

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДВАРЮВАННЯ КОТОНІНОВМІСНОЇ ТКАНИНИ

В роботі наведено результати математичного моделювання технологічного процесу відварювання котоніновмісного текстильного матеріалу. За результатами досліджень, що базувалися на виробничих та лабораторних випробуваннях, проведено регресійний аналіз отриманих даних, одержані поверхні відгуку, які описують залежність якісних показників відвареної тканини від параметрів обробки.

Ключові слова: льон, котонін, відварювання, математичне моделювання, регресійний аналіз, поверхні відгуку.

OKSANA L. TKACHUK

Lutsk National Technical University

MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF COTON-CONTAINING FABRIC DECOTION

Flax is a very valuable raw material for making fabric. The processes of preparation of flax-containing textile material are multi-stage and energy-intensive. Therefore, the development of effective methods of preparation of flax-containing textile material is relevant.

In this work, the method of mathematical planning of the experiment conducted a study of the dependence of the breaking load, capillarity and the degree of whiteness of cotton-containing textile material on the concentration of components of the boiling bath. The research was carried out on a mixed polyester-cotton-linen fabric TPK-11 produced by the private joint-stock company "Edelvika" (Lutsk). Technological process of boiling was carried out periodic method on a painting-roller machine. After boiling, the tissue samples were bleached according to the recipe based on hydrogen peroxide under the same conditions. Evaluation of the quality of boiled fabric was performed on such indicators as capillarity, breaking load and degree of whiteness. Processing of research results was carried out in the program "MathCAD 15".

At the result regression equations and response surfaces was received. The analysis of the obtained results shows that the quality of preparation of mixed flax-containing fabric depends on the concentration of the components of the boiling bath, and these models allow to establish the optimal recipe regimes of the boiling process. The obtained data can be used to justify further research.

Keywords: flax, cotton, boiling, mathematical modeling, regression analysis, response surfaces.

Вступ

Ляне волокно є цінною сировиною для легкої промисловості, яка завдяки поєднанню ряду лише йому притаманних властивостей, не може бути замінена іншими видами натуральних волокон [1]. Унікальні властивості лляних волокон покращують споживчі властивості тканин, підвищують якість одягу, дозволяють відповідати новим тенденціям моди, а зовнішні недоліки стали перевагами, що доводять його натуральне походження. Зростаючий попит на вироби з льону потребує вдосконалення технологій його вирощування, переробки та оздоблення.

Найчастіше льон доповнює свої якості в сумішах з іншими волокнами. Мета створення сумішей – поєднання переваг різних видів волокнистих компонентів, що забезпечує функціональність тканин, практичність, комфорт в носінні, зручність у догляді та дозволяє досягати бажаної легкості тканин і виробів з них. При цьому натуральні волокна забезпечують гігієнічно важливі властивості і комфортні умови експлуатації виробів, а хімічні волокна і нитки покращують споживчі властивості: яскравість забарвлення, об'ємність, м'який гриф, незминальність, міцність, забезпечують нижчу вартість.

Підготовка льоноволокна для застосування в бавовняній галузі здійснюється шляхом його котонізації, тобто надання технологічних, фізико-механічних та естетичних властивостей, близьких до бавовни [2, 3].

За рахунок використання котонізованого лляного волокна, яке придатне для переробки в пряжу разом з бавовною, лавсаном та іншими волокнами шляхом застосування простих та економічних технологій бавовнопрядіння, можливо значно збільшити випуск недорогих та якісних льоновмісних матеріалів [4, 5].

Постановка завдання

Високий вміст в тканинах котонізованого льоноволокна і, як наслідок, нецелюлозних забарвлених домішок, вимагає особливих підходів до організації процесів підготовки і фарбування. Льон, як природне текстильне волокно, має складну структуру та будову. Присутність у лляному волокні значної кількості природних домішок, в тому числі лігніну, ускладнює обробку тканин із вмістом льону, робить процеси відварювання та вибілювання багатостадійними та енергозатратними [6].

У зв'язку з вищевикладеним, важливим і актуальним завданням є розробка ефективних технологічних процесів підготовки котоніновмісного текстильного матеріалу, зокрема оптимізації режимів відварювання, що забезпечить отримання якісного продукту з необхідними фізико-механічними показниками.

