



УДК 676.22.06

**МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ  
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ  
ДЛЯ ДРУКУ ЗНИЖЕНОЇ МАСИ 1 м<sup>2</sup>**

© Л. А. Коптюх, д.т.н., В. Г. Плосконос, к.т.н.,  
В. Н. Легкий, О. Г. Аїстова, УкрНДІП, Т. Г. Глушкова,  
к.т.н., доцент, КНТЕУ, Київ, Україна

На основе полученных экспериментальных данных с помощью средств вычислительной техники разработаны математические модели зависимостей показателей белизны, непрозрачности, впитывающей способности, а также механической прочности бумаги для печати сниженной массы 1 м<sup>2</sup> от вида волокнистого сырья, качества бумажной массы и массовой доли наполнителей и проклеивающих веществ. Математические зависимости параметров качества бумаги разрабатывались с использованием метода группового учета аргументов (МГУА). Создание и исследование математических моделей с последующим анализом влияния отдельных факторов позволило определить условия производства бумаги с заданными показателями качества.

On the basis of the experimental findings by facilities of the computing engineering the mathematical models of dependences of indexes of whiteness, opacity, absorptive ability, and also mechanical durability of paper for the printing of the reduced mass 1 м<sup>2</sup> from the type of fibred raw material, quality of paper mass and mass stake of fillers and glueing substances are developed. Mathematical dependences of parameters of quality of paper were developed with the use of method of group account of arguments (MGAA). Creation and research of mathematical models with the subsequent analysis of influencing of separate factors allowed to define the terms of production of paper with the set indexes of quality.

**Постановка проблеми**

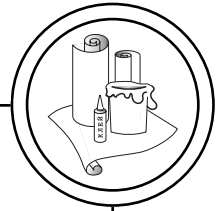
Використання методів математичного моделювання в комплексі з сучасними засобами обчислювальної техніки надають можливість експериментатору не тільки значно скоротити обсяги експериментальних досліджень, але створити також інструмент, за допомогою якого можливо визначити найбільш раціональні параметри процесів виробництва заданого виду продукції.

**Мета роботи**

Метою даної роботи є пошук найбільш прийнятних умов виробництва паперу для офсетного друку зниженої маси площі 1 м<sup>2</sup> з бажаним рівнем структурно-механічних і друкарських властивостей.

**Аналіз попередніх досліджень**

Проведений аналіз літературних джерел та досвід попередніх дослі-



джен показує, що одним із стратегічно важливих і пріоритетних для економіки України напрямків розвитку паперової галузі держави повинна бути організація промислового виробництва високоякісних видів паперу для друку.

В країні не один рік гостро стоїть проблема забезпечення духовних потреб українського суспільства і, зокрема такими, як добротна та доступна книга, шкільний підручник, навчальний посібник, енциклопедичне видання. Від розв'язання цієї проблеми залежить поступальний розвиток вітчизняної культури, науки, освіти.

Частка виготовлення паперу для друку на власному внутрішньому ринку складає менше 7 %, що свідчить про знаходження його на нижньому рівні виробництва. Це слабкий ланцюг галузі і вимагає від виробників паперу вирішення важливих науково-технічних, економічних і організаційних проблем [1].

Серед головних причин, що стримують зростання обсягів його виробництва є: відсутність в країні власної сировинної бази і, відповідно, дефіцит волокнистих напівфабрикатів необхідної якості (целюлози і деревної маси), дефіцит капіталовкладень в розвиток галузі, сучасного папероробного і технологічного обладнання для виробництва та оброблення паперу, який повинен витримувати конкуренцію з аналогічною продукцією таких країн, як Фінляндія, або Росія, що мають високорозвинуту целюлозно-паперову індустрію. ГОСТ 9094 «Бумага для печати офсетная. Технические условия», який чинний на території країн колишнього СРСР, в т.ч. і на території України, регламентує виготовлення зазначеного виду паперу для друку масою площі 1 м<sup>2</sup>, розпочинаючи з 60 г. Але, зважаючи на

всі вищевикладені обставини, неможливо бути впевненим, що виробництво в Україні традиційних видів паперу для друку загальноприйнятої маси площі 1 м<sup>2</sup> від 60 г і вище, буде економічно вигідним і конкурентоспроможним навіть за умови досягнення необхідного рівня якості.

Аналіз реальної ситуації щодо власного виробництва та споживання паперу для друкування різноманітної поліграфічної продукції вказує на доцільність виготовлення в країні спеціальних малотоннажних видів паперу. Саме такий, на нашу думку, є папір для офсетного друку зниженої маси площі 1 м<sup>2</sup> 48 г з високим рівнем структурно-механічних і друкарських властивостей [2, 3].

Папір зниженої поверхневої щільності повинен знайти широке застосування для випуску відповідної поліграфічної продукції сучасної якості, в т.ч. словників, довідників, енциклопедичних видань, шкільних підручників, іншої учбової літератури і посібників, знизити його питомі витрати на одиницю друкованої продукції з одночасним зниженням її ваги (наприклад, підручників) і витрат, пов'язаних з її транспортуванням і зберіганням. Відповідно до вимог ДСанПіН 5.5.6.084-02 «Гігієнічні вимоги до друкованої продукції для дітей» папір для книжкової продукції, в т.ч. шкільних підручників, повинен мати матову поверхню, білість на рівні 70—88 %, непрозорість не менше 90 %, високу механічну міцність, що забезпечує технологічність його перероблення на сучасному швидкісному поліграфічному устаткуванні і тривалий термін експлуатації виробів на його основі (наприклад, книги, словники тощо).



Створення технології виробництва з освоєнням промислового випуску паперу зниженої товщини і маси площі  $1 \text{ м}^2$  проводиться Українським науково-дослідним інститутом паперу з використанням діючого в паперовій галузі країни обладнання, виробничі потужності якого дозволяють виготовляти таку і подібну їй паперову продукцію [4—6]. Папір для офсетного друку, який є одним з найпоширеніших при багатотиражному друкуванні журналів, дитячих книг, букварів, художніх репродукцій, плакатів тощо повинен характеризуватись високими показниками механічної міцності поверхні, стабільністю лінійних розмірів при його зволоженні і наступному висиханні, рівномірністю споживчих і експлуатаційних властивостей.

