

УДК 676.22.017

В. В. Горжанов, Н. А. Герман, И. В. Николайчик
Белорусский государственный технологический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БУМАГИ ДЛЯ ПЕЧАТИ

В статье представлены результаты исследований по изучению зависимостей между печатными свойствами бумаги и технологическими параметрами ее производства. Актуальность исследований заключается в оценке влияния изменения номенклатуры показателей качества бумаги, контролируемых непосредственно на производстве, на режимные параметры технологического процесса получения бумаги для печати.

С помощью методов математического моделирования с применением планов второго порядка Коно и Кифера исследовано влияние печатных свойств бумаги, таких как разрешающая способность, контрастность оттиска, на технологические параметры процессов наполнения, поверхностной проклейки в массе и проклейки с поверхности бумаги.

Реализация выбранных планов экспериментов, установленные адекватные математические модели, описывающие исследуемые технологические процессы, и решение компромиссных задач оптимизации показали, что максимальное значение обобщенного критерия оптимизации без учета печатных свойств $W_i = 0,93$, а с учетом влияния $W_i = 0,89$ достигалось при значении расхода гидрофобизирующего полимера в первом случае 5,01%, а во втором – 4,27%. Значения показателей качества бумаги, проклеенной с поверхности такой дисперсией, были следующие: разрушающее усилие при разрыве – 57,85 Н, гладкость – 58,33 с, впитываемость при одностороннем смачивании по Кобб₃₀ – 18,80 г/м², линейная деформация бумаги – 2,40%, разрешающая способность – 51 мкм, контрастность оттиска – 0,61%. Установлено, что включение печатных свойств бумаги незначительно влияет на процесс ее наполнения и в значительной мере оказывает влияние на процессы проклейки. Параметры процесса изготовления бумаги в последнем случае имеют прямую зависимость от номенклатуры показателей ее качества, что требует перенастройки технологического процесса в сторону улучшения печатных свойств. Такие виды бумаг для печати являются более конкурентоспособными и востребованными для полиграфических производств.

Ключевые слова: бумага, наполнение, проклейка в массе, поверхностная проклейка, печатные свойства, оптимизация.

Для цитирования: Горжанов В. В., Герман Н. А., Николайчик И. В. Использование методов математического моделирования для оптимизации параметров технологического процесса изготовления бумаги для печати // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 1 (289). С. 71–79.

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-289-9.

V. V. Gorzhanov, N. A. Herman, I. V. Nikolaichik
Belarusian State Technological University

USING MATHEMATICAL MODELING METHODS TO OPTIMIZING PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PRODUCING PRINTING PAPER

The article presents the results of studies on the relationships between the printing properties of paper and the technological parameters of its production. The relevance of the research lies in assessing the impact of changes in the nomenclature of paper quality indicators controlled directly in production on the operating parameters of the technological process of obtaining paper for printing.

Using the methods of mathematical modeling using the second-order plans of Kono and Kiefer, the influence of paper printing properties such as resolution, print contrast on the technological parameters of filling processes, surface sizing in the mass and sizing from the surface of the paper was studied.

The implementation of the selected experimental plans, the established adequate mathematical models describing the studied technological processes, and the solution of compromise optimization problems showed that the maximum value of the generalized optimization criterion without taking into account the printing properties $W_i = 0.93$, and taking into account the influence $W_i = 0.89$ was achieved at the consumption value of the hydrophobizing polymer in the first case of 5.01%, and in the second – 4.27%. The values of the quality indicators of paper sized from the surface with such a dispersion were as follows: breaking force

at break – 57.85 N, smoothness – 58.33 s, absorbency with one-sided wetting according to Cobb₃₀ – 18.80 g/m², linear deformation of paper – 2.40%, resolution – 51 μm, print contrast – 0.61%. It was found that the inclusion of the printing properties of paper insignificantly affects the process of its filling and significantly affects the sizing processes. The parameters of the paper manufacturing process in the latter case have a direct dependence on the nomenclature of its quality indicators, which requires reconfiguring the technological process towards improving printing properties. Such types of printing papers are more competitive and in demand for printing industries.

Keywords: paper, filling, gluing in bulk, surface gluing, printing properties, optimization.

For citation: Gorzhanov V. V., Herman N. A., Nikolaichik I. V. Using mathematical modeling methods to optimizing parameters of the technological process of producing printing paper. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 1 (289), pp. 71–79 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2025-289-9.

Введение. В настоящее время одним из самых крупных потребителей бумаги является полиграфическое производство. В связи с этим из всего выпускаемого в мире объема бумажной продукции около 30% составляют различные виды бумаги для печати. Кроме того, в современных типографиях применяется множество различных методов печати, позволяющих получить качественную полиграфическую продукцию по оптимальной стоимости. При выборе способа печати учитываются объем тиража, цветовая палитра, тип продукции, ценовой фактор, срочность заказа. Из вышесказанного можно сделать вывод о наличии большого разнообразия печатной продукции, что говорит о важности качества одного из исходных материалов, т. е. бумаги, предназначенной для печати.

