

УДК 675.023

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, шляхом розв'язання задачі з одним критерієм і відповідними обмеженнями. З цією метою залежно від геометрії поверхні відгуку та характеру обмежень для оптимізації рекомендується використовувати 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 в зв'язку з необхідністю розв'язання системи нелінійних рівнянь [1].

Одним з найраціональніших способів розв'язання задачі 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 дозволяє установити оптимальний режим досліджуваного процесу з врахуванням вимог до використаних вихідних змінних. При цьому узагальнений критерій оптимізації розраховується на основі функції Харінгтона. В загальному вигляді задача оптимізації полягає в знаходженні таких значень параметрів технологічного процесу, які відповідають компромісним і бажаним величинам вихідних змінних:

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

Незважаючи на те, що процес лужної обробки шкіряної сировини пов'язаний з видаленням волосу і епідермісу, глобулярних білків, мукополісахаридів і частково жирових включень з шкур тварин та розпушенням пучків колагенових волокон (зоління) раніше вивчався з використанням системи автоматичного планування і обробки експериментальних даних на СМ ЕОМ [4], однак існуючий раніше 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 шкіряна сировина оброблялась в лабораторному барабані технологічним розчином з вмістом карбонату натрію, неіоногенної поверхнево-активної речовини, ферментного препарату з додаванням незначної кількості гідросульфиду натрію для підготовки шкур до відділення волосяного покриву. На стадії зоління зразки шкур оброблялись гідроксидом кальцію і аміним препаратом (дозування якого було однаковим для всіх варіантів обробки) з наступним додаванням гідросульфиду і сульфиду натрію.

Попередніми дослідженнями двоступеневої технології зневолошування-зоління чорно-рябих шкур ВРХ в режимі технології [5] з різним співвідношенням сульфиду і гідросульфиду натрію в перерахунку на S^{2-} (табл. 1), доведено доцільно їх використання у співвідношенні 1:1. Збільшення витрати сульфиду натрію

викликає надмірну бубняву, що, неодмінно, призводить до втрати площі готової шкіри, а його зменшення – до не повного зневолошування і недостатньої бубняви.

Таблиця 1 – Вплив гідросульфїду натрію на зневолошування-зоління шкір ВРХ

Співвідношення $Na_2S:NaHS$ за S^{2-}	Ступінь бубняви, %	Зневолошування
1 : 0	27,0	повне
0,75 : 0,25	24,0	– „ –
0,5 : 0,5	21,0	– „ –
0,25 : 0,75	17,0	не повне

В подальших дослідженнях вапняно-сульфідного зоління шкір ВРХ проводилось при співвідношенні вода-сировина 0.8:1.0 і температурі процесу – 28...29 °С. Це пов'язано з тим, що при вищій температурі й концентрації гідроксиду кальцію 25 г/л відбувається руйнування між- і внутрішньомолекулярних зв'язків макромолекул колагену, про що свідчить різке зростання виплавляння желатину (рис. 1) і вмісту білкових речовин у відпрацьованому зольному розчині, а за нижчої температури сповільнюється процес розпушення білкової структури, в зв'язку з чим подовжується технологічний процес.

Через 2 години лужної обробки видалявся волосняний покрив і для подальшого зоління співвідношення вода-сировина доводилось до 1.0:1.0, а сульфід натрію з гідроксидом кальцію – до заданої планом експерименту витрати.

Для дослідження режиму процесу зоління та його ефективності, технологічними факторами, що впливають на цей процес, вибрано загальну витрату сульфідів у рівних співвідношеннях сульфїду і гідросульфїду 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 , годин).

Для постановки експерименту використано 20 дослідних партій по 8 зразків у кожній розміром 150×160 мм товщиною 3,0...3,5 мм, які отримані з чепрачної топографічної ділянки двох шкір бичини легкої мокросолоного консервування. При цьому зразки комплектувались в партії за методом асиметричної бахроми [6]. Підшкірна клітковина досліджуваних шкір видалялась на стругальній машині, а обробку кожної партії зразків закінчували хромовим дубленням. Після пролежування і віджимання зразки двоїлись на товщину 1,5 мм і доводились до готової шкіри за технологією виробництва еластичної шкіри [7].

Ефективність процесу визначалась 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, добудови 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 наступними розрахунками за розробленою програмою.

