

УДК 675.023-83

В.І.ЛІЩУК, канд. техн. наук, професор, Т.Г.ВОЙЦЕХОВСЬКА, канд. фіз.-мат. наук, доцент, А.Г.ДАНИЛКОВИЧ, д-р техн. наук, професор (Київський національний університет технологій та дизайну)

Використання багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимальної ділянки процесу зоління

The method of multicriterial optimization of unhearing - liming raw cattlehides process has been developed. The application of this method made it possible to establish the parameters of technological process for blosse formation with moderate tumour and to minimize the raw material expenditures per unit of leather area.

Оптимізація хіміко-технологічних процесів з кількома вихідними змінними вирішується, в основному, завдяки розв'язанню завдання з одним критерієм і відповідними обмеженнями. З цією метою залежно від геометрії поверхні відгуку та характеру обмежень для оптимізації рекомендується застосовувати методи невизначених множників Лагранжа, лінійного і нелінійного програмування, рідж-аналізу та ін. Однак при цьому виникають значні труднощі, пов'язані з пошуком умовного екстремуму, наприклад, на основі невизначених множників Лагранжа через необхідність розв'язання системи нелінійних рівнянь [1].

Одним з найраціональніших способів розв'язання завдання оптимізації технологічного процесу, який має, в основному, кілька вихідних змінних, є використання багатокритеріального підходу, який базується на розрахунку узагальненої функції бажаності за отриманими поліноміальними моделями [2, 3]. Такий підхід дає змогу встановити оптимальний режим досліджуваного процесу з врахуванням вимог до використаних вихідних змінних. При цьому узагальнений критерій оптимізації розраховують на основі функції Харінгтона. В загальному вигляді завдання оптимізації полягає у знаходженні таких значень параметрів технологічного процесу, які відповідають компромісним та бажаним значенням вихідних змінних:

$$Y^* = \text{comp } y_j(x_i).$$

Незважаючи на те, що процес лужної обробки шкіряної сировини, пов'язаний з видаленням з шкір тварин волосу й епідермісу, глобулярних білків, мукополісахаридів і частково жирних включень та розпушенням пучків колагенових волокон (зоління), раніш вивчали, застосовуючи системи автоматичного планування і обробки експериментальних даних на СМ ЕОМ [4], однак існуючий тоді підхід полягав тільки у дослідженні отриманих поліномів за впливом основних параметрів процесу на окремі вихідні змінні без їх аналізу в компромісній ділянці.

Об'єкт і методи дослідження

Об'єктом є дослідження процесу вапняно-сульфідного зоління шкіряної сировини великої рогатої худоби (ВРХ). До стадії зоління шкіряну сировину обробляли в лабораторному барабані технологічним розчином з вмістом карбонату натрію, неіоногенної поверхнево-активної речовини, ферментного препарату з додаванням незначної кількості гідросульфід натрію для підготовки шкір до відділення волосяного покриву. На стадії зоління зразки шкір обробляли гідроксидом кальцію і

аміним препаратом (його дозування було однаковим для усіх варіантів обробки) з подальшим додаванням гідросульфід та сульфід натрію.

Попередніми дослідженнями двоступеневої технології зневолошування-зоління чорнорябих шкір ВРХ в режимі технології [5] з різними співвідношеннями сульфід та гідросульфід натрію в перерахунку на S^{2-} (табл. 1), доведено, що їх доцільно використовувати у співвідношенні 1:1. Збільшення витрати сульфід натрію викликає надмірну бубняву, а це неодмінно призводить до втрати площі готової шкіри, його ж зменшення — до неповного зневолошування і недостатньої бубняви.