Поэтому выбор бумаги для печати – одно из важнейших условий обеспечения стабильности качества полиграфической продукции. Данная бумажная продукция должна обладать целым комплексом свойств, которые на бумажных предприятиях не контролируются, так как показатели качества этих свойств не отражены в действующих технических нормативных правовых актах (ТНПА) на готовую продукцию и не учитываются при оценке ее качества при производственном контроле. В связи с этим на предприятиях не уделяется должного внимания технологии бумаги для печати с целью получения полиграфического бумажного материала надлежащего качества [1, 2].

Это обусловило цель работы, которая заключалась в установлении зависимости между параметрами технологического процесса производства бумаги и качеством оттиска, что позволит расширить номенклатуру показателей, используемых при производственном контроле бумаги, и повысить привлекательность бумаги для полиграфистов.

Основная часть. При оценке качества бумаги для печати существует два принципиально отличных подхода: со стороны предприятия по производству бумаги и с точки зрения предприятия – потребителя бумаги (полиграфисты).

Бумажные предприятия выпускают бумагу по требованиям ТНПА, где закладываются показатели, практически не используемые при оценке качества бумаги полиграфистами. Соответственно, все нормы технологических параметров производственного процесса изготовления бумаги ориентированы на получение бумаги согласно этим требованиям.

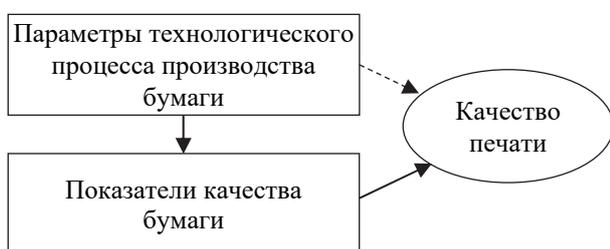
Производство бумаги – это сложный и трудоемкий процесс, при котором большое внимание уделяется технологическим факторам, таким как степень помола водно-волоконистой суспензии, средневзвешенная длина волокна, а также композиционному составу бумажной продукции, т. е. виду и качеству исходного волоконистого полуфабриката, виду и расходу применяемых вспомогательных химических веществ (минеральные наполнители, проклеивающие вещества, упрочняющие и удерживающие добавки и др.) [3].

Каждый параметр технологического процесса изготовления бумаги прямо либо косвенно оказывает определенное влияние на показатели качества печатного процесса. Например, изменение режимов размола бумажной массы снижает линейную деформацию и, как следствие, уменьшает вероятность получения несовмещения в процессе печати [4]. Суперкаландрирование бумаги повышает гладкость бумаги, снижает ее пористость и, соответственно, ухудшает впитываемость печатной краски, т. е. красковосприятие. Увеличение скорости выщипывания достигается применением при производстве бумаги высококачественной целлюлозы и снижением содержания древесной массы, а также введением в массу и распределением по поверхности проклеивающих веществ.

При печатании бумага должна соответствовать способу печати и виду печатной машины для получения оттиска хорошего качества с четкими графическими элементами, правильной градиционной цветопередачей полутонов и теней изображения [5, 6]. Таким образом, бумага для печати должна обладать определенным комплексом показателей качества (линейная деформация, гладкость, впитываемость при одностороннем смачивании по Коббу,

степень проклейки, белизна, зольность и др.), которые подходят соответствующему технологическому процессу печатания и непосредственно оказывают влияние на поведение бумаги в печатном процессе (совмещение при печати, скорость выщипывания, контрастность печати, пыление бумаги, разрешающая способность поверхности бумаги, красковосприимчивость и др.) [7, 8].

Это свидетельствует о существовании связи между параметрами технологического процесса изготовления бумаги и поведением этой бумаги в процессе печатания. Модель оценки печатных свойств бумаги представлена на рисунке, на котором сплошными линиями показаны известные зависимости; пунктирной линией обозначена зависимость, схема влияния которой неизвестна.



Моделирование оценки печатных свойств бумаги

Рассмотрим, как повлияет изменение номенклатуры показателей качества бумаги на технологические параметры ее производства. С этой целью качество бумаги оценивали с помощью как стандартных показателей, контролируемых на бумажном производстве, так и с учетом свойств, влияющих на качество печатного оттиска. Наиболее значимыми свойствами для повышения качества печатного оттиска являются разрешающая способность и контрастность оттиска. Все печатные свойства оценивали с использованием специально изготовленной печатной формы на пробопечатном станке Когах.