Метою даної роботи є дослідження методом математичного планування експерименту залежності розривального навантаження, капілярності і ступеня білості котоніновмісного текстильного матеріалу від концентрації компонентів відварювальної ванни.

Виклад основного матеріалу

Підготовка суворої платтяно-костюмної тканини арт. ТПК-11 “Оксамит” наступного сировинного складу: 50 % поліестер, 30 % бавовна, 20 % льон, здійснювалася в лабораторних умовах ПрАТ «Едельвіка» (м. Луцьк). Відварювання проводилося періодичним способом (на фарбувально-роликовій машині) за температури 95°C, одну годину, модуль ванни становив M=1:15. Після відварювання зразки відбілювали за рецептом на основі перекису водню в однакових умовах.

Оцінка ефективності застосування досліджуваних рецептур підготовки суворої тканини проводилася за такими показниками їх якості як капілярність (мм), розривальне навантаження (Н) та ступінь білості (%).

Математичні моделі, що описує залежність вихідних параметрів (розривального навантаження, капілярності та ступеня білості) y від вхідних параметрів x_1 (гідроксиду натрію – NaOH), x_2 (карбонату натрію – Na₂CO₃), x_3 (гідросульфату натрію – NaHSO₃) шукаємо у вигляді рівнянь регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коефіцієнти рівнянь регресії;

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \text{ – зв'язок між кодовими і натуральними значеннями факторів;}$$

x_i, X_i – кодоване та натуральне значення i -го фактора відповідно;

X_{i0} – натуральне значення i -го фактора на нульовому рівні;

ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактора.

Обробку результатів досліджень виконуємо у програмі «MathCAD 15».

Діапазон зміни вхідних факторів (їх концентрація у відварювальній ванні, % від маси тканини): X_1 (NaOH) від 3% до 7%; X_2 (Na₂CO₃) від 3% до 7%; X_3 (NaHSO₃) від 1% до 6%.

З метою нівелювання випадкових похибок відгуку досліди проводимо три рази $m=3$. Середні значення вихідних параметрів y_u в кожному досліді знаходять за формулою $\bar{y}_u = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m y_{uk}$, а оцінка

дисперсії – за формулою $s_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{uk} - \bar{y}_u)^2$ (табл. 1–3).

Таблиця 1

Результати досліджень розривального навантаження

Номер досліді	$X_1, \%$	$X_2, \%$	$X_3, \%$	Розривальне навантаження $y_R, \text{Н}$			Середнє арифметичне значення розривального навантаження $\bar{y}_u, \text{Н}$	Оцінка дисперсії S_u^2 в досліді, Н
				Повторюваність				
				y_{u_1}	y_{u_2}	y_{u_3}		
1	3	3	1	620	622	616	619,3	9,3
2	7	3	1	580	572	576	576,0	16,0
3	3	7	1	585	565	569	586,7	4,3
4	7	7	1	562	565	569	565,3	12,3
5	3	3	6	590	588	592	590,0	4,0
6	7	3	6	585	587	582	584,7	6,3
7	3	7	6	590	592	596	592,7	9,3
8	7	7	6	555	550	551	552,0	7,0

Таблиця 2

Результати досліджень капілярності

Номер досліді	$X_1, \%$	$X_2, \%$	$X_3, \%$	Капілярність $y_K, \text{мм}$			Середнє арифметичне значення капілярності $\bar{y}_u, \text{мм}$	Оцінка дисперсії S_u^2 в досліді, мм
				Повторюваність				
				y_{u_1}	y_{u_2}	y_{u_3}		
1	3	3	1	180	179	180	179,7	0,3
2	7	3	1	205	206	204	205,0	1,0
3	3	7	1	209	210	209	209,3	0,3
4	7	7	1	201	203	202	202,0	1,0
5	3	3	6	185	184	185	184,7	0,3
6	7	3	6	204	203	205	204,0	1,0
7	3	7	6	208	209	208	208,3	0,3
8	7	7	6	200	201	201	200,7	0,3

