесины на исследуемые показатели качества термомеханической массы

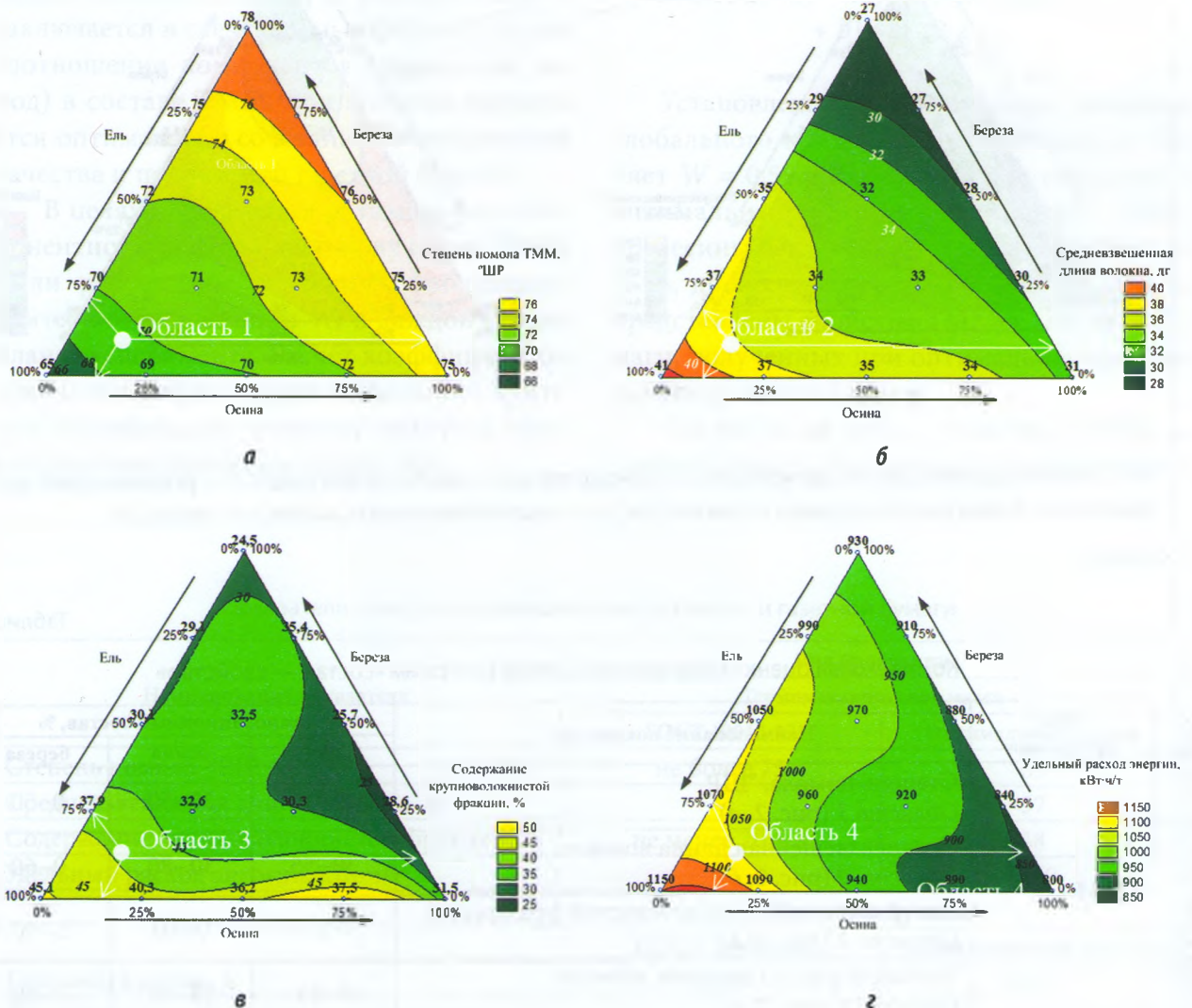


Рис. 2. Влияние компонентного состава исследуемых древесных пород на свойства ТММ: а — степень помола, °ШР; б — средневзвешенная длина волокна, дг; в — содержание крупноволокнистой фракции, %; г — удельный расход энергии, кВт·ч/т