Были составлены и реализованы планы экспериментов для определения необходимых изменений, которые следует сделать в основные стадии технологического процесса для улучшения качества печатного оттиска.

Было выделено три процесса, оказывающих наибольшее влияние на физико-механические, сорбционные, оптические и печатные свойства бумаги: наполнение, проклейка в массе и проклейка с поверхности [9–12].

При исследовании процесса наполнения в качестве факторов были выбраны расход наполнителя и расход катионного крахмала. Использование минерального наполнителя в композиции бумаги улучшает ее печатные свойства, однако при этом значительно снижаются прочностные характеристики. Для уменьшения негативного воздействия наполнителя на физико-механические

свойства бумажной продукции применяется его модифицирование при помощи катионного крахмала [13].

Оптимизацию параметров модифицирования наполнителя осуществляли по двухфакторному эксперименту на основе близкого к D-оптимальному плану Коно, который позволяет получить достаточно полную информацию об исследуемой области факторного пространства [14]. Лабораторные образцы бумаги для печати были изготовлены из 40% хвойной и 60% лиственной сульфатной целлюлозы. В качестве наполнителя использовали мраморный кальцит, модифицированный катионным крахмалом со степенью замещения 0,035 моль/моль и среднечисловой молекулярной массой $0,620 \cdot 10^6$ г/моль (Hi-Cat C 323 A) при концентрации суспензии 5,0%. Независимыми управляемыми переменными (факторами) были выбраны расход модифицированного наполнителя (X_1 , % от а. с. волокна), расход катионного крахмала при модифицировании наполнителя (X_2 , % от а. с. наполнителя). Уровни варьирования факторов в кодированном и натуральном выражении представлены в табл. 1.

Таблица 1
Уровни варьирования факторов при исследовании процесса наполнения

Единицы измерения факторов	Уровни варьирования					
	X_1 – расход наполнителя			X_2 – расход катионного крахмала		
Кодированные единицы	-1	0	+1	-1	0	+1
Физические единицы:						
– % от а. с. волокна	10	13	16	–	–	–
– % от а. с. наполнителя	–	–	–	0,5	1,0	1,5

При нахождении оптимальных значений выбранных переменных без учета печатных свойств критериями оптимизации являлись показатели степени удержания наполнителя (Y_1 , %), непрозрачности бумаги (Y_2 , %), сопротивления излому бумаги (Y_3 , ч. д. п.), а с учетом печатных свойств к данным критериям были добавлены разрешающая способность (Y_4 , мкм) и контрастность оттиска (Y_5 , %). Результаты реализации плана эксперимента приведены в табл. 2.

При обработке экспериментальных данных на ПЭВМ без учета печатных свойств в электронных таблицах Microsoft Excel были получены следующие математические модели, адекватно описывающие зависимость показателей качества бумаги для печати:

$$Y_1 = 105 - 9 \cdot X_1 + 32,75 \cdot X_2 + 0,95 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,27 \cdot X_1^2 - 15,67 \cdot X_2^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 81,50 + 0,96 \cdot X_1 + 7,40 \cdot X_2 + 0,15 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,04 \cdot X_1^2 - 3,57 \cdot X_2^2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 673,48 - 49,20 \cdot X_1 + 132,72 \cdot X_2 + 2,72 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,43 \cdot X_1^2 - 152,47 \cdot X_2^2. \quad (3)$$

При обработке экспериментальных данных на ПЭВМ с учетом печатных свойств в электронных таблицах Microsoft Excel дополнительно были получены следующие математические модели, адекватно описывающие зависимость показателей качества бумаги для печати:

$$Y_4 = 63,07 - 0,87 \cdot X_1 - 8,67 \cdot X_2 + 0,33 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,02 \cdot X_1^2 + 0,67 \cdot X_2^2; \quad (4)$$

$$Y_5 = 0,52 + 0,02 \cdot X_1 - 0,26 \cdot X_2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,07 \cdot X_2^2. \quad (5)$$

Таблица 2

План эксперимента

Факторы		Критерии оптимизации				
Расход наполнителя, % от а. с. волокна	Расход катионного крахмала, % от а. с. наполнителя	Степень удержания наполнителя, %	Непрозрачность, %	Сопротивление излому, ч. д. п.	Разрешающая способность, мкм	Контрастность оттиска, %
10	0,5	60,6	91,3	367	54	0,57
13	0,5	51,0	91,8	317	53	0,54
16	0,5	50,7	91,9	307	52	0,57
10	1,0	67,4	92,8	335	51	0,57
13	1,0	64,0	93,9	293	51	0,58
16	1,0	63,3	94,3	272	52	0,53
10	1,5	70,4	93,0	218	50	0,55
13	1,5	67,0	94,2	188	50	0,62
16	1,5	66,2	94,5	174	50	0,62

Показатели качества бумаги для печати, полученной с модифицированным наполнителем, изменяются неоднозначно. Так, максимальные значения показателей непрозрачности, сопротивления излому и степени удержания наполнителя достигаются при разных значениях исследуемых факторов.