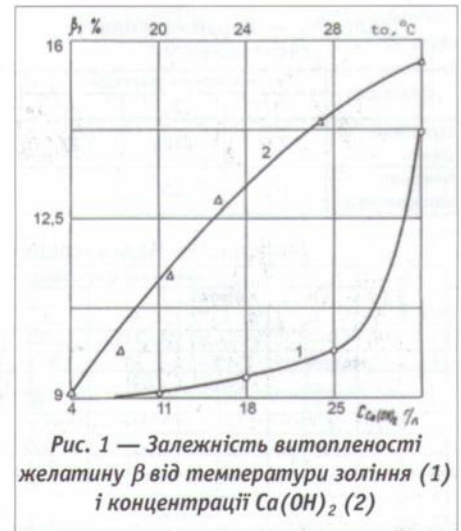
В подальших дослідженнях вапняно-сульфідного зоління шкір ВРХ провадили за співвідношення вода-сировина 0.8:1 і за температури процесу — 28...29°C. Це пов'язано з тим, що за вищої температури і концентрації гідроксиду кальцію 25 г/л відбувається руйнування між- і внутрішньомолекулярних зв'язків макромолекул колагену, про що свідчить різке зростання виплавлення желатину (див. рис. 1) і вмісту білкових речовин у відпрацьованому зольному розчині, а за нижчої температури сповільнюється процес розпушення білкової структури, тобто подовжується технологічний процес. Через 2 год лужної обробки видалася волосяний покрив і для подальшого зоління співвідношення вода-сировина доводили до 1:1, а сульфід натрію з гідроксидом кальцію — до заданої планом експерименту витрати.

Для дослідження режиму процесу зоління на його ефективність, технологічними факторами, що впливають на цей процес, вибрано загальну витрату сульфідів у рівних співвідношеннях сульфід та гідросульфід натрію в перерахунку на аніон S^{2-} (X_1 , % від маси сировини), а також витрату гідроксиду кальцію в перерахунку на катіон Ca^{2+} (X_2 , % від маси сировини) і тривалість зоління (X_3 , год).

Для постановки експерименту використано 20 дослідних партій по 8 зразків у кожній розміром 150x160 мм, товщиною 3...3,5 мм, які отримано з чепрачної топографічної ділянки двох шкір бичини легкої м'якросолоної консервування. При цьому зразки комплектували в партії за методом асиметричної бахроми [6].

ТАБЛИЦЯ 1 — Вплив гідросульфід натрію на зневолошування-зоління шкір ВРХ

Співвідношення $Na_2S:NaHS$ за S^{2-}	Ступінь бубняви, %	Зневолошування
1.0	27	повне
0.75 : 0.25	24	- // -
0.5 : 0.5	21	- // -
0.25 : 0.75	17	неповне



Підшкірну клітковину досліджуваних шкір видаляли на стругальній машині, а обробку кожної партії зразків закінчували хромовим дубленням. Після пролежування і віджимання зразки двоїли (товщина 1,5 мм) і доводили до готової шкіри за технологією виробництва еластичної шкіри [7].

Ефективність процесу визначали за витратою шкіряної сировини на 1 м² шкіри — y_1 , кг/м²; ступенем бубняви голини — y_2 , % від маси парної сировини; видовження при напруженні 9,8 МПа — y_3 , %.

Багатокритеріальна оптимізація процесу зоління шкіряної сировини полягала в реалізації спочатку повного факторного експерименту типу 2³, побудови його до рототабельного плану Бокса-Хантера 2-го порядку з 6-тю експериментальними точками в центрі плану і зірковим плечем 1.682 та проведення регресійного аналізу поліноміальних моделей з подальшими розрахунками за розробленою програмою. Оптимізацію процесу зоління провадили скануванням з уточненням координат точки оптимуму методом Гауса-Зейделя і побудовою оптимальної ділянки.

Постановка завдання

Мета роботи — встановлення оптимальної витрати сульфідів та гідросульфід натрію, гідроксиду кальцію і тривалості процесу зоління шкіряної сировини ВРХ методом багатокритеріальної оптимізації.

Результати та їх обговорення

Для отримання регресійних рівнянь залежності $\hat{y}_j = f(x_i)$ при $i=3$ встановлено нульовий рівень вибраних факторів та їх інтервал варіювання (див. табл. 2). Результати експерименту за центральним композиційним рототабельним планом (ЦКРП) наведено в табл. 3.