Результати досліджень ступеня білості

Номер досліджу	X_1 , %	X_2 , %	X_3 , %	Ступінь білості y_c , %			Середнє арифметичне значення ступеня білості \bar{y}_u , %	Оцінка дисперсії S_u^2 в досліді, %
				Повторюваність				
				y_{u_1}	y_{u_2}	y_{u_3}		
1	3	3	1	73,8	73,2	73,3	73,43	0,103
2	7	3	1	75,0	74,5	75,0	74,83	0,083
3	3	7	1	75,6	75,9	75,2	75,57	0,123
4	7	7	1	75,3	75,1	74,8	75,07	0,063
5	3	3	6	74,3	74,0	74,9	74,40	0,210
6	7	3	6	77,0	76,6	76,9	76,83	0,043
7	3	7	6	79,8	79,0	79,0	79,27	0,213
8	7	7	6	74,7	74,3	75,0	74,67	0,123

Для визначення відтворюваності дослідів визначаємо критерій Кохрена як відношення максимальної оцінки дисперсії $s_{u \max}^2$ до суми всіх оцінок дисперсії:

$$G = s_{u \max}^2 / \left(\sum_{u=1}^n s_u^2 \right), \tag{2}$$

Умова відтворюваності дослідів:

$$G \leq G(q_{\text{від}}; n; \nu_u), \tag{3}$$

де $G(q_{\text{від}}; n; \nu_u)$ – критичне значення критерію Кохрена, що визначається залежно від рівня значущості $q_{\text{від}}$, числа незалежних оцінок дисперсії n та числа ступенів вільності кожної оцінки $\nu_u = m - 1$. Для $n = 8$, $m = 3$, $q_{\text{від}} = 0,05$ значення критерію Кохрена $G(q_{\text{від}}; n; f_u) = 0,5157$ [7].

Критерій Кохрена, визначений за формулою (2), для досліджень: розривального навантаження $G = 0,362 < 0,5157$, капілярності $G = 0,281 < 0,5157$, ступеня білості $G = 0,317 < 0,5157$, отже умова відтворюваності дослідів (3) виконується в усіх випадках.

Дисперсія відтворюваності визначається за формулою:

$$s_{\text{від}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n s_u^2, \tag{4}$$

з числом ступенів вільності $\nu_{\text{від}} = n(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$.

Дисперсія відтворюваності визначена за залежністю (4) для досліджень: розривального навантаження $s_{\text{від}}^2 = 88,278$, капілярності $s_{\text{від}}^2 = 0,444$, ступеня білості $s_{\text{від}}^2 = 0,018$.

Коефіцієнти рівнянь регресії (1) знаходимо за формулами:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n \bar{y}_u; \\ b_i &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u, \quad i = 1, 2, 3; \\ b_{ij} &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u, \quad i, j = 1, 2, 3, i \neq j; \\ b_{ijl} &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} x_{lu} \bar{y}_u, \quad i = 1, j = 2, l = 3 \end{aligned} \right\}, \tag{5}$$

Перевірку гіпотези про значущість коефіцієнтів рівняння регресії проводять за критерієм Стьюдента:

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= \frac{b_0}{s(b)}; \\ t_i &= \frac{|b_i|}{s(b)}, \quad i = 1, 2, 3; \\ t_{ij} &= \frac{|b_{ij}|}{s(b)}, \quad i, j = 1, 2, 3, i \neq j; \\ t_{ijl} &= \frac{|b_{ijl}|}{s(b)}, \quad i = 1, j = 2, l = 3 \end{aligned} \right\}, \tag{6}$$

де – дисперсія оцінки коефіцієнтів. Для досліджень: розривального навантаження $s^2(b) = 1,918$,

капілярності $s^2(b) = 0,136$, ступеня білості $s^2(b) = 0,027$.

Результати розрахунків за формулами (5) та (6) представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Коефіцієнти рівнянь регресії та значення критерію Стьюдента								
Розривальне навантаження								
Коефіцієнт	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
Значення коефіцієнта	583,33	-13,83	-9,17	-3,50	-1,67	2,33	1,67	-7,17
Критерій Стьюдента	304,15	7,21	4,78	1,83	0,87	1,22	0,87	3,73
Капілярність								
Коефіцієнт	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
Значення коефіцієнта	199,21	3,71	5,88	0,21	-7,46	-0,79	-0,79	0,71
Критерій Стьюдента	1464	27,25	43,17	1,53	54,81	5,82	5,82	5,21
Ступінь білості								
Коефіцієнт	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
Значення коефіцієнта	75,51	-0,16	0,63	0,78	-1,12	-0,38	0,04	-0,64
Критерій Стьюдента	2762	5,79	23,16	28,65	40,84	14,02	1,52	23,47

Якщо значення критерію Стьюдента перевищує значення $t_{kp} = 2,119$ (для числа ступенів вільності $\nu_{\text{віль}} = 16$ і рівня значущості $q_{\text{віль}} = 0,05$) [7], то оцінку відповідного коефіцієнта рівнянь регресії вважають значущою, в іншому разі значення відповідного коефіцієнта рівняння регресії приймають рівним нулю.