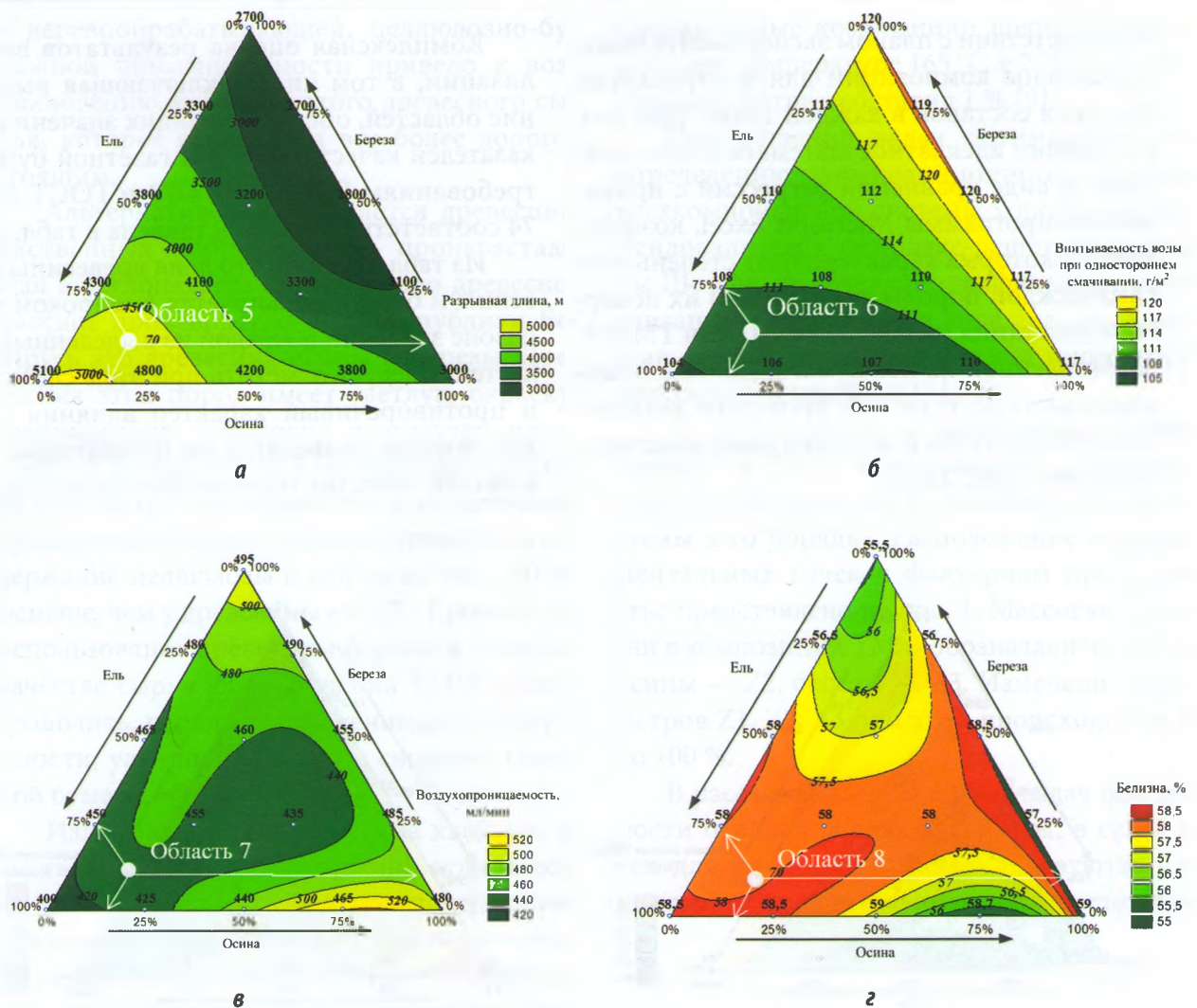


Рис. 3. Влияние компонентного состава исследуемых древесных пород на свойства газетной бумаги: а — разрывная длина, м; б — впитываемость воды при одностороннем смачивании, г/м²; в — воздухопроницаемость, мл/мин; г — белизна, %

Таблица 1

Комплексная оценка результатов анализа диаграмм «состав — свойство»

Вид продукции	Наименование показателя	Композиционный состав, %		
		ель	осина	береза
ТММ	Степень помола, °ШР Область 1 (рис. 2, а)	35–50	25–50	0–50
	Средневзвешенная длина волокна, дг Область 2 (рис. 2, б)	30–55	30–80	0–60
	Содержание крупноволокнистой фракции, % Область 3 (рис. 2, в)	0–70	0–40	5–90
	Удельный расход энергии, кВт·ч/т Область 4 (рис. 2, г)	0–40	55–95	0–60