### **Результати проведених досліджень**

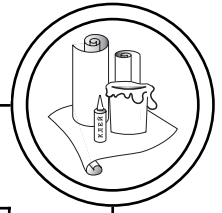
Для досягнення поставленої мети та визначення можливостей виготовлення паперу зниженої маси площі  $1 \text{ м}^2$  з технологічними параметрами його виробництва (так званими факторами) і вимогами, які гарантували б рівень показників якості паперу, та враховуючи вище зазначені вимоги до нього, в лабораторних умовах проводились дослідження, що стосувались вибору композиції волокнистої сировини, параметрів процесу розмелювання целюлози, умов підготовки і характеристики паперової маси (розмір целюлозних волокон, ступінь помелу), виду мінеральних наповнювачів (каолін, двоокис титану, цеоліт), проклеювальних і зв'язувальних компонентів (каніфольний клей, смола поліамідна модифікована епіхлоргідрином), а також їх витрат і місця введення у процесі виготовлення паперового полотна.

В табл. 1 наведені фактори, їх умовне позначення і діапазони значень, які були використані під час проведення експериментальних досліджень з пошуку композиції волокнистої маси та її якості для виробництва паперу із заданими властивостями. Діапазони значень факторів вибирались експериментальним шляхом з врахуванням попереднього досвіду з виробництва та використання картонно-паперової продукції.

Для забезпечення вимог, які пред'являються до волокнистої композиції, і забезпечення необхідного рівня якості паперу використовували сульфатну вибілену целюлозу з хвойних порід деревини (СФАХД) та сульфатну вибілену целюлозу з листяної деревини (СФАЛД). Вибір сульфатної целюлози з хвойної деревини для виготовлення паперу зниженої маси площі  $1 \text{ м}^2$  пов'язаний з необхідністю забезпечення його високих фізико-механічних показників. Як наповнювач до композиції паперу додавали каолін та двоокис титану. При проведенні експериментальних досліджень змінювали співвідношення СФАХД до СФАЛД у композиції паперу та витрати наповнювачів, таких як каолін і двоокис титану або їх суміш.

В подальшому для вирішення питань, пов'язаних з розробленням промислової технології, яка забезпечувала б досягнення необхідного рівня показників механічної міцності, непрозорості, білості та лінійної деформації паперу можливо також застосовування інших наповнювачів, таких як крейда і цеоліт.

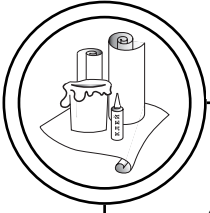
Приготування волокнистої композиції проводили шляхом сумісного розмелювання целюлозних волокон до ступеня помелу маси від  $42^0$  до  $76^0$  ШР та дотриманням середньомасової довжини волокна



Таблиця 1

Діапазони значень факторів для експериментальних досліджень

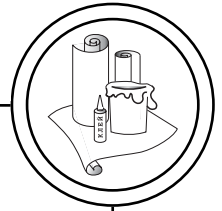
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>
Діапазони значень факторів	СФАХД, %	СФАЛД, %	Каолін, %	Двоокис титану, %	Крохмаль, %	Каніфольний клей, %	Глинозем, %	Флокулянт, %	Водамін, %	Щільність паперу, г/см <sup>3</sup>	Ступінь помелу маси, ОЩР	Середньо-масова довжина на волокна, дг
Нижній	50,0	20,0	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	42,0	48,0
Середній	65,0	35,0	8,25	2,50	1,00	1,25	3,00	0,01	0,15	0,59	59,0	84,0
Верхній	80,0	50,0	17,00	5,00	2,00	2,50	6,00	0,02	0,30	0,79	76,0	120,0



Таблиця 2

Зафіксовані значення факторів в експериментальних точках з дослідження фізико-механічних властивостей зразків паперу

Варіант	Фактори												Щільність паперу, г/см <sup>3</sup>	Ступінь помелу маси, ОШР	Середньо масова довжина волокна, дг X12
	Масова частка, %														
	СФАХД X1	СФАЛД X2	Каолін X3	Двоокис титану X4	Крохмаль X5	Каніфольний клей X6	Глинозем X7	Флокулянт X8	Водамініліт X9	Водамініліт X9	Водамініліт X9	Водамініліт X9			
1	50,0	50,0	10,4	0,0	2,0	1,5	6,0	0,02	0,0	0,41	42,0	120,0			
2	50,0	50,0	9,4	1,0	2,0	1,5	6,0	0,02	0,0	0,41	42,0	120,0			
3	50,0	50,0	4,4	1,0	2,0	1,5	6,0	0,02	0,0	0,41	42,0	120,0			
4	50,0	50,0	10,4	0,0	2,0	0,0	4,5	0,0	0,3	0,41	42,0	120,0			
5	50,0	50,0	5,4	0,0	2,0	1,0	6,0	0,02	0,0	0,39	42,0	120,0			
6	50,0	50,0	0,4	5,0	2,0	1,0	6,0	0,02	0,0	0,39	42,0	120,0			
7	50,0	50,0	5,4	0,0	2,0	0,0	3,0	0,0	0,3	0,40	42,0	120,0			
8	50,0	50,0	2,9	2,5	2,0	0,0	3,0	0,0	0,3	0,39	42,0	120,0			
9	80,0	20,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,39	76,0	48,0			
10	80,0	20,0	10,4	0,0	1,5	2,0	6,0	0,02	0,0	0,39	76,0	48,0			
11	60,0	40,0	17,0	0,0	2,0	2,0	6,0	0,02	0,0	0,75	55,0	80,0			
12	60,0	40,0	15,8	0,0	2,0	2,0	6,0	0,02	0,0	0,78	55,0	80,0			
13	60,0	40,0	16,4	5,0	2,0	2,5	6,0	0,02	0,0	0,78	55,0	80,0			
14	60,0	40,0	12,4	5,0	2,0	2,5	6,0	0,02	0,0	0,79	55,0	80,0			
15	80,0	20,0	12,8	0,0	2,0	2,5	6,0	0,02	0,0	0,35	76,0	48,0			



(СДВ) в діапазоні від 120 до 48 дг. Виготовлення зразків паперу проводили згідно з розробленою методикою в лабораторних умовах на листовідливному апараті (ЛВА).

В табл. 2 і 3 наведені результати досліджень, які були виконані в 15 експериментальних точках з метою визначення математичних залежностей кожного із показників якості паперу від вхідних факторів.

Оскільки папір повинен задовольняти вимогам поліграфії з високим рівнем друкарських властивостей, необхідно було дослідити також вплив умов проклеювання паперової маси, вмісту і складу проклеювальних компонентів на

структурно-фізичні показники паперу і його поверхневу вбирність при однобічному змочуванні водою (метод Кобб).