Это потребовало решения компромиссной задачи оптимизации, целью которой являлось определение таких значений расхода модифицированного наполнителя и расхода катионного крахмала, при которых достигается наилучшее (оптимальное) сочетание показателей качества бумаги для печати.

Для определения оптимальных значений исследуемых факторов для каждого из критериев оптимизации были получены уравнения частных функций полезности и рассчитаны значения обобщенного критерия оптимизации W_i в каждой строке плана эксперимента. План эксперимента с расчетом обобщенного критерия оптимизации представлен в табл. 3.

По данным, приведенным в табл. 3, были определены значения коэффициентов результирующего аппроксимирующего полинома с учетом и без учета печатных свойств соответственно:

$$W_3 = -0,06 + 0,09 \cdot X_2 + 3,27 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,20 \cdot X_1^2 - 2,33 \cdot X_2^2; \quad (6)$$

$$W_5 = -1,02 + 0,02 \cdot X_2 + 1,81 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,01 \cdot X_1^2 - 0,22 \cdot X_2^2. \quad (7)$$

Использование надстройки «Поиск решения» электронных таблиц Microsoft Excel позволило установить максимальное значение обобщенного критерия оптимизации без учета и с учетом печатных свойств соответственно (W_i) 0,70 и 0,85 и оптимальные значения факторов: расход модифицированного наполнителя – в обоих случаях 10,0% от а. с. волокна, расход катионного крахмала при модифицировании наполнителя – 0,95% от а. с. наполнителя. Значения критериев оптимизации, полученные при оптимальных значениях факторов, без учета печатных свойств следующие: степень удержания наполнителя – 69,19%, непрозрачность бумаги – 93,09%, сопротивление излому бумаги – 321 ч. д. п. При учете печатных свойств получили следующие значения критериев оптимизации: степень удержания наполнителя – 69,95%, непрозрачность бумаги – 93,19%, сопротивление излому бумаги – 302 ч. д. п., разрешающая способность – 52 мкм, контрастность оттиска – 12,90%.

Таблица 3

План эксперимента с расчетом обобщенного критерия оптимизации

Факторы		Значение частных функций полезности					Значение обобщенного критерия оптимизации	
X_1	X_2	$d_1(Y_1)$	$d_2(Y_2)$	$d_3(Y_3)$	$d_4(Y_4)$	$d_5(Y_5)$	W_i для 3 критериев	W_i для 5 критериев
10	0,5	0,68	0,05	0,95	0,95	0,61	0,31	0,45
13	0,5	0,06	0,20	0,86	0,87	0,15	0,21	0,27
16	0,5	0,05	0,25	0,83	0,68	0,61	0,20	0,34
10	1,0	0,91	0,64	0,90	0,34	0,61	0,78	0,64
13	1,0	0,83	0,90	0,78	0,34	0,73	0,77	0,68
16	1,0	0,80	0,94	0,68	0,68	0,05	0,71	0,44
10	1,5	0,95	0,71	0,31	0,05	0,30	0,40	0,31
13	1,5	0,90	0,93	0,11	0,05	0,95	0,21	0,34
16	1,5	0,89	0,95	0,05	0,05	0,95	0,13	0,29

Из полученных данных видно, что включение печатных свойств незначительно влияет на регулируемые параметры наполнения бумаги.

При исследовании процесса проклейки в массе использовали двухкомпонентную систему, состоящую из гидрофобизирующего полимера Думар и реагента, повышающего степень удержания проклеивающихся частиц Vector IC 2016AS [15]. Для определения оптимального соотношения компонентов при проклейке в массе использовали план Кифера, который позволяет получить достаточно полную информацию об исследуемой области факторного пространства. В качестве независимых управляющих переменных (факторов) были выбраны: X_1 – расход реагента Vector IC 2016AS (кг/т), X_2 – расход реагента Думар (кг/т). Остальные компоненты, используемые при проклейке в массе, вводили в количестве (кг/т): Melapret PAE/A – 8; Mareclean – 2; Hi-Cat – 8; Hydrocarb 40-UR – 100.

Уровни варьирования факторов в кодированном и натуральном выражении представлены в табл. 4.

Таблица 4

Уровни варьирования факторов при исследовании процесса проклейки в массе

Единицы измерения факторов	Уровни варьирования					
	X_1 – расход реагента Vector, кг/т			X_2 – расход реагента Думар, кг/т		
Кодированные	-1	0	+1	-1	0	+1
Физические	2	6	10	2	6	10

Порядок внесения реагентов при проклейке в массе следующий: в 1%-ную бумажную массу вводили минеральный наполнитель (концентрация 5%), затем крахмал Hi-Cat (концентрация 1%), далее Melapret PAE/A (концентрация 5%), затем Думар (концентрация 2%), далее Mareclean (концентрация 1,7%) и Vector IC 2016AS (концентрация 1,5%).