Результати комп'ютерних розрахунків, похибки експерименту, значущості коефіцієнтів, отриманих регресійних рівнянь та адекватність їх експериментальним даним наведено в табл. 4 і 5.

Оскільки розрахункові значення критерію Фішера є меншими за їх табличні значення (за рівня значущості 0,05), отримані моделі адекватно описують досліджений процес зоління шкіряної сировини.

ТАБЛИЦЯ 2 — Параметри плану експерименту

Параметр	Значення фактору		
	X ₁	X ₂	X ₃
Нульовий рівень	0.74	43466	12
Інтервал варіювання	0.2	.22	4

ТАБЛИЦЯ 3 — План експерименту і отримані вихідні змінні

Номер*	Значення факторів процесу						Вихідна змінна		
	кодовані			натуральні			y ₁	y ₂	y ₃
	x ₁	x ₂	x ₃	X ₁	X ₂	X ₃			
1	-1	-1	-1	0.54	0.97	8	7.21	14	12
2	+1	-1	-1	0.94	0.97	8	6.93	19	18
3	-1	+1	-1	0.54	1.41	8	6.78	17	21
4	+1	+1	-1	0.94	1.41	8	6.71	23	27
5	-1	-1	+1	0.54	0.97	16	6.98	20	20
6	+1	-1	+1	0.94	0.97	16	6.67	25	26
7	-1	+1	+1	0.54	1.41	16	6.72	24	29
8	+1	+1	+1	0.94	1.41	16	6.63	29	38
9	-1.682	0	0	0.4036	1.19	12	6.87	17	19
10	+1.682	0	0	1.0764	1.19	12	6.77	26	34
11	0	-1.682	0	0.74	0.81996	12	6.74	19	21
12	0	+1.682	0	0.74	1.56004	12	6.45	24	39
13	0	0	-1.682	0.74	1.19	5.272	7.03	15	17
14	0	0	+1.682	0.74	1.19	18.728	6.46	23	38
15	0	0	0	0.74	1.19	12	6.57	20.5	34
16	0	0	0	0.74	1.19	12	6.44	21.5	35
17	0	0	0	0.74	1.19	12	6.5	21	37
18	0	0	0	0.74	1.19	12	6.45	20	35
19	0	0	0	0.74	1.19	12	6.55	21.5	32
20	0	0	0	0.74	1.19	12	6.59	21	33

* — експериментальної точки

ТАБЛИЦЯ 4 — Коефіцієнти моделей і розрахункові значення критерію Стюдента

Номер коефіцієнта	Модель ŷ ₁		Модель ŷ ₂		Модель ŷ ₃	
	b ₁	t _p	b ₁	t _p	b ₁	t _p
	1	-0.0672783	3.9359818	2.6471622	16.7287254	3.8256335
2	-0.1053295	6.1620855	1.7149391	10.8375463	5.0744605	10.7038536
3	-0.1163520	6.8069372	2.8171909	17.8032207	5.1506805	10.8646288
4	0.0537500	1.4098557	0.1250000	0.3541688	0.3750000	0.3546497
5	-0.0062499	0.1639341	-0.1250000	0.3541688	0.3750000	0.3546497
6	0.0437500	1.1475559	0.1250000	0.3541688	0.3750000	0.3546497
7	0.1277920	13.4531116	0.3600024	4.0938210	-3.5645204	13.5298347
8	0.0480732	5.0608335	0.3600043	4.0938425	-2.3244386	8.8228617
9	0.1012196	10.6557360	-0.5257660	5.9788260	-3.2102084	12.1849747

Примітка. b_i — коефіцієнти моделей в кодованих факторах (світлим курсивом виділено незначущі), t_p — розрахункове значення критерію Стюдента.