З цією метою для проклеювання паперової маси використовували каніфольний клей-пасту та сірчано-кислий алюміній, а для зв'язування і підвищення ступеня утримування целюлозного волокна і механічної міцності паперу до його композиції вводили картопляний крохмаль і флокулянт Перкол-352, які традиційно застосовуються у технології виробництва паперу для друку.

Зразки паперу, отримані в результаті проведення експериментальних досліджень в 15-ти точках,

Таблиця 3  
Показники фізико-механічних властивостей зразків паперу, виготовлених експериментально (у відповідності з табл. 2)

Показники якості паперу, значення					
Маса паперу, площою 1 м <sup>2</sup> , г	Поверхнева вбирність води при однобічному змочуванні (Кобб 30), г/м <sup>2</sup>	Розривна довжина, м	Білість, %	Непрозорість, %	Масова частка золи, %
Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
56,2	14,5	5680	74,9	84,6	4,2
54,9	20,2	6120	75,2	86,2	4,8
55,4	16,5	5758	74,9	85,7	4,9
53,9	38,8	5830	74,8	84,0	4,7
57,0	14,5	5266	70,1	81,7	1,7
55,0	14,2	4908	71,8	85,4	3,4
57,0	70,4	6051	71,6	82,0	2,4
56,0	74,2	6062	72,2	84,1	2,4
52,0	104,0	6620	81,4	82,9	0,25
49,0	62,0	6850	76,1	84,4	4,7
48,5	20,0	4500	82,6	87,1	9,7
51,0	19,0	4300	82,1	86,2	8,3
49,0	19,0	4200	86,0	92,7	16,0
47,0	17,0	3600	87,0	84,1	12,0
48,0	32,0	4900	86,0	87,1	7,1



відрізняються між собою, як видом і вмістом мінерального наповнювача, так і проклеювальних та зв'язувальних речовин. Це дає можливість провести оброблення наведених експериментальних даних і отримати математичні залежності якісних показників паперу від вхідних факторів.

*Розроблення та дослідження математичних залежностей показників якості паперу від вхідних факторів*

За допомогою засобів обчислювальної техніки на основі отриманих експериментальних даних розроблені математичні моделі залежностей показників білості, непрозорості, всмоктувальної здатності, а також механічної міцності паперу від виду волокнистої сировини, якості паперової маси (ступеня млива і середньо-масової довжини волокна) та масової частки наповнювачів і проклеювальних речовин.

Математичні залежності параметрів якості паперу ( $Y_{\text{експер.}}$ ) розроблялися з використанням методу групового обліку аргументів (МГОА) [7], що дає можливість, на базі масиву експериментальних даних, отриманого в лабораторних умовах чи на виробництві, одержати достовірну модель, що зв'язує між собою вхідні величини (фактори), які впливають на процес формування показників якості паперу (параметри).

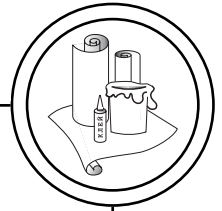
Розроблені таким чином математичні моделі в подальшому можливо використовувати для дослідження і пошуку умов, в яких планується виготовлення паперу для друку із бажаними показниками його властивостей.

Дослідження розроблених математичних моделей з використанням засобів обчислювальної тех-

ніки, тобто моделювання ( $U_{\text{розрах.}}$ ), ставить за мету проаналізувати вплив факторів на показники якості паперу без проведення досліджень в лабораторних умовах. Математична модель ввібрала в себе закономірності комплексного впливу всіх факторів, і тому, змінюючи по черзі значення одного із факторів, можливо отримати результати з впливу цього фактора на кожний із показників властивостей паперу.

Для дослідження впливу всіх 12-ти факторів на якісні показники паперу (розривна довжина, масова частка золи, непрозорість, білість, маса площі 1 м<sup>2</sup>, поверхнева вбирність) проводився так званий умовний експеримент з використанням засобів обчислювальної техніки і математичних моделей, кожна із яких відповідає певному показнику якості паперу. Суть експерименту зводиться до того, що різні значення вхідних факторів вводяться до математичної залежності і за допомогою комп'ютера розраховується значення вихідного параметра.

Кожний із факторів послідовно змінює своє значення тричі, проходячи етапи, розпочинаючи з мінімального рівня і закінчуючи максимальним. Для того, щоб зрозуміти характер впливу конкретного фактора, експерименти за допомогою обчислювальної техніки проводилися в умовах, коли всі інші фактори залишаються незмінними, але фіксація сталого значення факторів відбувалось теж тричі, відповідно на мінімальному (Н), середньому (С) і верхньому (В) рівнях. Таким чином, вплив кожного фактора зафіксувався в дев'яти умовних точках, що сумарно для 12-ти факторів виливалось в проведення 96 умовних експериментів на кожній із моделей. При обчисленні порівняльних характеристик експеримен-



тальних і розрахункових даних були використані похибки, а саме:  $e$  — абсолютна похибка;  $d$  — відносна похибка.

*Математична залежність показника непрозорості паперу від входних факторів*

Розроблена математична залежність показника непрозорості паперу від входних факторів має такий вигляд:

$$Y_{\text{непрозорість}} = 90,31 + 0,106 \cdot 10^{-1} \cdot X_3^2 \cdot X_6 - 0,243 \cdot X_{10} \cdot X_{11} - 0,267 \cdot 10^{-3} \cdot X_1^2 \cdot X_5^2 + 3,060 \cdot 10^{-7} \cdot X_4 \cdot X_{12}^3 - 0,930 \cdot 10^{-1} \cdot X_4^2 \cdot X_{10}^2 - 9,188 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_5^2 \cdot X_{11} + 0,352 \cdot 10^{-2} \cdot X_3^3 \cdot X_9 \quad (1)$$

На рис. 1 та в табл. 4 наведені порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних, а на рис. 2 та в табл. 5 наведені

Таблиця 4  
Порівняльні характеристики моделі за параметром «Непрозорість»

$Y_{\text{експер.}}$	$Y_{\text{розрах.}}$	$e = Y - y$	$d = \frac{e}{y} \cdot 100\%$
81,7	83,195	-1,495	-1,830
82,0	82,948	-0,949	-1,156
82,9	83,106	-0,206	-0,248
84,0	83,866	+0,134	+0,159
84,1	84,144	-0,044	-0,052
84,4	83,548	+0,852	+1,010
84,4	84,654	-0,254	-0,300
84,6	85,272	-0,672	-0,794
85,4	85,176	+0,224	+0,262
85,7	83,657	+2,043	+2,384
86,2	85,855	+0,345	+0,400
86,2	85,310	+0,890	+1,032
87,1	87,933	-0,833	-0,957
87,1	87,345	-0,245	-0,281
92,7	92,491	+0,209	+0,225

результати дослідження впливу факторів на параметр «Непрозорість».