З врахуванням зазначеного рівняння регресії у кодованих факторах запишуться:

– для розривального навантаження:

$$y_R(x_1, x_2, x_3) = 583,33 - 13,83x_1 - 9,17x_2 - 7,17x_1x_2x_3; \quad (7)$$

– для капілярності:

$$y_K(x_1, x_2, x_3) = 199,21 + 3,71x_1 + 5,88x_2 - 7,46x_1x_2 - 0,79x_1x_3 - 0,79x_2x_3 + 0,71x_1x_2x_3; \quad (8)$$

– для ступеня білості:

$$y_C(x_1, x_2, x_3) = 75,51 - 0,16x_1 + 0,63x_2 + 0,78x_3 - 1,12x_1x_2 - 0,38x_1x_3 - 0,64x_1x_2x_3. \quad (9)$$

Врахувавши зв'язок між кодованими і натуральними факторами (2.17) отримаємо рівняння регресії у натуральних факторах:

– для розривального навантаження:

$$y_R(X_1, X_2, X_3) = 703,54 - 19,46X_1 - 17,13X_2 - 17,92X_3 + 2,51X_1X_2 + 3,58X_1X_3 + 3,58X_2X_3 - 0,72X_1X_2X_3; \quad (10)$$

– для капілярності:

$$y_K(X_1, X_2, X_3) = 116,90 + 12,97X_1 + 14,05X_2 + 3,35X_3 - 2,11X_1X_2 - 0,51X_1X_3 - 0,51X_2X_3 + 0,07X_1X_2X_3; \quad (11)$$

– для ступеня білості:

$$y_C(X_1, X_2, X_3) = 70,52 + 0,46X_1 + 0,59X_2 - 0,91X_3 - 0,05X_1X_2 + 0,24X_1X_3 + 0,32X_2X_3 - 0,06X_1X_2X_3. \quad (12)$$

Для перевірки адекватності отриманих математичних моделей, обраховуємо значення вихідних параметрів за рівняннями регресії (10-12). Результати заносимо в табл. 5.

Адекватність отриманого математичного опису (рівнянь регресії) дослідним даним перевіряється за критерієм Фішера $F = s_{ad}^2 / s_{\text{віль}}^2$, якщо $s_{ad}^2 > s_{\text{віль}}^2$ або $F = s_{\text{віль}}^2 / s_{ad}^2$, якщо $s_{ad}^2 < s_{\text{віль}}^2$, де s_{ad}^2 – дисперсія

адекватності $s_{ad}^2 = \frac{m}{n-d} \sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2$, d – число значущих коефіцієнтів рівняння регресії; \tilde{y}_u – величина відгуку, отримана в результаті підстановки відповідних величин факторів x_i в рівняння регресії.

Вихідні параметри розраховані за рівняннями регресії

Розривальне навантаження								
Номер досліді u	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення \tilde{y}_u	613,50	571,50	580,83	567,50	599,17	585,83	595,17	553,17
Капілярність								
Номер досліді u	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення \tilde{y}_u	179,88	205,21	209,54	202,21	184,46	203,79	208,13	200,46
Ступінь білості								
Номер досліді u	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення \tilde{y}_u	73,39	74,79	75,61	75,11	74,44	76,88	79,23	74,63

Дисперсія адекватності математичного опису для розривального навантаження $s_{ad}^2 = 139,50$, для капілярності $s_{ad}^2 = 1,04$, для ступеня білості $s_{ad}^2 = 0,04$. Критерій Фішера для розривального навантаження $F = 1,58$, для капілярності $F = 2,35$, для ступеня білості $F = 2,33$.

Математичний опис вважається адекватним, якщо $F < F(q_{\epsilon; v_{ad}; v_{\epsilon}})$, де v_{ad} – число ступенів вільності дисперсії адекватності $v_{ad} = n - d$.