Образцы бумаги без учета влияния на печатные свойства испытывали по следующим показателям: разрывная длина (по ГОСТ 13525.1–79 «Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении»); удлинение при разрыве (по ГОСТ 13525.1); впитываемость (по ГОСТ 12605–97 «Бумага и картон. Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба)») и прочность на излом при многократных перегибах (по ГОСТ 13525.2–80 «Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения прочности на излом при многократных перегибах»). Результаты испытаний бумаги приведены в табл. 5.

Для определения оптимального соотношения функциональной добавки (X_1) и гидрофобизирующего полимера (X_2) математически обрабатывали представленные (табл. 5) показатели качества бумаги. В качестве выходных параметров (критериев оптимизации) были приняты следующие свойства бумаги: Y_1 – разрывная длина (км); Y_2 – удлинение при разрыве (%); Y_3 – впитываемость при одностороннем смачивании по Кобб₃₀ (г/м²); Y_4 – прочность на излом (ч. д. п.). А также проведена дополнительная оптимизация с учетом влияния на печатные свойства разрешающей способности (мкм) – Y_5 и контрастности оттиска (%) – Y_6 .

Целью решения задачи оптимизации был поиск оптимального сочетания факторов, обеспечивающего наилучшее сочетание значений критериев оптимизации. Задача оптимизации решалась путем определения максимального значения функции желательности Харрингтона, исходя из значений частных функций желательности каждого критерия оптимизации. Результаты расчета функции желательности Харрингтона представлены в табл. 6.

Таблица 5

Результаты реализации плана эксперимента

Содержание в композиции бумаги, кг/т		Свойства бумаги					
Vector IC 2016AS	Думар	Разрывная длина, км	Удлинение при разрыве, %	Впитываемость при одностороннем смачивании (Кобб ₃₀), г/м ²	Прочность на излом, ч. д. п.	Разрешающая способность, мкм	Контрастность оттиска, %
2	2	4,01	3,11	23,9	224	54	0,53
2	6	3,95	3,28	30,8	147	50	0,58
2	10	4,04	3,17	24,2	180	51	0,61
6	2	4,38	3,17	36,9	167	50	0,44
6	6	4,13	3,23	18,7	184	51	0,59
6	10	3,49	2,98	16,8	110	53	0,60
10	2	4,93	3,72	27,9	613	50	0,48
10	6	4,34	3,62	19,8	299	54	0,63
10	10	3,56	3,12	16,9	72	53	0,61

Таблица 6

Результаты расчета глобального критерия оптимизации (после реализации плана Кифера)

Содержание в композиции бумаги, кг/т		Значение частных функций полезности						Значение функции желательности Харрингтона W_i	
Vector IC 2016AS	Думар	$d_1(Y_1)$	$d_2(Y_2)$	$d_3(Y_3)$	$d_4(Y_4)$	$d_5(Y_5)$	$d_6(Y_6)$	W_i	W_i для 4 функций
2	2	0,50	0,90	0,81	0,38	0,05	0,65	0,41	0,61
2	6	0,44	0,77	0,42	0,18	0,95	0,86	0,52	0,40
2	10	0,53	0,86	0,80	0,26	0,87	0,92	0,65	0,56
6	2	0,78	0,86	0,05	0,23	0,95	0,05	0,27	0,30
6	6	0,61	0,82	0,93	0,27	0,87	0,89	0,68	0,60
6	10	0,05	0,95	0,95	0,10	0,34	0,91	0,34	0,26
10	2	0,95	0,05	0,62	0,95	0,95	0,28	0,44	0,41
10	6	0,76	0,18	0,91	0,58	0,05	0,95	0,39	0,52
10	10	0,09	0,90	0,95	0,05	0,34	0,91	0,32	0,25

Определение коэффициентов результирующего аппроксимирующего полинома позволило установить значения расхода гидрофобизирующего полимера Думар и функциональной добавки Vector IC 2016AS, при которых достигаются оптимальные значения критериев оптимизации.