Аналіз результатів дослідження математичних моделей та впливу різних факторів на параметри, що характеризують якість паперу, проводився на базі таблиць та графічних залежностей, за прикладом таких, що наведені вище.

Аналіз результатів дослідження по показнику «Непрозорість», показує:

— серед факторів, які найбільш суттєво впливають на непрозорість паперу, слід виділити такі, як масова частка каоліну ( $X_3$ ) та каніфольного клею ( $X_6$ ), що вводяться до суспензії паперової маси. Як видно із таблиці та діаграми, їх вплив відчувається на фоні фіксації всіх інших факторів на верхньому рівні і приводить до зростання показника непрозорості паперу;

— в межах проведених експериментальних досліджень на непрозорість паперу не мають суттєвого впливу такі фактори, як масова частка глинозему ( $X_7$ ) та флокулянту ( $X_8$ ), які вводяться до паперової маси для забезпечення необхідних умов проклеювання;

— фіксування всіх факторів на мінімальному, середньому та верхньому рівнях приводить до їх ком-

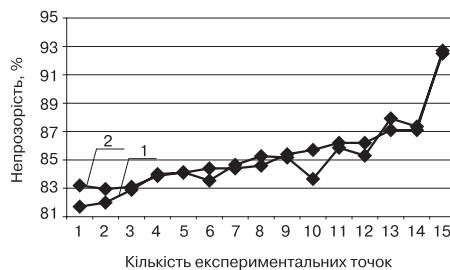
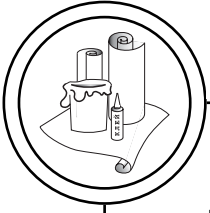


Рис. 1. Порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Непрозорість»





Таблиця 5

Результати дослідження впливу факторів на параметр «Непрозорість»

$X_1^H$	$X_1^C$	$X_1^B$	$X_2^O$	$X_2^H$	$X_2^B$	$X_3^H$	$X_3^C$	$X_3^B$
86,74	82,37	97,18	86,74	81,99	93,85	86,74	80,49	68,69
86,74	81,91	95,34	86,74	81,91	93,57	86,74	81,91	73,78
86,74	81,33	93,02	86,74	81,80	93,02	86,74	87,87	93,08
$X_4^H$	$X_4^C$	$X_4^B$	$X_5^O$	$X_5^H$	$X_5^B$	$X_6^H$	$X_6^C$	$X_6^B$
86,74	81,67	91,82	86,74	83,23	101,25	86,74	80,78	73,87
86,75	81,91	92,78	85,99	81,91	99,19	86,74	81,91	78,66
86,62	81,76	93,02	83,76	77,95	93,02	86,74	85,29	93,02
$X_7^H$	$X_7^C$	$X_7^B$	$X_8^O$	$X_8^C$	$X_8^B$	$X_9^H$	$X_9^C$	$X_9^B$
не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	86,74	81,61	87,83
не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	86,74	81,91	90,42
не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	не впливає	86,74	82,21	93,02
$X_{10}^H$	$X_{10}^C$	$X_{10}^B$	$X_{11}^O$	$X_{11}^H$	$X_{11}^B$	$X_{12}^H$	$X_{12}^C$	$X_{12}^B$
86,74	85,69	102,31	86,74	84,99	100,17	86,74	81,54	90,54
84,19	81,91	97,14	85,21	81,91	96,38	86,74	81,91	91,28
82,25	78,99	93,02	83,85	79,82	93,02	86,74	82,78	93,02

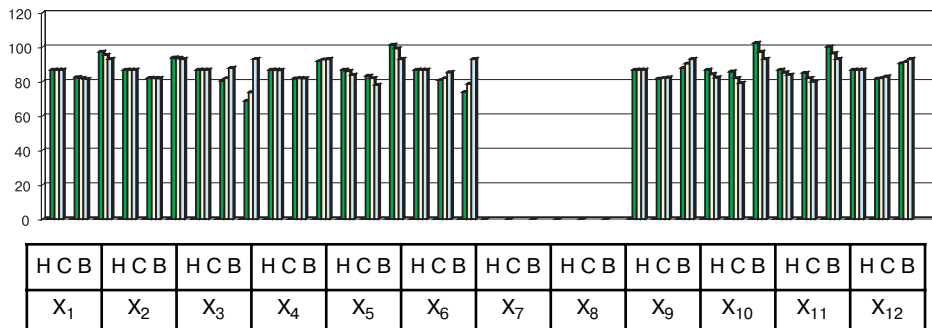
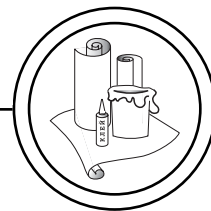


Рис. 2. Вивчення впливу факторів на параметр «Непрозорість»

плексного впливу на показник непрозорості паперу.

Останній висновок стосується результатів досліджень практично всіх математичних моделей, які наведені нижче.

*Математична залежність показника розривної довжини (р.д.) паперу від вхідних факторів*

Розроблена математична залежність має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 Y_{p.d.} = & 6611,36 - 5,57 \cdot 10^2 \cdot X_5^2 \cdot \\
 & \cdot X_5^2 \cdot X_7 \cdot X_{10} + 0,357 \cdot X_7 \cdot X_{10} \cdot X_{11} \cdot \\
 & \cdot X_{12} + 2,18 \cdot 10^1 \cdot X_1 \cdot X_3 + 4,966 \cdot X_2 \cdot \\
 & \cdot X_3^2 \cdot X_8 - 0,303 \cdot 10^{-1} \cdot X_4^3 \cdot X_{12} - \\
 & - 2,218 \cdot X_2 \cdot X_5 \cdot X_8 \cdot X_{11} \quad (2)
 \end{aligned}$$

На рис. 3 та в табл. 6 наведені порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Розривна довжина».