Математичний опис адекватний у всіх трьох випадках, так як для розривального навантаження $1,58 < F(0,05; 4; 16) = 3,01$, для капілярності $2,35 < F(0,05; 1; 16) = 4,49$, для ступеня білості $2,33 < F(0,05; 1; 16) = 4,49$.

Поверхні відгуку, побудовані за рівнянням регресії у натуральних факторах (10)–(12) представлено на рис. 1–3 відповідно.

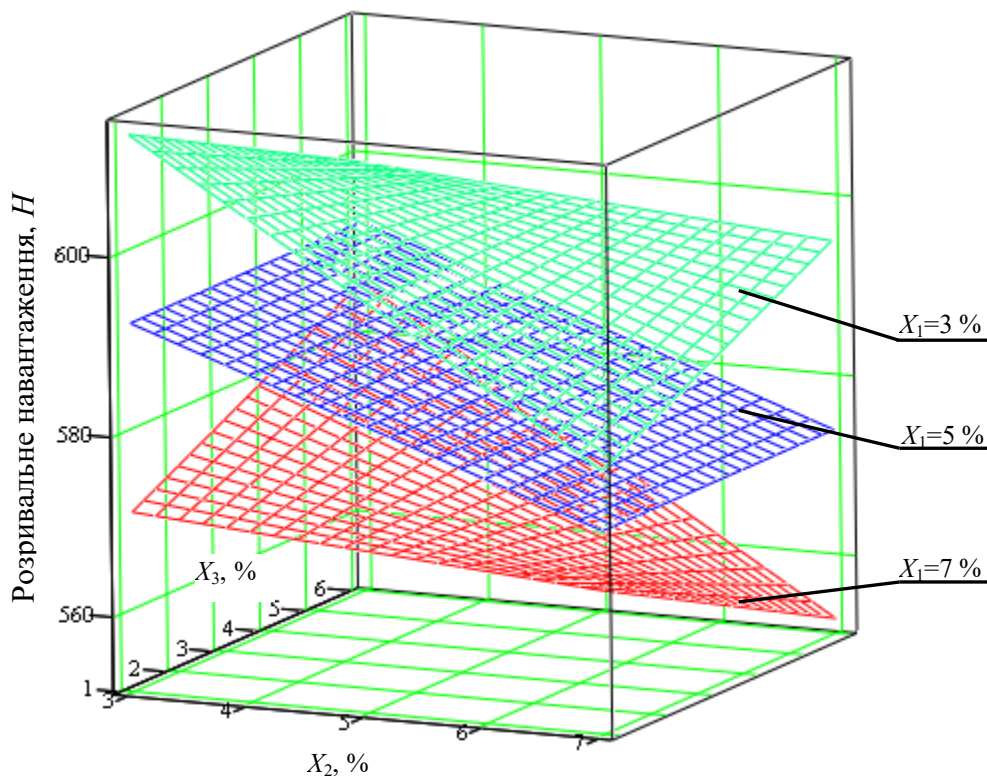


Рис. 1. Залежність розривального навантаження від концентрацій X_1 (NaOH), X_2 (Na_2CO_3), X_3 (NaHSO_3)