ТАБЛИЦЯ 5 — Оцінка адекватності моделей експериментальним даним

Показник	Модель		
	ŷ ₁	ŷ ₂	ŷ ₃
Похибка експерименту — s ² _{експ}	3.98668 × 10 ⁻³	.3416666	3.066667
Критерій Стюдента табличний — t _T (5, 5%)	2.571	2.571	2.571
Дисперсія адекватності — s ² _{ад}	1.90399 × 10 ⁻²	.9904564	11.96604
Критерій Фішера розрахунковий — F _p	4.77588	2.898897	3.90197
табличний — F _T (f _{ад} , f ₀ , 5%)	4.82 (8; 5)	4.82 (8; 5)	4.82 (8; 5)

Після обробки вихідних змінних отримано такі регресійні рівняння, які адекватно з погляду експериментальної ситуації описують процес зоління шкіряної сировини ВРХ:

$$\hat{y}_1 = 6.51346 - 6.727833 \cdot 10^{-2} x_1 - .1053295 x_2 - .116352 x_3 + .127792 x_1^2 + .0480732 x_2^2 + .1012196 x_3^2; \quad (1)$$

$$\hat{y}_2 = 20.89248 + 2.647162 x_1 + 1.714939 x_2 + 2.817191 x_3 + .3600024 x_1^2 + .3600043 x_2^2 - .525766 x_3^2; \quad (2)$$

$$\hat{y}_3 = 34.45781 + 3.825634 x_1 + 5.074461 x_2 + 5.150681 x_3 - 3.56452 x_1^2 - 2.324439 x_2^2 - 3.210208 x_3^2; \quad (3)$$

де ŷ_j — прогнозовані значення вихідної змінної за j-ю моделлю.

Отримані моделі містять квадратичні ефекти і не можуть мати одного рішення, тому доцільно порівняти однофакторні функції ŷ_{min} і ŷ_{max}, побудовані в двох експериментальних варіантах. Для цього в розрахунковій точці ŷ_{min} з координатами X_{1min}...X_{jmin}...X_{imn}, один фактор послідовно вважали змінним, а решту — постійними; те саме в розрахунковій точці ŷ_{max}. При цьому ранжування ведеться за найбільшим розмахом Δy однофакторних залежностей у межах дослідженої ділянки факторного простору в обох зонах. Після послідовного табулювання однофакторних залежностей в розрахункових точках мінімального і максимального значень вихідної змінної з фіксацією решти параметрів на відповідних екстремальних рівнях, отримуємо графіки в координатах y — x_i (рис. 2).

Як видно з рис. 2 за умов експерименту, як в зоні мінімуму, так і в зоні максимуму, найбільший вплив на вихідну змінну чинить тривалість зоління, найменший на зміну витрати сировини на одиницю площі та ступеню бубняви — витрата гідроксиду кальцію, а на видовження шкіри при напруженні 9,8 МПа — витрата сульфідів натрію.

Оцінку одночасного впливу досліджених факторів на вихідну змінну провадили на основі загальних моделей другого порядку, з яких отримано «квазіоднофакторні» залежності від x_i типу W_i = (b_i + b_{ij}x_j)x_i + b_{ii}x_i², тобто кожна отримана «вирізка» із повної поліноміальної моделі містить тільки ефекти з індексом щодо фактора, який аналізується. При цьому вплив кожного фактора доцільно провести порівняльним аналізом однофакторних залежностей W_i = f(x_i), стабілізуючи решту факторів на нижньому, нульовому і верхньому рівнях.

Так, для вихідної змінної y₁ матимемо:

$$W_1 = -6.727833 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 + 0.127792 \cdot x_1^2; \\ W_2 = -0.1053295 \cdot x_2 + 0.0480732 \cdot x_2^2; \quad (4) \\ W_3 = -0.116352 \cdot x_3 + 0.1012196 \cdot x_3^2.$$

За результатами табулювання залежностей (4) з кроком Δx_i = 0,2 в діапазоні -1.68 ≤ x_i ≤ +1.68 побудовано графічні залежності (рис. 3).