Аналіз результатів досліджень впливу факторів на величину параметра «Розривна довжина» був проведений, як і у вищенаведеній схемі, з врахуванням всіх табличних даних та графічних залежностей. Але з метою оптимізації обсягів статті деякі графічні та таб-

Таблиця 6  
Порівняльні характеристики моделі за параметром «Розривна довжина»

Y <sub>експер.</sub>	Y <sub>розрах.</sub>	e = Y - y	d = $\frac{e}{y} \cdot 100\%$
3600	3608,8	-8,778	-0,244
4200	4105,9	+94,095	+2,240
4300	4332,5	-32,542	-0,757
4500	4607,2	-107,21	-2,382
4900	4858,2	+41,806	+0,853
4908	4967,6	-59,624	-1,215
5266	5566,7	-300,74	-5,711
5680	5907,6	-227,64	-4,008
5758	5463,0	+295,01	+5,123
5830	5820,5	+9,533	+0,164
6051	6097,8	-45,959	-0,760
6062	5805,7	+9,068	+0,149
6120	6611,4	+314,33	+5,136
6620	6611,4	+8,636	+0,130
6850	6840,0	+10,025	+0,146

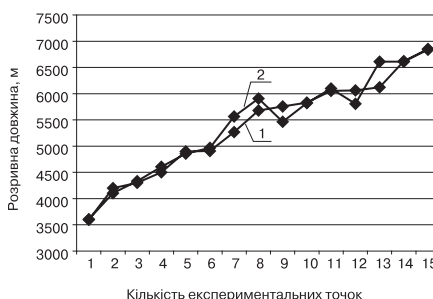


Рис. 3. Порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Розривна довжина»



личні дані не приводяться. Результати досліджень показують, що:

— на параметр оптимізації найбільш суттєво впливає такий фактор, як масова частка крохмалю в композиції паперової маси ( $X_5$ ). Тенденція його впливу особливо позначається за умов, коли значення інших факторів зафіксовані на позначці верхнього рівня. В такому (теоретично можливому) випадку збільшення вмісту крохмалю (з 0 % до 2 %) повинно значною мірою вплинути на величину розривної довжини;

— такі фактори, як масова частка глинозему ( $X_7$ ), щільність паперу ( $X_{10}$ ), ступінь помелу маси ( $X_{11}$ ) та середньомасова довжина волокна ( $X_{12}$ ) мають самостійний вплив на параметр «Розривна довжина». В досліджуваному інтервалі значень зростання показників цих факторів приводить до підвищення значення параметра. Така тенденція особливо проявляється, коли всі інші фактори зафіксовані на верхньому рівні;

— вплив таких факторів, як вміст в композиції листяної целюлози (СФАЛД) ( $X_2$ ), масова частка калію ( $X_3$ ), двоокису титану ( $X_4$ ) та

флокулянту ( $X_8$ ), що вводяться до паперової маси, проявляється комплексно, тобто на фоні зростання інших факторів;

— на параметр не мають суттєвого впливу такі фактори, як вміст в композиції паперової маси хвойної целюлози (СФАХД) ( $X_1$ ), масова частка введеного каніфольного клею ( $X_6$ ) та водаміну ( $X_9$ ). Незначний вплив такого фактора, як масова частка хвойної целюлози ( $X_1$ ) можливо пояснити лише свідомим застосуванням суміші СФАХД і СФАЛД і їх співвідношенням, що визначені з урахуванням досвіду виробництва і використання паперу і картону.

*Математична залежність показника масової частки золи паперу від вхідних факторів*

Розроблена математична залежність має такий вигляд:

Таблиця 7  
Порівняльні характеристики моделі за параметром «Масова частка золи»

$Y_{\text{експер.}}$	$Y_{\text{розрах.}}$	$e = Y - y$	$d = \frac{e}{y} \cdot 100\%$
0,25	0,294	-0,044	-17,573
1,70	2,940	-1,240	-72,949
2,40	2,464	-0,064	-2,682
2,40	2,280	+0,120	+5,019
3,40	3,649	-0,249	-7,334
4,20	4,760	-0,560	-13,339
4,70	4,085	+0,615	+13,085
4,70	4,150	+0,550	+11,712
4,80	4,785	+0,011	+0,231
4,90	3,809	+1,091	+22,269
7,10	7,426	-0,326	-4,591
8,30	8,522	-0,221	-2,668
9,70	9,326	+0,374	+3,858
12,00	11,963	+0,037	+0,305
16,00	16,094	-0,094	-0,585

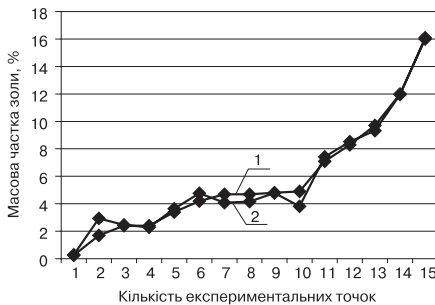
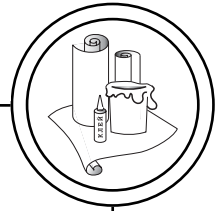


Рис. 4. Порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Масова частка золи»



$$\begin{aligned}
 Y_{\text{масова частка золи}} = & 3,092 + 0,212 \cdot \\
 & \cdot X_3 \cdot X_6^3 \cdot X_{10} - 0,319 \cdot 10^{-2} \cdot X_{10}^2 \cdot \\
 & \cdot X_{11}^2 + 0,574 \cdot 10^{-2} \cdot X_3^3 \cdot X_9 + 0,187 \cdot \\
 & \cdot 10^{-2} \cdot X_2 \cdot X_4 \cdot X_8 \cdot X_{12} + 0,510 \cdot 10^{-2} \cdot \\
 & \cdot X_2 \cdot X_6^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

На рис. 4 та в табл. 7 наведені порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Масова частка золи».

Аналіз результатів досліджень впливу факторів на величину параметра «Масова частка золи» проводився за схемою, яка описана вище, і показує:

— на параметр не мають суттєвого впливу такі фактори, як масова частка целюлози з хвойної (СФАХД) ( $X_1$ ) та листяної деревини (СФАЛД) ( $X_2$ ) в композиції паперової маси, вміст крохмалю ( $X_5$ ), а також масова доля глинозему ( $X_7$ );

— якщо значення всіх факторів зафіксувати на верхньому рівні, то це може призвести до значного зростання показника масової частки золи паперу за рахунок комплексного їх впливу;

— найбільш суттєво проявляється вплив таких факторів, як масова частка каоліну та каніфольного клею в композиції паперу. Тенденція їх впливу проявляється на фоні середнього та особливо верхнього рівнів значень інших факторів. В цьому випадку збільшення масової частки введеного до композиції паперу каоліну (з 0,4 % до 17 %) та каніфольного клею (з 0 % до 2,5 %) приводить до зростання масової частки золи паперу в декілька разів за рахунок зростання ступеня його утримання;