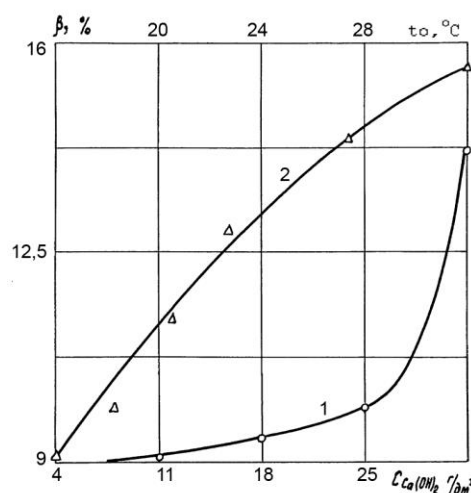


Рисунок 1 – Залежність витопленості желатину β від температури зоління (1) і концентрації $Ca(OH)_2$ (2)

Оптимізацію процесу зоління проводили скануванням з уточненням координат точки оптимуму методом Гауса-Зейделя і наступною побудовою оптимальної ділянки.

Постановка завдання

Метою роботи є встановлення оптимальної витрати сульфідів і гідросульфідів натрію, гідроксиду кальцію і тривалості процесу зоління шкіряної сировини великої рогатої худоби 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 (табл. 2). Результати експерименту за центральним композиційним ротатбельним планом (ЦКРП) наведено в таблиці 3.

Таблиця 2 – Параметри плану експерименту

Найменування	Значення фактору		
	X ₁	X ₂	X ₃
Нульовий рівень	0.74	1.19	12
Інтервал варіювання	0.2	0.22	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

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

Таблиця 4 – Коефіцієнти моделей і розрахункові значення критерію Стьюдента

Номер коефіцієнта	Модель \hat{y}_1		Модель \hat{y}_2		Модель \hat{y}_3	
	b_i	t_p	b_i	t_p	b_i	t_p

1	-0.0672783	3.9359818	2.6471622	16.7287254	3.8256335	8.0696306
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	<i>0.0537500</i>	1.4098557	<i>0.1250000</i>	0.3541688	<i>0.3750000</i>	0.3546497
5	<i>-0.0062499</i>	0.1639341	<i>-0.1250000</i>	0.3541688	<i>0.3750000</i>	0.3546497
6	<i>0.0437500</i>	1.1475559	<i>0.1250000</i>	0.3541688	<i>0.3750000</i>	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 (курсивом виділені незначущі),
 t_p – розрахункове значення критерію Стюдента.

Таблиця 5 – Оцінка адекватності моделей експериментальним даним

Показник	Модель		
	\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3
Похибка експерименту – $s_{експ}^2$	$3.98668 \cdot 10^{-3}$.3416666	3.066667
Критерію Стюдента табличний – $t_T(5, 5\%)$	2.571	2.571	2.571
Дисперсія адекватності – $s_{ад}^2$	$1.90399 \cdot 10^{-2}$.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)

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

Після обробки вихідних змінних отримані наступні регресійні рівняння, які адекватно з точки зору експериментальної ситуації описують процес зоління шкіряної сировини великої рогатої худоби:

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

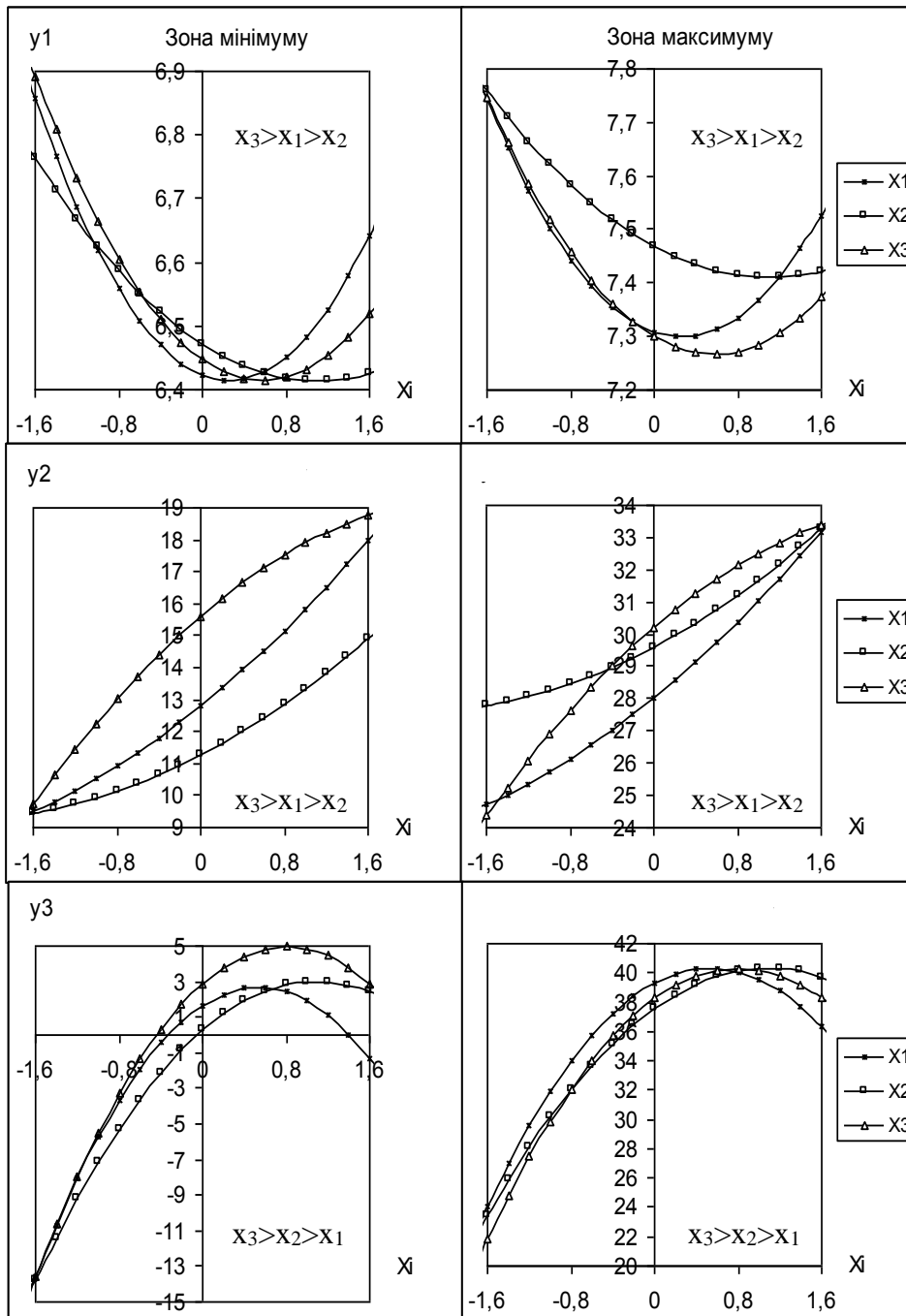
$$\hat{y}_2 = 20.89248 + 2.647162 x_1 + 1.714939 x_2 + 2.817191 x_3 + .3600024 x_1^2 + .3600043 x_2^2 - .525766 x_3^2; \quad (2)$$

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

де \hat{y}_j – прогнозовані значення вихідної змінної за j -ю моделлю.

Оскільки отримані моделі містять квадратичні ефекти і не можуть мати одного рішення, то доцільно порівняти однофакторні функції \hat{y}_{\min} і \hat{y}_{\max} , побудовані в двох експериментальних варіантах. Для цього в розрахунковій точці \hat{y}_{\min} з координатами $x_{1\min}, \dots, x_{i\min}, \dots, x_{n\min}$, один фактор послідовно назначався змінним, а решта – постійними; те саме в розрахунковій точці \hat{y}_{\max} . При цьому ранжування ведеться за найбільшим розмахом Δy однофакторних залежностей в 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).

Рисунок 2 – Ранжування факторів за ступенем впливу на вихідну змінну



Як видно з рисунку 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 проводимо на основі загальних моделей другого порядку, з яких отримуємо „квазіоднофакторні” залежності від x_i типу $W_i = (b_i + b_{ij}x_j)x_i + b_{ii}x_i^2$, тобто кожна отримана „вирізка” із повної поліноміальної моделі містить тільки ефекти з індексом стосовно фактору, що 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 y_1 будемо мати:

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

За результатами табулювання залежностей (4) з кроком $\Delta x_i = 0,2$ в діапазоні $-1.68 \leq x_i \leq +1.68$ побудовані графічні залежності (рис. 3).