Аналіз поданої інформації свідчить, що всі фактори незалежно один від іншого однозначно впливають на витрату сировини, причому для зменшення її витрати на одиницю площі шкіри процес необхідно провадити в позитивній ділянці факторного простору.

Для визначення оптимальних параметрів процесу зоління на основі технологічних вимог, що ставлять до вихідних змінних, проведено оптимізаційний пошук за допомогою узагальненої функції бажаності, складеної за отриманими регресійними рівняннями у кодованій формі. Відповідно до такого підходу для отримання оптимального вектора керування процесом встановлено обмеження на вихідні змінні, які відповідають найгіршому і найкращому значенням: y₁ — 6.58 та 6.47 кг сировини/м² готової шкіри, y₂ — 21.5 і 20.5% від маси парної сировини, y₃ — 32 і 37% від початкової довжини. Оптимальні параметри процесу зоління, що досліджується, отримано під час визначення максимуму узагальненої функції

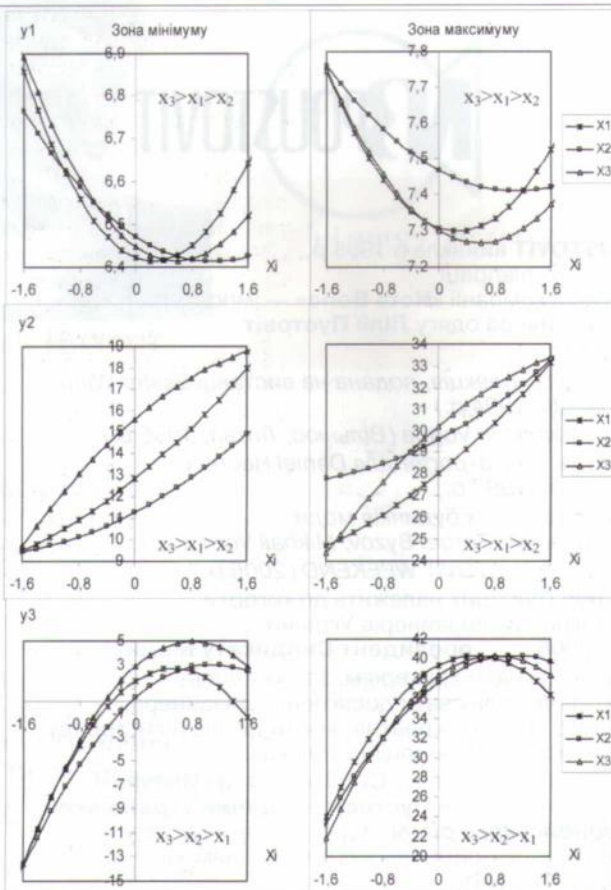


Рис. 2 — Ранжування факторів за ступенем впливу на вихідну змінну

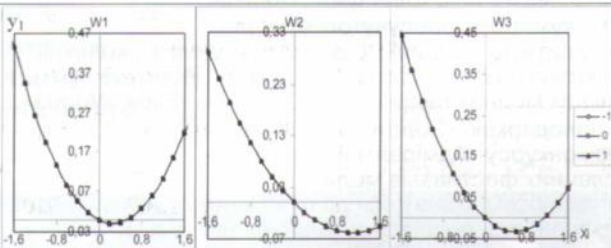


Рис. 3 — Ступінь впливу кожного із факторів на вихідну змінну y_1

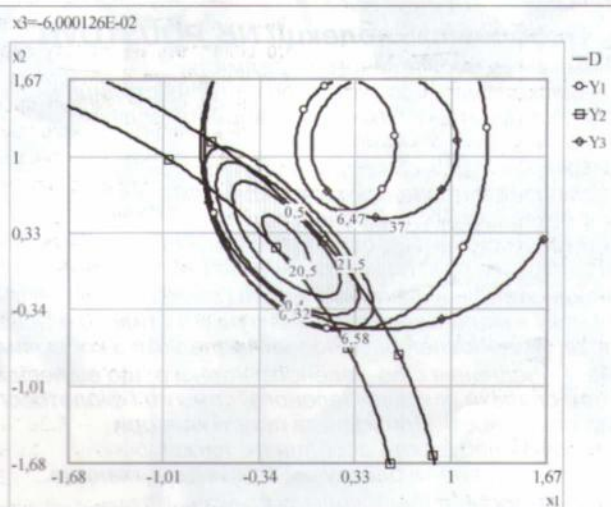


Рис. 4 — Оптимальна ділянка проведення процесу зоління

бажаності за методом сканування з точністю пошуку 0.01 в інтервалі $-1.68 \dots 1.68$ за усіма факторами. Значення функції бажаності D у оптимальній точці дорівнює 0.6216541, кількість обчислень значень функції — 37 933 056 раз.

Стабілізуючи один фактор на оптимальному рівні, а вихідні змінні в діапазоні їх технологічних значень від мінімуму до максимуму можна отримати компромісну ділянку, будуючи ізольні функції бажаності — оптимальну ділянку ведення процесу. Наприклад, у разі стабілізації фактора x_3 на оптимальному рівні $-6.000126 \cdot 10^{-2}$, отримано оптимальну ділянку ведення процесу зоління (рис. 4).

Вектор керування технологічним процесом знаходиться у точці з координатами: $X_1 = 0.71$ і $X_2 = 1.25\%$ від маси сировини, відповідно для іонів S^{2-} і Ca^{2+} , $X_3 = 11.76$ год. При цьому вихідні змінні мають значення: $y_1 = 6.51$ кг сировини/м² готової шкіри; $y_2 = 20.8\%$ від маси парної сировини; $y_3 = 34.6\%$ від початкової довжини при напруженні 9,8 МПа.