— такий фактор, як масова частка водаміну ( $X_9$ ) проявляє свій вплив на показник масової частки золи на фоні фіксації всіх інших факторів на верхньому рівні. За ра-

хунок збільшення масової частки водаміну (з 0 % до 0,3 %) можливе також зростання показника масової частки золи (майже вдвічі);

— особливим чином проявляє себе такий фактор, як ступінь помелу маси ( $X_{11}$ ). Збільшення ступеня помелу маси веде до зменшення масової частки золи паперу. Найбільше ця тенденція, знову ж таки, проявляється, коли значення всіх факторів фіксується на позначці, близькій до верхнього рівня;

— такі фактори, як наявність в композиції паперової маси целюлози листяної деревини (СФАЛД) ( $X_2$ ), вміст двоокису титану ( $X_4$ ), вміст флокулянту ( $X_8$ ), щільність паперу ( $X_{10}$ ) та середньомасова довжина волокна ( $X_{12}$ ) проявляють свій вплив комплексно, тобто на фоні зміни значення всіх факторів одночасно. Комплексний вплив факторів на масову частку золи проявляється при наближенні їх значень до верхнього рівня.

*Математична залежність показника білості паперу від вхідних факторів*

Розроблена математична залежність має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{білість}} = & 80,84 + 0,0871 \cdot X_3 \cdot X_5 \cdot \\
 & \cdot X_6^2 - 4,793 \cdot X_5 + 0,563 \cdot 10^{-1} \cdot X_3 \cdot \\
 & \cdot X_7^2 \cdot X_9 - 0,211 \cdot 10^{-2} \cdot X_3 \cdot X_{11} + \\
 & + 0,109 \cdot X_5^2 \cdot X_6^2 - 0,933 \cdot 10^{-1} \cdot X_3^2 \cdot \\
 & \cdot X_4 \cdot X_8 \quad (4)
 \end{aligned}$$

На рис. 5 та в табл. 8 наведені порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Білість».

Дослідження домінування факторів над параметром «Білість» проводились за схемою, яка описана вище. Аналіз результатів досліджень підтверджує значне співпадіння з висновками, наведеними в п. 1.3, а саме:



— серед факторів, які найбільш суттєво впливають на показник білості, слід виділити такі, як масова частка каоліну ( $X_3$ ), двоокису титану ( $X_4$ ), крохмалю ( $X_5$ ), каніфольного клею ( $X_6$ ), глинозему ( $X_7$ ) та водаміну ( $X_9$ ), що вводились до композиції паперу для забезпечення комплексу його механічних та друкарських властивостей. Їх вплив відчувається, коли всі інші фактори зафіксовані на верхньому рівні. Це приводить до зростання показника білості паперу;

— на параметр не мають суттєвого впливу такі фактори, як масова частка целюлози з хвойної (СФАХД) ( $X_1$ ) та листяної деревини (СФАЛД) ( $X_2$ ) в композиції паперової маси, щільність паперу ( $X_{10}$ ), а також середньо-масова довжина волокна ( $X_{12}$ ) в запропонованому інтервалі значень цих факторів.

*Математична залежність показника маси площі 1 м<sup>2</sup> паперу від вхідних факторів*

Розроблена математична залежність має такий вигляд:

$$Y_{\text{маса}} = 59,26 - 0,326 \cdot 10^{-3} \cdot X_{10} \cdot X_{11}^2 - 0,529 \cdot 10^{-2} \cdot X_5 \cdot X_6^2 \cdot X_{11} - 0,778 \cdot 10^{-2} \cdot X_3^3 \cdot X_9 - 0,778 \cdot 10^{-2} \cdot X_3^3 \cdot X_9 - 1,894 \cdot 10^{-7} \cdot X_4 \cdot X_{12}^3 + 5,275 \cdot 10^{-5} \cdot X_3^3 \cdot X_4 \quad (5)$$

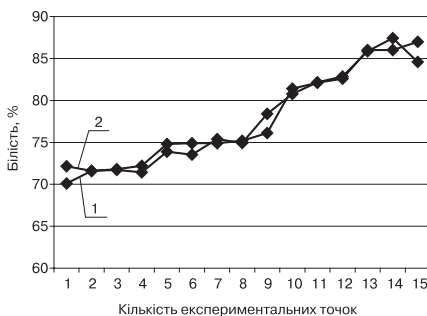


Рис. 5. Порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Білість»

На рис. 6 та в табл. 9 наведені порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Маса площі 1 м<sup>2</sup>».

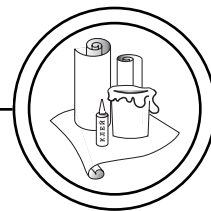
Дослідження впливу всіх факторів на параметр «Маса площі 1 м<sup>2</sup>» проводились за прийнятою в статті схемою. Аналіз результатів досліджень показує:

— в запропонованому діапазоні значень факторів на параметр «Маса площі 1 м<sup>2</sup>» не мають суттєвого впливу такі фактори, як масова частка целюлози з хвойної ( $X_1$ ) та листяної деревини ( $X_2$ ) в композиції паперової маси, а також ( $X_7$ ) — масова частка глинозему і ( $X_8$ ) — масова частка флокулянту, які вводяться до паперової маси для забезпечення умов проклеювання, оскільки маса 1 м<sup>2</sup> паперу задається експериментально;

— виходячи з виду графічних залежностей, фіксування всіх факторів на верхньому рівні повинне, у

Таблиця 8  
Порівняльні характеристики моделі за параметром «Білість»

$Y_{\text{експер.}}$	$Y_{\text{розрах.}}$	$e = Y - y$	$d = \frac{e}{y} \cdot 100\%$
70,1	72,151	-2,051	-2,296
71,6	71,597	+0,003	+0,005
71,8	71,722	+0,078	+0,108
72,2	71,438	+0,762	+1,055
74,8	73,889	+0,911	+1,218
74,9	73,531	+1,364	+1,828
74,9	75,387	-0,487	-0,650
75,2	74,919	+0,281	+0,374
76,1	78,396	-2,296	-3,017
81,4	80,776	+0,624	+0,767
82,1	82,168	-0,068	-0,083
82,6	82,865	-0,265	-0,320
86,0	85,853	+0,147	+0,171
86,0	87,412	-1,412	-1,642
87,0	84,597	+2,403	+2,762



відповідності з моделлю, а також з врахуванням комплексного впливу факторів, привести до зниження показника маси площі 1 м<sup>2</sup> паперу;

— найбільш суттєво проявляється вплив таких факторів, як масові частки каоліну (X<sub>3</sub>), та водаміну (X<sub>9</sub>) в композиції паперу. Тенденція їх впливу проявляється на фоні верхнього рівня значень інших факторів. В цьому випадку збільшення вмісту каоліну (з 0,4 % до 17 %) та водаміну (з 0 % до 0,3 %) приводить до зниження маси площі 1 м<sup>2</sup> паперу.