Вид продукции	Наименование показателя	Композиционный состав, %		
		ель	осина	береза
Газетная бумага	Разрывная длина, м Область 5 (рис. 3, а)	60–98	0–40	0–20
	Впитываемость воды при одностороннем смачивании, г/м ² Область 6 (рис. 3, б)	20–98	0–80	0–25
	Воздухопроницаемость, мл/мин Область 7 (рис. 3, в)	5–95	0–65	0–60
	Белизна, % Область 8 (рис. 3, г)	5–95	0–70	0–75

и газетной бумаги соответственно. Это потребовало формулирования компромиссной задачи оптимизации. Суть решения задачи заключается в следующем: определить такое соотношение компонентов (древесных пород) в составе ТММ, при котором достигается оптимальное сочетание ее показателей качества и получаемой газетной бумаги.

В целях определения оптимального компонентного состава для получения ТММ были рассчитаны значения обобщенного критерия оптимизации W_i в каждой строке плана эксперимента. Расчет коэффициентов уравнения регрессии для глобального критерия оптимизации позволил получить соответствующее уравнение регрессии:

$$W = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + b_3 \cdot z_3 + b_4 \cdot z_1 \cdot z_2 + b_5 \cdot z_1 \cdot z_3 + b_6 \cdot z_2 \cdot z_3 + b_7 \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot (z_1 - z_2) + b_8 \cdot z_1 \cdot z_3 \cdot (z_1 - z_3) + b_9 \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot (z_2 - z_3) + b_{10} \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3.$$

Установлено, что максимальное значение глобального критерия оптимизации составляет $W = 0,59$. Расчет позволил определить оптимальный состав композиции ТММ: древесины ели — 75 %, древесины осины — 15 %, древесины березы — 10 %. В табл. 2 представлены свойства ТММ и газетной бумаги, полученных при оптимальном соотношении древесных пород.

Как видно из табл. 2, свойства и ТММ, и газетной бумаги, полученные из оптимальной

Таблица 2

Показатели качества термомеханической массы и газетной бумаги

Наименование показателя	Вид продукции	
	Термомеханическая масса	
	ГОСТ 10014-73	Оптимальный состав
Степень помола, °ШР	не более 75	69
Средневзвешенная длина волокна, дг	–	37
Содержание крупноволокнистой фракции, %	не менее 20 ± 3	38
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	–	1060
	Газетная бумага	
	ГОСТ 6445-74	Оптимальный состав
Разрывная длина, м	3100	4575
Впитываемость воды при одностороннем смачивании, г/м ²	–	106
Воздухопроницаемость, мл/мин	–	430
Белизна, %	не менее 60	58

композиции трех древесных пород, соответствуют требованиям ГОСТ 10014-73 и ГОСТ 6445-74 соответственно. Следует отметить при этом, что для ТММ степень помола снизилась на 8 %, а содержание крупноволокнистой фракции увеличилось в 1,9 раз — все это обеспечивает повышение бумагообразующих свойств ТММ в процессе формирования бумажного полотна. Подтверждением этого является повышение разрывной длины газетной бумаги в 1,47 раза. Значительный прирост прочности газетной бумаги обусловлен не только прочностью самих волокон, но и присутствием в лиственной древесине большего количества гемицеллюлоз, чем в хвойной древесине. По нашему мнению, определяющим факторами при этом являются не только количественный, но и качественный состав гемицеллюлоз. Это согласуется с мнением авторов работы [12] о том, что гексозаны менее эффективны, чем пентозаны (количество гемицеллюлоз по исследуемым породам представлены в табл. 3).

Из табл. 3 видно, что в лиственной древесине содержится в 4 раза больше пентозанов и в 3 раза меньше гексозанов, чем в древесине ели. Так как гемицеллюлозы лиственных пород древесины главным образом представлены пентозанами, то, следовательно, именно их количественное содержание благоприятно сказывается на показателях степени помола и разрывной длины (см. табл. 1). Присутствие гемицеллюлоз приводит к интенсификации процесса размола, то есть к увеличению степени помола, а соответственно, и повышению бумагообразующих свойств ТММ.