ВИСНОВКИ

Метод багатокритеріальної оптимізації з використанням комп'ютерної програми апробований на технології зоління шкіряної сировини, яка вимагає використання значної кількості хімічних матеріалів різної функціональності та визначається значною функціональністю, дав можливість точно установити значення параметрів даного процесу. Розроблений метод оптимізації передбачає визначення оптимальної ділянки на основі стандартизованих вимог до готової шкіряної продукції з урахуванням витрати сировини на одиницю площі. За розробленим методом, найменша витрата сировини ВРХ за помірної бубняви голини і раціонального видовження при напруженні 9,8 МПа досягається за витрати гідросульфиду (70%) та сульфиду натрію (72), гідроксиду кальцію — пушонки (70%), відповідно 0.89, 1.19, 3.3% від маси парної сировини і тривалості процесу зневолошування зоління — 12 год.

* в кодованих: $x_1 = -0.1600013$; $x_2 = 0.2699988$; $x_3 = -6.000126 \cdot 10^{-2}$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методи оптимізації експеримента в хімічній технології. 2-е изд. — М.: Высш. школа. — 1985. — 328 с.
2. Данилюк А.Г., Петрань А.Г. Розробка технології сухого дублення недовоної голини та її багатокритеріальна оптимізація // Вісник Державної академії легкої промисловості України. — 1999. — №2. — С. 170—173.
3. Плаван В.П., Данилюк А.Г. Застосування методів математичного моделювання та оптимізації для дослідження процесу дублення шкіри // Вісник Хмельницького національного університету. — 2005. — Т.2 — №6. — С. 134—139.
4. Лицук В.И., Данилюк А.Г., Журавский В.А. Влияние основных параметров отменно-зольных процессов на качество голяя // Изв. ВУЗов. Технол. легк. пром-сти. — 1990. — №4. — С. 36—39.
5. Лицук В.И., Данилюк А.Г. Зневолошування-зоління шкір великої рогатої худоби зі збереженням волосу // Вісник КНУТД. — 2005. — №3. — С. 73—76.
6. Данилюк А.Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра: 2-ге видання перероб. і допов. — К.: Фенікс, 2006. — 340 с.
7. Справочник кожевника (технология) / Под ред. Н.А.Балберовой. — М.: Легпромытиздат, 272 с.