Зростання витрати наповнювача вище рівня 30 % приводить, на нашу думку, до зростання його втрат з підсітковою водою, а значить і до порушення структури паперового полотна. Крім того, показник маси паперу площею 1 м<sup>2</sup> встановлюється на відповідному рівні в залежності від композиції і

регулюється параметрами технологічного процесу виготовлення паперу.

*Математична залежність показника поверхневої вбирності паперу від вхідних факторів*

Розроблена математична залежність має такий вигляд:

$$Y_{\text{вбирність}} = 104,046 - 0,367 \cdot 10^{-2} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 \cdot X_7 + 0,446 \cdot 10^{-2} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 - 0,330 \cdot 10^{-1} \cdot X_3^2 \cdot X_7 \cdot X_9 + 4,256 \cdot X_4 \cdot X_9 - 0,301 \cdot 10^{-2} \cdot X_4^4 \quad (6)$$

На рис. 7 та в табл. 10 наведені порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Поверхнева вбирність паперу».

Дослідження впливу всіх факторів на параметр «Поверхнева вбирність паперу» проводились за схемою, яка описана вище. Аналіз результатів показує:

— найбільш суттєво проявляється вплив таких факторів, як масова частка крохмалю (X<sub>5</sub>), каніфольного клею (X<sub>6</sub>) та глинозему (X<sub>7</sub>) в композиції паперової маси. Тенденція їх впливу відчувається на фоні верхнього рівня значень інших факторів;

— одночасне фіксування інших факторів (крім (X<sub>5</sub>) та (X<sub>7</sub>) на міні-

Таблиця 9  
Порівняльні характеристики моделі за параметром «Маса площі 1 м<sup>2</sup>»

Y <sub>експер.</sub>	Y <sub>розрах.</sub>	e = Y - y	d = $\frac{e}{y} \cdot 100\%$
47,0	47,847	-0,847	-1,801
48,0	47,642	+0,358	+0,747
48,5	49,532	+1,764	+3,458
49,0	48,606	+0,394	+0,804
49,0	49,500	-0,500	-1,021
51,0	49,236	+1,764	+3,458
52,0	51,912	+0,088	+0,169
53,9	54,277	-0,377	-0,700
54,9	55,619	-0,719	-1,310
55,0	54,936	+0,064	+0,116
55,4	55,580	-0,180	-0,324
56,0	56,145	-0,145	-0,260
56,2	55,902	+0,298	+0,529
57,0	56,573	+0,427	+0,749
57,0	56,592	+0,408	+0,716



Рис. 6. Порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Маса площі 1 м<sup>2</sup>»



мальному, середньому та верхньому рівнях приводить до їх комплексного впливу на показник поверхневої вбирності паперу;

— введення мінерального наповнювача до композиції паперу сприяє створенню більш мікропористої структури паперу, що викликає деяке зниження величини поверхневої вбирності паперового полотна;

— досягнення максимальних значень таких факторів, як масова частка каніфольного клею, крохмалю, використання в експериментальних дослідженнях композиції з 100 % целюлози з хвойної деревини та підвищення щільності паперу вище величини 0,79 г/см<sup>3</sup> сприяє зниженню показника поверхневої вбирності паперу, тобто зростанню показника ступеня проклеювання.

*Використання результатів дослідження математичних моделей для пошуку оптимальної точки*

Проведені експериментальні дослідження математичних моделей (залежності 1—6) з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки дають змогу експе-

риментатору провести пошук таких значень вхідних факторів, які могли б забезпечити виробництво паперу для друку із заданими (в певних межах) показниками якості:

— розривна довжина — 4000—4200 м;

— масова частка золи — 16,5—17,3%;

— непрозорість — 90—94 %;

— білість — 86—92 %;

— маса площі 1 м<sup>2</sup> — 47,5—48,3 г;

— поверхнева вбирність паперу — 20—22 г/м<sup>2</sup>.

Аналіз вищенаведених показників якості паперу для друку показує, що поставлене завдання відноситься до класу непростижних технологічних задач. Але, враховуючи результати аналізу впливу окремих факторів на показники якості паперу, яким присвячена більша частина даної роботи, було запропоновано алгоритм, що дає можливість

Таблиця 10

Порівняльні характеристики моделі за параметром «Поверхнева вбирність паперу»

$Y_{\text{експер.}}$	$Y_{\text{розрах.}}$	$e = Y - y$	$d = \frac{e}{y} \cdot 100\%$
14,2	14,397	-0,197	-1,384
14,5	16,280	-1,781	-12,279
14,5	16,280	-1,781	-12,279
16,5	16,277	+0,223	+1,349
17,0	17,907	-0,907	-5,337
19,0	19,791	-0,791	-4,164
19,0	17,907	+1,093	+5,752
20,0	19,791	+0,209	+1,045
20,2	16,277	+3,923	+19,418
38,8	38,980	-0,180	-0,464
48,0	47,876	+0,124	+0,258
62,0	61,919	+0,209	+1,045
70,4	70,440	-0,040	-0,057
74,2	74,130	+0,070	+0,094
104,0	104,050	-0,046	-0,044

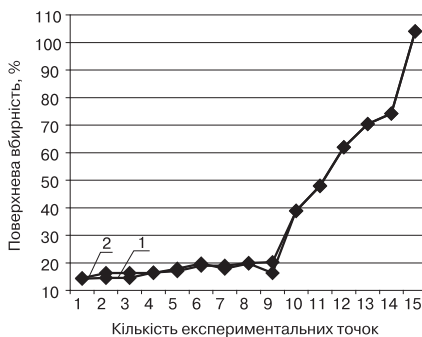
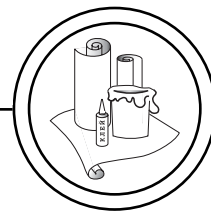


Рис. 7. Порівняльні характеристики експериментальних і розрахункових даних за параметром «Поверхнева вбирність паперу»



провести пошук величин факторів, які сприяли б досягненню мети досліджень.