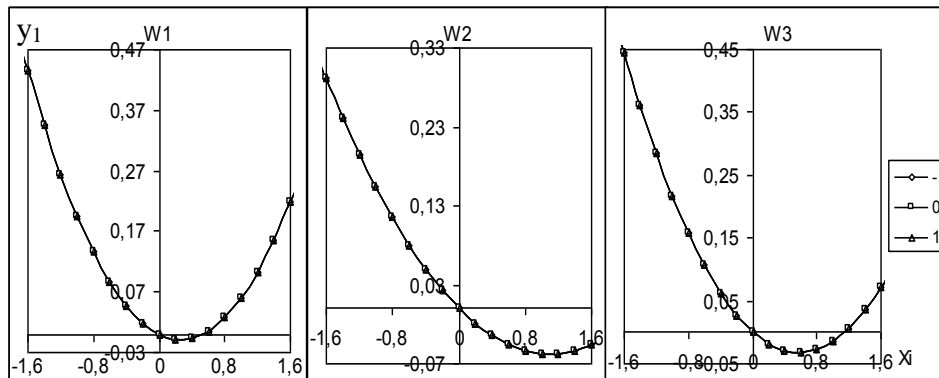


Рисунок 3 – Ступінь впливу кожного із факторів на вихідну змінну y_1

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

Для визначення оптимальних параметрів процесу зоління на основі технологічних вимог, що пред'являються до вихідних змінних, був проведений оптимізаційний пошук за допомогою узагальненої функції бажаності, складеної за отриманими регресійними рівняннями у кодованій формі. Відповідно до такого підходу для отримання оптимального вектора управління процесом встановлено обмеження на вихідні змінні, які відповідають найгіршому і найкращому значенню: $y_1 - 6.58$ і 6.47 кг сировини / m^2 готової шкіри, $y_2 - 21.5$ і 20.5 % від маси парної сировини, $y_3 - 32$ і 37 % від початкової довжини. Оптимальні параметри процесу зоління, що досліджується, отримані при визначенні максимуму узагальненої функції 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 – 37933056 разів.

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

Вектор управління технологічним процесом знаходиться у точці з координатами¹: $X_1 = 0.71$ і $X_2 = 1.25$ % від маси сировини, відповідно для іонів S^{2-} і Ca^{2+} , $X_3 = 11.76$ годин. При цьому вихідні змінні мають значення: $y_1 = 6.51$ кг сировини / m^2 готової шкіри; $y_2 = 20.8$ % від маси парної сировини; $y_3 = 34.6$ % від початкової довжини при напруженні $9,8$ МПа.

¹ В кодованих: $x_1 = -0.1600013$; $x_2 = 0.2699988$; $x_3 = -6.000126 \cdot 10^{-2}$

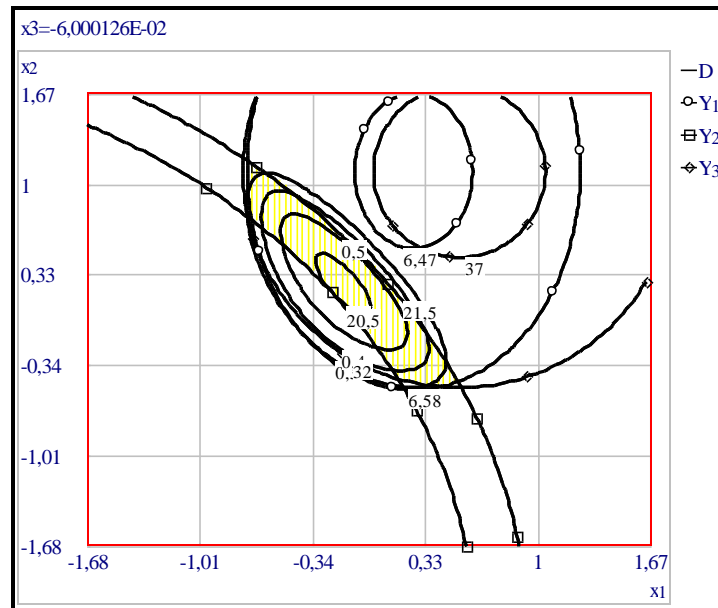


Рисунок 4 – Оптимальна ділянка проведення процесу зоління

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 лужністю, дав можливість точно встановити значення параметрів даного процесу. Розроблений метод оптимізації передбачає визначення оптимальної ділянки на основі стандартизованих вимог до готової шкіряної продукції з врахуванням витрати сировини на одиницю площі. За розробленим методом, найменша витрата сировини великої рогатої худоби за помірної бубняви голини і раціонального видовження при напруженні 9,8 МПа досягається при витраті гідросульфиду (70 %) та сульфиду натрію (72 %), гідроксиду кальцію – пушонки (70 %), відповідно 0.89, 1.19, 3.30 % від маси парної сировини і тривалості процесу зневолошування-зоління – 12,0 годин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРА

1. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. 2-е изд.– М.: Высш. школа.– 1985.– 328 с.
2. Данилкович А.Г., Петрань А.Г. Розробка технології сухого дублення недвоєної голини та її багатокритеріальна оптимізація // Вісник Державної академії легкої промисловості України.– 1999.– № 2.– С. 170-173.
3. Плаван В.П., Данилкович А.Г. Застосування методів математичного моделювання та оптимізації для дослідження процесу дублення шкір // Вісник Хмельницького національного університету.– 2005.– Т. 2.– № 6.– С. 134 -139.
4. Лищук В.И., Данилкович А.Г., Журавский В.А. Влияние основных параметров отмочно-зольных процессов на качество голя // Изв. ВУЗов. Технол. лёгк. пром-сти.– 1990.– № 4.– С. 36-39.
5. Ліщук В.І., Данилкович А.Г. Зневолошування-зоління шкур великої рогатої худоби зі збереженням волосу // Вісник КНУТД.– 2005.– № 3.– С. 73-76.
6. Данилкович 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.: Легпромбытиздат, 272 с.