Решение задачи оптимизации выполнялось с помощью надстройки «Поиск решения» электронных таблиц MS Excel. Установлено, что максимальное значение функции желательности Харрингтона без учета влияния на печатные свойства составило $W_i = 0,60$, а с учетом влияния $W_i = 0,64$, которое достигалось при значении расхода гидрофобизирующего полимера Думар без учета влияния на печатные свойства 5,71 кг/т, а с учетом – 7,96 кг/т, функциональной добавки Vector IC 2016AS в обоих случаях – 2 кг/т. Значения показателей качества бумаги, проклеенной такой композицией, без учета печатных свойств были следующие: разрывная длина – 4,05 км, удлинение при разрыве – 3,29%, впитываемость при одностороннем смачивании по Кобб₃₀ – 25,57 г/м², прочность на излом – 171 ч. д. п. Значения показателей качества бумаги, проклеенной такой композицией, с учетом влияния на печатные свойства следующие: разрывная длина – 4,02 км, удлинение при разрыве – 3,28%, впитываемость при одностороннем смачивании по Кобб₃₀ – 24,60 г/м², прочность на излом – 185 ч. д. п., разрешающая способность – 51 мкм, контрастность оттиска – 0,62%.

Из полученных данных видно, что включение печатных свойств значительно влияет на расход компонентов при проклейке в массе.

При рассмотрении процесса поверхностной проклейки в качестве регулируемого параметра бумаги был выбран расход добавки, улучшающей печатные свойства [16].

Для определения оптимального содержания добавки (x) математически обрабатывали показатели качества бумаги, полученной в лабораторных условиях (табл. 7). В качестве выходных параметров (критериев оптимизации) были приняты следующие свойства бумаги: Y_1 – разрушающее усилие в сухом состоянии в машинном направ-

лении (Н); Y_2 – гладкость бумаги (с); Y_3 – впитываемость при одностороннем смачивании по Кобб₃₀ (г/м²); Y_4 – линейная деформация бумаги при намокании (%); Y_5 – разрешающая способность (мкм); Y_6 – контрастность оттиска (%).

Таблица 7

Свойства бумаги с поверхностной проклейкой

Показатель	Значения показателей бумаги при содержании добавки, улучшающей печатные свойства, %				
	0	1,5	3,0	4,5	6,0
Разрушающее усилие в сухом состоянии, Н	46	52	58	58	54
Гладкость, с	48	54	58	58	56
Впитываемость при одностороннем смачивании (Кобб ₃₀), г/м ²	26	24	21	18	16
Линейная деформация, %	3,2	2,7	2,4	2,0	1,6
Разрешающая способность, мкм	54	53	52	50	53
Контрастность оттиска, %	0,44	0,59	0,61	0,58	0,53

При обработке экспериментальных данных были получены уравнения регрессии для исследуемых показателей качества, рассчитаны доверительные интервалы по результатам параллельных определений и оценена достоверность аппроксимации (R^2) результатов эксперимента уравнениями регрессии. Для исследуемых показателей качества были получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_1 = -0,8254 \cdot x^2 + 6,419 \cdot x + 45,486;$$

$$Y_2 = -0,6349 \cdot x^2 + 5,1429 \cdot x + 47,943;$$

$$Y_3 = -1,7333 \cdot x + 26,2;$$

$$Y_4 = 0,0032 \cdot x^2 - 0,2791 \cdot x + 3,1743;$$

$$Y_5 = 0,2222 \cdot x^2 - 1,6667 \cdot x + 54,4;$$

$$Y_6 = -0,0147 \cdot x^2 + 0,0998 \cdot x + 0,4498.$$

Таблица 8

Результаты определения коэффициентов результирующего аппроксимирующего полинома

Расход добавки, %	Значение частных функций полезности						Значение обобщенного критерия оптимизации W_i	
	$d_1(Y_1)$	$d_2(Y_2)$	$d_3(Y_3)$	$d_4(Y_4)$	$d_5(Y_5)$	$d_6(Y_6)$	W_{1-4}	W_{1-6}
0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
1,5	0,68	0,77	0,26	0,43	0,34	0,93	0,49	0,52
3,0	0,95	0,95	0,68	0,68	0,68	0,95	0,80	0,80
4,5	0,95	0,95	0,89	0,87	0,95	0,90	0,91	0,92
6,0	0,82	0,89	0,95	0,95	0,34	0,71	0,90	0,73

Целью решения задачи оптимизации был поиск значения фактора «расход добавки», обеспечивающего наилучшее сочетание значений критериев оптимизации. Задача оптимизации решалась путем определения максимального значения глобального критерия оптимизации исходя из значений частных функций желательности каждого критерия оптимизации. Результаты расчета обобщенного критерия оптимизации представлены в табл. 8. Определение коэффициентов результирующего аппроксимирующего полинома позволило установить значения расхода добавки, при которых достигаются оптимальные значения критериев оптимизации.