Для першого із запропонованих варіантів значення вхідних факторів виглядали таким чином:

$$\begin{array}{lll} X_1 = 60 & X_2 = 40 & X_3 = 14 \\ X_4 = 2,5 & X_5 = 2 & X_6 = 2,5 \\ X_7 = 6 & X_8 = 0,02 & X_9 = 0,24 \\ X_{10} = 0,79 & X_{11} = 55 & X_{12} = 80 \end{array}$$

В цьому випадку пропонується врахувати ефект комплексного впливу факторів, які перебувають одночасно на верхньому рівні. Але, разом з тим, деяким з факторів, таким як:  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_9, X_{11}, X_{12}$  було присвоєне значення, що враховує результати попередніх експериментальних досліджень, які були проведені з використанням засобів обчислювальної техніки і відповідних математичних залежностей. Відповідні значення параметрів (показників якості паперу) були розраховані шляхом введення значень цих факторів у кожен з математичних моделей і мають такий вигляд:

$$\begin{array}{l} Y_{\text{розривна довж}} = 4042 \\ Y_{\text{мас. частка золи}} = 17,1 \\ Y_{\text{непрозорість}} = 90,4 \\ Y_{\text{білість}} = 93,5 \\ Y_{\text{маса}} = 42,8 \\ Y_{\text{вбирність}} = 12,9 \end{array}$$

Як видно із приведених результатів, не всі розраховані по моделям значення параметрів (показників якості паперу) відповідають поставленій меті.

Потрібно було віднайти такі «важелі» впливу, які дозволили б «підняти» масу площі  $1 \text{ м}^2$  паперу і показник поверхневої вбирності.

Після ретельного аналізу і осмислення певних взаємозалежностей, комплекс значень факторів, які були використані для введення

в математичні моделі, набув такого вигляду:

$$\begin{array}{lll} X_1 = 65 & X_2 = 35 & X_3 = 14 \\ X_4 = 2,5 & X_5 = 1,9 & X_6 = 2,5 \\ X_7 = 6 & X_8 = 0,02 & X_9 = 0,24 \\ X_{10} = 0,79 & X_{11} = 55 & X_{12} = 80 \end{array}$$

А відповідні значення параметрів (показників якості паперу) стали такими:

$$\begin{array}{l} Y_{\text{розривна довж}} = 5007 \\ Y_{\text{мас. частка золи}} = 16,9 \\ Y_{\text{непрозорість}} = 90,4 \\ Y_{\text{білість}} = 92,9 \\ Y_{\text{маса}} = 42,9 \\ Y_{\text{вбирність}} = 21,3 \end{array}$$

Аналіз приведених результатів показує, що головним в такому випадку є досвід експериментатора. Порівняно з попереднім варіантом результатів, лише показник поверхневої вбирності паперу «ввійшов» до встановленої зони значень та ще величина розривної довжини, навіть, перевищила значення, зафіксоване поставленою метою. Однак показник маси паперу  $1 \text{ м}^2$  є нижчим від запланованого: 42,9 замість 48  $\text{г/м}^2$ .

Враховуючи зазначені аргументи, було проведено пошук таких значень факторів, які поступово дозволили зблизитись зі значеннями параметрів (показників якості паперу) поставленої меті.

Не вдаючись в деталі пошуку, наводимо значення факторів, які мають забезпечити отримання потрібного результату:

$$\begin{array}{lll} X_1 = 65 & X_2 = 35 & X_3 = 14 \\ X_4 = 2,5 & X_5 = 1,9 & X_6 = 2,4 \\ X_7 = 6 & X_8 = 0,02 & X_9 = 0,24 \\ X_{10} = 0,60 & X_{11} = 42 & X_{12} = 80 \end{array}$$

А отримані в результаті відповідних розрахунків значення показ-





ників якості паперу мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} Y_{\text{розривна довж}} &= 4170 \\ Y_{\text{мас. частка золи}} &= 16,4 \\ Y_{\text{непрозорість}} &= 94,0 \\ Y_{\text{білість}} &= 92,0 \\ Y_{\text{маса}} &= 48,3 \\ Y_{\text{вбирність}} &= 21,3 \end{aligned}$$

### Висновки

Таким чином, створення та дослідження математичних моделей, а потім проведення аналізу впливу окремих факторів з використанням засобів обчислювальної техніки да-

ли можливість визначити умови виробництва паперу з заданими показниками якості.

Переваги такого підходу проявляються в значній економії числа експериментальних досліджень і часу на їх проведення, людських та матеріальних ресурсів і в цільовому підході до вирішення поставленої мети.

Експериментатору залишається в подальшому провести в лабораторних умовах незначний за обсягом експеримент, який повинен підтвердити правильність прийнятого рішення.

1. Коптюх Л. А. Состояние и перспективы целлюлозно-бумажной промышленности Украины // Целлюлоза. Бумага. Картон. — 2004. — № 2. — С. 16—19.
2. Коптюх Л. А. Створення конкурентоспроможного паперу для друку зниженої товщини і поверхневої щільності // Бумага. Картон. Канцтовава. — 2003. — № 1. — С. 2—3.
3. Коптюх Л. А. Конкурентоспособная бумага для печати пониженной толщины и поверхностной плотности // Мир бумаги. — М., 2003. — № 2. — С. 18—20.
4. Пат. 49567 України, Д21Н 11/02. Спосіб виготовлення паперу переважно для офсетного друку. Коптюх Л. А., Лозовик М. Т., Коновал М. І., Шевченко В. О., Кувелас Г. О., Радченко В. М. Заявка 2001129224 від 29.12.01. Опубл. 16.09.2002. Бюл. № 9. — 2002.
5. Коптюх Л. А., Глушкова Т. Г., Легкий В. Н. Волокниста композиція і її вплив на показник механічної міцності паперу для друку зниженої маси 1 м<sup>2</sup> // Технологія і техніка друкарства. — 2006. — № 1—2. С. 154—166.
6. Пат. №75549 України, Д21Н11/00 Процес виготовлення паперу для друку зі зниженою масою 1м<sup>2</sup>. Коптюх Л. А., Глушкова Т. Г., Легкий В. Н., Бутко Т. Л., Лозовик М. Т. Заявка №20041210900, Заявл.29.12.04. Опубл. 17.04.06, Бюл. № 4. 7. Кикоть В. С., Плосконос В. Г. Идентификация характеристик сложных проектируемых систем с использованием принципов самоорганизации и топологического метода анализа // Автоматика. — 1986. — № 3. — С. 34—42.

Надійшла до редакції 10.01.07