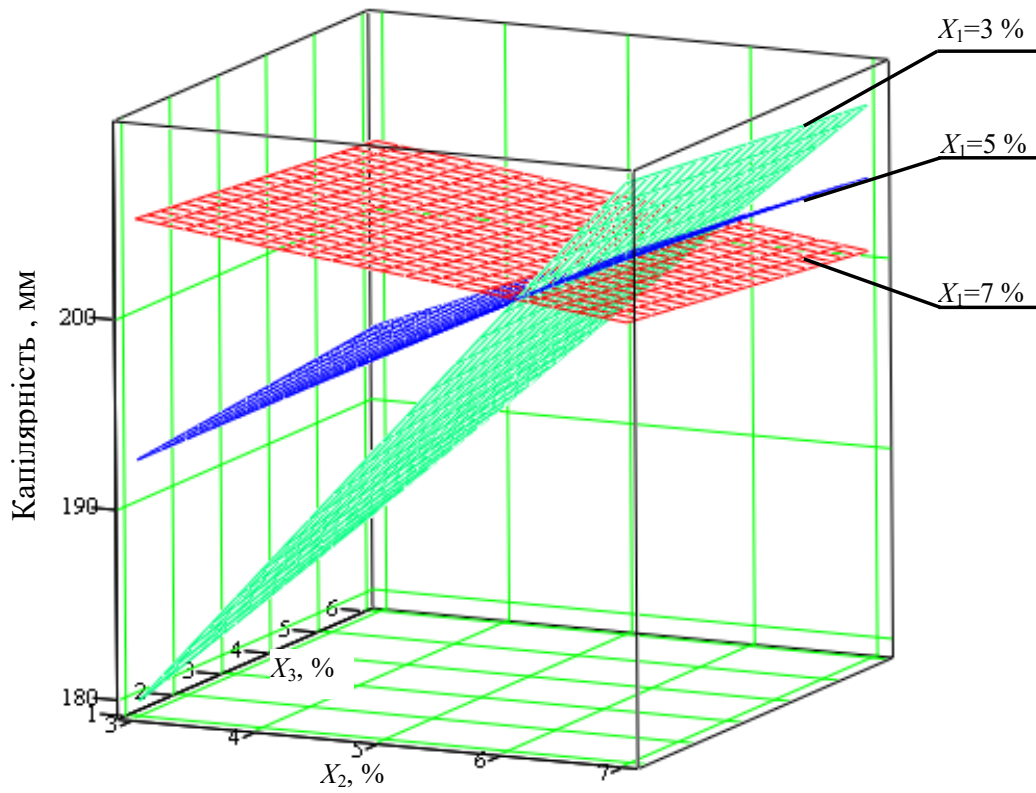


Рис. 2. Залежність капілярності від концентрацій X_1 (NaOH), X_2 (Na₂CO₃), X_3 (NaHSO₃)

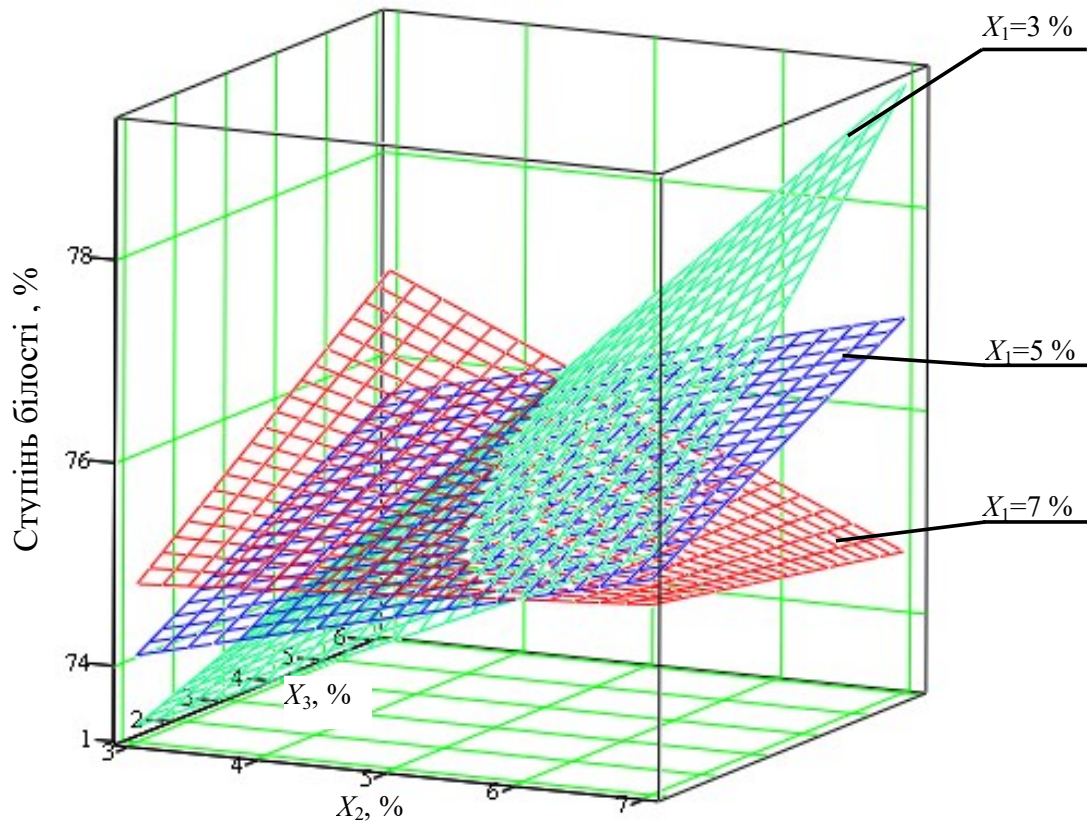


Рис. 3. Залежність ступеня білості від концентрацій X_1 (NaOH), X_2 (Na₂CO₃), X_3 (NaHSO₃)