Полученные с помощью планов Шеффе результаты исследований подтверждают эффективность использования лиственной древесины в композиции ТММ и газетной бумаги с улучшением их свойств. В связи с этим можно высказать мнение, что применение лиственной древесины в производстве бумаги на основе ТММ — одно из направлений улучшения качества бумаги.

Заключение.

В статье приведены результаты исследований по оптимизации компонентного состава на примере получения ТММ и газетной бумаги из нее с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе.

Применение этих планов позволяет не только определить наилучший состав древесной композиции по исходному сырью, но и решить следующие производственные задачи, направленные:

- на прогнозирование свойств выпускаемой продукции в системе производственного контроля предприятия (входной, операционный и приемочный), то есть возможность производства конкретного вида (марки) продукции со снижением доли брака некондиции;
- оценку показателей качества и безопасности планируемой к выпуску новой продукции, в целях расширения ассортимента;
- управление технологическими параметрами на различных стадиях производственного процесса с учетом особенностей поведения исходного сырья и его неоднородности.

Это все позволяет рекомендовать применение симплекс-решетчатых планов

Таблица 3

Количественный состав гемицеллюлоз исследуемых пород древесины

Компонент древесины	Порода древесины		
	Ель (<i>P. abies Karst</i>)	Осина (<i>Populus tremulae L.</i>)	Береза (<i>B. verrucosa Ehrh.</i>)
Пентозаны	5,5	24,8	24,6
Гексозаны	9,3	2,2	3,2

Шеффе к широкому использованию на химико-технологических производствах.

Литература

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 1-2015. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона. — М.: Бюро НДТ, 2015. — 465 с. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://webportalsrv.gost.ru/portal/GostNews.nsf/acaf7051ec840948c22571290059c78f/4f7d066a72e2776d44257d2d00264aa1/\\$FILE/ITS_pondt_01.pdf](http://webportalsrv.gost.ru/portal/GostNews.nsf/acaf7051ec840948c22571290059c78f/4f7d066a72e2776d44257d2d00264aa1/$FILE/ITS_pondt_01.pdf). — Дата доступа: 03.02.2019.

2. Самарский, А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. — М.: Физматлит, 2005. — 320 с.

3. Колесников, В. Л. Оптимизация производства бумаги и картона на основе накопленной информации / В. Л. Колесников // Новейшие достижения в области инновационного развития целлюлозно-бумажной промышленности: технология, оборудование, химия. — Минск: БГТУ, 2017. — С. 5–16.

4. Дубоделова, Е. В. Термомеханическая масса из щепы с использованием в композиции древесины лиственных пород / Е. В. Дубоделова [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. — Минск: БГТУ, 2019. — № 2. — С. 74–80.

5. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. — 3-е изд. — М.: Школа бумаги, 2006. — 696 с.

6. Brouwer, P. H. Paper performance and the increased use of fillers and pigments / P. H. Brouwer // Paper Technology. — 2003. — Vol. 44, No. 9. — P. 27–40.

7. Леонтьев, Л. Л. Древесиноведение и лесное товароведение / Л. Л. Леонтьев. — М.: Лань, 2016. — 396 с.

8. Азаров, В. И. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник для вузов / В. И. Азаров, А. В. Буоров, А. В. Оболенская. — СПб.: Лань, 2010. — 624 с.

9. Письменский, П. И. Химически модифицированная механическая масса из щепы древесины различных пород / П. И. Письменский, Е. К. Тимофеева, Т. П. Шкирандо, Т. В. Соловьева // Труды БГТУ. Химия, технология орган. в-в и биотехнология. — Минск: БГТУ, 2014. — № 4. — С. 148–151.

10. Гартман, Т. Н. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов / Т. Н. Гартман, Д. В. Клушин. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. — 416 с.

11. Пен, Р. З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства / Р. З. Пен. — Красноярск: Красноярский гос. ун-т, 1982. — 192 с.

12. Шишонок, М. В. Высокомолекулярные соединения: учеб. пособие / М. В. Шишонок. — Минск: Выш. шк., 2012. — 535 с.

УДК 002.6

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ

THE MAIN DIRECTIONS FOR FURTHER IMPROVEMENT OF THE STATE SYSTEM OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS TO ENSURE THE INNOVATIVE ECONOMY

С. В. Макаревич,

аспирант экономического факультета кафедры инноватики и предпринимательской деятельности Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь

S. Makarevich,

Graduate Student of the Faculty of Economics, Department of Innovation and Entrepreneurship of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 18.03.2020 г.