Решение задачи оптимизации выполнялось с помощью надстройки «Поиск решения» электронных таблиц MS Excel. Установлено, что максимальное значение обобщенного критерия оптимизации без учета печатных свойств $W_i = 0,93$, а с учетом влияния $W_i = 0,89$ достигалось при значении расхода гидрофобизирующего полимера в первом случае 5,01%, а во втором – 4,27%. Значения показателей качества бумаги, проклеенной с поверхности такой дисперсией, были следующие: разрушающее усилие при разрыве – 57,85 Н, гладкость – 58,33 с, впитываемость при одностороннем смачивании по Кобб₃₀ – 18,80 г/м², линейная деформация бумаги – 2,40%, разрешающая способность – 51 мкм, контрастность оттиска – 0,61%. Исходя из полученных данных видно, что включение печатных свойств также значительно влияет на расход компонентов при поверхностной проклейке.

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод, что включение в номенклатуру показателей качества бумаги, контролируемых непосредственно на производстве, вызывает необходимость изменения параметров технологического процесса.

Для оценки комплексного влияния изменения параметров, определенных для каждого из трех процессов отдельно, был реализован эксперимент по изготовлению бумаги до и после внесения изменений в технологический процесс с учетом данных, полученных в результате оптимизации этапов наполнения, проклейки в массе и поверхностной проклейки. Сравнительная характеристика свойств бумаги представлена в табл. 9.

Как видно из табл. 9, перенастройка параметров технологического процесса приводит к значительному улучшению печатных свойств бумаги, делая ее более привлекательной для полиграфистов, а следовательно, увеличивает спрос.

Таблица 9

Сравнительная характеристика свойств бумаги

Показатель	Свойства бумаги	
	без учета печатных свойств	с учетом печатных свойств
Разрушающее усилие в сухом состоянии, Н	53–55	48–50
Сопротивление на излом, ч. д. п.	140	260
Впитываемость при одностороннем смачивании (Кобб ₃₀), г/м ²	22	18
Линейная деформация, %	2,7	2,2
Контрастность оттиска, %	0,60	0,85
Разрешающая способность, мкм	60	52

Заключение. В ходе проведенных исследований, направленных на оценку влияния изменения номенклатуры показателей качества бумаги, контролируемых непосредственно на производстве и обуславливающих оптимальные параметры ведения технологического процесса, было установлено, что улучшение печатных свойств бумаги требует перенастройки производственного процесса. Анализ выбранных параметров процессов показал, что меньше всего изменений понадобилось вносить в процесс наполнения, что можно объяснить направленностью процесса модифицирования наполнителя непосредственно на повышение прочностных свойств бумаги, а не на изменение содержания наполнителя. Моделирование же процессов проклейки в массе и проклейки с поверхности показало прямую зависимость параметров процесса изготовления бумаги от номенклатуры показателей качества бумаги. Перенастройка технологического процесса с учетом расширенной номенклатуры выявила смещение акцентов в сторону повышения печатных свойств бумаги, что позволяет говорить об адекватности результатов моделирования и возможности их использования как инструмента повышения качества бумаги.

Список литературы

1. Вилсон А. Что полиграфист должен знать о бумаге. М.: Принт-Медиа, 2005. 146 с.
2. Дубина Н. Особенности структуры и свойств печатных бумаг // КомпьюАрт. 2000. № 10. С. 18–22.
3. Фляте Д. М. Бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов. М.: Лесная пром-сть, 1990. 136 с.
4. Смирнова Е. Г., Евтюхов С. А. Влияние композиционного состава по волокну и проклеивающих реагентов на свойства бумаги для офсетной печати // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 11. С. 32–33.
5. Остреров М. А. Печать с использованием печатной формы // Мир бумаги. 2000. № 1. С. 18–22.
6. Кипхан Г. Энциклопедия по печатным средствам информации. Технологии и способы производства. М.: МГУП, 2003. 1280 с.
7. Бумага для печати. Особенности свойств // Советы бумажника. URL: <http://paperm.narod.ru/statji.htm> (дата обращения: 01.02.2007).
8. Медяк Д. М., Демьянова Г. Г., Старченко О. П. Теоретическое исследование выщипывания различных видов печатной бумаги // Труды БГТУ. Сер. IX, Издательское дело и полиграфия. 2007. Вып. XV. С. 25–28.
9. Оценка влияния внутримассной и поверхностной проклейки на свойства офсетной бумаги / А. Б. Никандров [и др.] // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2010. № 2. С. 48–52.
10. Примаков С. Ф., Барбаш В. А., Шутько А. П. Технология бумаги и картона. М.: Экология, 1996. 304 с.
11. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. / редкол.: П. Осипов [и др.]. СПб.: Политехника, 2002–2006. Т. 2: Производство бумаги и картона. Ч. 1: Технология производства и обработки бумаги и картона / В. Комаров [и др.]. 2005. 423 с.
12. Smith Malcolm K. Research challenges in paper coating by metered size press // Pap. Ja puu. 2002. Vol. 84, no. 2. P. 105–111.
13. Повышение удержания наполнителя в композиции бумаги для печати / Т. В. Соловьева [и др.] // Использование лесных ресурсов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 6–7 дек. 2005 г. Минск, 2005. С. 307–309.
14. Колесников В. Л. Математические основы компьютерного моделирования химико-технологических систем. Минск: БГТУ, 2003. 312 с.
15. Бейтс Б., Крылатов Ю. А. Нейтральные проклеивающие материалы на основе алкилкетендимеров (АКД) и их влияние на процессы производства бумаги // Целлюлоза. Бумага. Картон. 1998. № 9–10. С. 50–53.
16. Горжанов В. В., Темрук В. И., Соловьева Т. В. Повышение потребительских свойств бумаги для печати поверхностной проклейкой комбинированными составами // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология орган. в-в. 2009. Вып. XVII. С. 282–284.