Аналіз отриманих регресійних рівнянь і поверхонь відгуку свідчить, що показники якості підготовки сумішевої льоновомісної тканини залежать від концентрації компонентів відварювальної ванни, а дані моделі дозволяють встановити оптимальні рецептурні режими процесу відварювання.

Висновки

За допомогою математичного моделювання технологічного процесу відварювання котоніновомісної тканини отримано залежності вихідних параметрів – показників якості готової тканини (розривального навантаження, капілярності та ступеня білості) від концентрації компонентів відварювальної ванни. Дані моделі дозволяють оптимізувати рецептурні склади для відварювання котоніновомісного текстильного матеріалу й одержати продукт з потрібними якісними показниками за найменших затрат.

Література

1. Кобяков С. М. Усовершенствование технологического процесса подготовки льняного волокна к кotonизации / С.М. Кобяков // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2013. – № 25. – С. 28–31.
2. Гончаров А. И. Опыт и перспективы развития льноиндустрии в республике Беларусь / А.И. Гончаров, Ю.В. Барабаш // Текстильная промышленность. – 2002. – № 3.
3. Савчук А. Н. Котонізація льону – майбутнє та сучасне / А. Н. Савчук, Л. А. Чурсіна // Легка промисловість. – 2006. – № 4. – С. 56.
4. Мартосенко М. Г. Новий асортимент одягових котоніновомісних трикотажних полотен / М.Г. Мартосенко, Б. Д. Семак // Вісник ЛТЕУ. Технічні науки. – 2009. – № 10.
5. Фомченкова Л.И. Рынок льняных тканей и льноволокна / Л.И. Фомченкова // Текстильная промышленность. – 2003. – № 3. – С. 85–87.
6. Кричевский Г.Е. Химическая технология текстильных материалов : учебник для вузов : в 3-х томах. Том 1 / Кричевский Г.Е. – М. : РЗИТЛП, 2000. – 436 с.
7. Сенкевич А.Ю. Математическое моделирование автоматизированных систем контроля и управления : метод. указание / А.Ю. Сенкевич. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 44 с.

References

1. Kobyakov S. M. Usovershenstvovanie tehnologicheskogo processa podgotovki lnyanogo volokna k kotonizatsii / S.M. Kobyakov // Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. – 2013. – № 25. – S. 28–31.
2. Goncharov A. I. Opyt i perspektivy razvitiya lnoindustrii v respublike Belarus / A.I. Goncharov, Yu.V. Barabash // Tekstilnaya promyshlennost. – 2002. – № 3.
3. Savchuk A. N. Kotonizatsiia lonu – maibutnie ta suchasne / A. N. Savchuk, L. A. Chursina // Lehka promyslovist. – 2006. – № 4. – S. 56.
4. Martosenko M. H. Novyi asortyment odiahovykh kotoninovmisykh trykotazhnykh poloten / M.H. Martosenko, B. D. Semak // Visnyk LTEU. Tekhnichni nauky. – 2009. – № 10.
5. Fomchenkova L.I. Rynok lnyanyh tkaney i lonovolokna / L.I. Fomchenkova // Tekstilnaya promyshlennost. – 2003. – № 3. – S. 85–87.
6. Krichevskij G.E. Himicheskaya tehnologiya tekstilnyh materialov : uchebnik dlya vuzov : v 3-h tomah. Tom 1 / Krichevskij G.E. – M. : RZITLP, 2000. – 436 s.
7. Senkevich A.Yu. Matematicheskoe modelirovanie avtomatizirovannykh sistem kontrolya i upravleniya : metod. Ukazanie / A.Yu. Senkevich. – Tambov : Izd-vo Tamb. gos. tehn. un-ta, 2004. – 44 s.

ТКАЧУК О.Л. ORCID ID: 0000-0001-5135-4560 tkachuk18oksana@gmail.com

Надійшла/Paper received : 08.04.2021 р. Надрукована/Printed : 02.06.2021 р.