References

1. Vilson A. *Chto poligrafist dolzhen znat' o bumage* [What a printer should know about paper]. Moscow, Print-Media Publ., 2005. 146 p. (In Russian).
2. Dubina N. Features of the structure and properties of printed papers. *Komp'yuArt* [CompuArt], 2000, no. 10, pp. 18–22 (In Russian).
3. Flyate D. M. *Bumagoobrazuyushchiye svoystva voloknistykh polufabrikatov* [Paper-forming properties of fibrous semi-finished products]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 136 p. (In Russian).
4. Smirnova E. G., Evtyukhov S. A. The influence of fiber composition and sizing reagents on the properties of paper for offset printing. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Cardboard], 2006, no. 11, pp. 32–33 (In Russian).
5. Ostrerov M. A. Printing using a printing plate. *Mir bumagi* [Paper World], 2000, no. 1, pp. 18–22 (In Russian).
6. Kipkhan G. *Entsiklopediya po pechatnym sredstvam informatsii. Tekhnologii i sposoby proizvodstva* [Encyclopedia of Print Media. Technologies and production methods]. Moscow, MGUP Publ., 2003. 1280 p. (In Russian).
7. Printing paper. Features properties. Available at: <http://paperm.narod.ru/statji.html> (accessed 01.02.2007) (In Russian).
8. Medyak D. M., Dem'yanova G. G., Starchenko O. P. Theoretical study on plucking various types of printing paper. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IX, Publishing and Printing, 2007, issue XV, pp. 25–28 (In Russian).
9. Nikandrov A. B., Ermakova E. M., Bobrova V. V., Ermakova M. S. Assessment of the influence of in-mass and surface sizing on the properties of offset paper. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Cardboard], 2010, no. 2, pp. 48–52 (In Russian).

10. Primakov S. F., Barbash V. A., Shut'ko A. P. *Tekhnologiya bumagi i kartona* [Paper and cardboard technology]. Moscow, Ekologiya Publ., 1996. 304 p. (In Russian).

11. Osipov P. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 3 tomakh* [Pulp and paper technology. In 3 vol.]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2002–2006. Vol. 2: Paper and cardboard production. Part 1: Production technology and processing of paper and cardboard. 2005. 423 p. (In Russian).

12. Smith Malcolm K. Research challenges in paper coating by metered size press. *Pap. Ja puu*, 2002, vol. 84, no. 2, pp. 105–111.

13. Solov'yeva T. V., Penkin A. A., Gorzhanov V. V., Temruk V. I. Increasing filler retention in printing paper compositions. *Ispol'zovaniye lesnykh resursov: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Utilisation of forest resources: materials of the International scientific and technical conference]. Minsk, 2005, pp. 307–309 (In Russian).

14. Kolesnikov V. L. *Matematicheskiye osnovy komp'yuternogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh sistem* [Mathematical foundations of computer modeling of chemical technological systems]. Minsk, BGTU Publ., 2003. 312 p. (In Russian).

15. Beyts B., Krylatov Yu. A. Neutral sizing materials based on alkyl ketene dimers (AKD) and their impact on paper production processes. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Pulp. Paper. Cardboard], 1998, no. 9–10, pp. 50–53 (In Russian).

16. Gorzhanov V. V., Temruk V. I., Solov'yeva T. V. Improving the consumer properties of printing paper by surface sizing using combined compositions. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series IV, Chemical and technology of organic substances, 2009, issue XVII, pp. 282–284 (In Russian).

Информация об авторах

Горжанов Вадим Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры физико-химических методов и обеспечения качества. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: horzhanovvadim@mail.ru

Герман Наталия Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: herman_n@belstu.by

Николаичик Ирина Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikolaichik.ira@mail.ru

Information about the authors

Gorzhanov Vadim Valer'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Physical-Chemical Methods and Quality Assurance. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: horzhanovvadim@mail.ru

Herman Nataliya Aleksandrovna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: herman_n@belstu.by

Nikolaichik Irina Vladimirovna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikolaichik.ira@mail.ru

Поступила 15.11.2024