

**РОЗРОБЛЕННЯ НАПОВНЮВАЛЬНО-ГІДРОФОБІЗУЮЧОЇ КОМПОЗИЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ВЕЛЮРУ ЗІ ШКУРОК НУТРИЇ: ДОСВІД БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ**

Данилкович А. Г.<sup>1</sup>, Шахновський А. М.<sup>2</sup>

**РАЗРАБОТКА НАПОЛНИТЕЛЬНЯЮЩЕ-ГИДРОФОБИЗИРУЮЩЕЙ КОМПОЗИЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВЕЛЮРА ИЗ ШКУРОК НУТРИИ: ОПЫТ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Данилкович А. Г.<sup>1</sup>, Шахновский А. М.<sup>2</sup>

**THE DEVELOPMENT OF A FILLING-HYDROPHOBIZING COMPOSITION IN THE NUTRIA FUR VELOUR PRODUCTION: EXPERIENCE OF MULTIGOAL OPTIMIZATION**

Danylkovych A.<sup>1</sup>, Shakhnovsky A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну  
Київ, Україна  
[ag101@ukr.net](mailto:ag101@ukr.net)

<sup>2</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Київ, Україна  
[amshakhn@gmail.com](mailto:amshakhn@gmail.com)

*Статтю присвячено питанням дослідження особливостей застосування методів багатокритеріальної оптимізації під час розроблення наповнювально-гідрофобізуючої композиції у виробництві велюру зі шкурок нутрії. Побудовано експериментально-статистичні моделі, що пов'язують структурно-визначальні якісні характеристики велюру з шкурок нутрії зі значеннями факторів (тобто, зі складом наповнювально-гідрофобізуючої композиції). Встановлено оптимальний склад наповнювально-гідрофобізуючої композиції з використанням ієрархічного методу послідовних поступок та методу на основі функції бажаності Харінгтона.*

**Ключові слова:** багатокритеріальна оптимізація, ієрархічний метод послідовних поступок, функція бажаності, велюр нутрії, властивості велюру, гідрофобізація

*Статья посвящена вопросам исследования особенностей применения методов многокритериальной оптимизации при разработке наполнительно-гидрофобизирующей композиции в производстве велюра из шкурок нутрии. Построены экспериментально-статистические модели, связывающие структурно-определяющие качественные характеристики велюра из шкурок нутрии со значениями факторов (то есть, с составом наполнительно-гидрофобизирующей композиции). Установлен оптимальный состав наполнительно-гидрофобизирующей композиции с использованием иерархического метода последовательных уступок и метода на основе функции желательности Харрингтона.*

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, иерархический метод последовательных уступок, функция желательности, велюр нутрии, свойства велюра, гидрофобизация

*The paper is devoted to the research of features of application of multicriteria optimization methods in the development of a filler-hydrophobic composition in the production of velour from the skin of nutria. Experimental-statistical models have been constructed, which relate the structural-determining qualitative characteristics of velour from nutria skins to the values of factors. The optimal formulation of the filling and hydrophobising composition was determined using a hierarchical method of sequential concessions and a method based on the Harrington desirability function.*

**Keywords:** multicriteria optimization, hierarchical method of successive concessions, desirability function, nutria velour, velour properties, hydrophobization

### ВСТУП

Виробництво матеріалів із шкіри та хутра передбачає низку технологічних стадій та операцій [1]. Конкурентоздатність виробництва вимагає удосконалення існуючих технічних рішень (режимів, рецептур, тощо) та розробки нових технологій, покликаних забезпечити отримання матеріалів належної якості в умовах наявних технологічних, технічних, економічних обмежень.

Однією із найважливіших науково-виробничих задач сучасного виробництва хутрових матеріалів є пошук ефективних функціональних реагентів та оптимальних композицій, що забезпечували б високі структурно-визначальні характеристики матеріалів на кожному із етапів життєвого циклу матеріалів та виробів із них. Об'єктом дослідження у даній роботі є наповнювально-гідрофобізуючі композиції для обробки натуральних матеріалів, які використовуються для створення виробів, що експлуатуються в умовах підвищеної вологості. Ефективність використання гідрофобізаторів суттєво залежить від особливостей пористої структури колаген-кератинового матеріалу та його волосяного покриву; підвищена пористість структури хутрового напівфабрикату значно ускладнює процес його гідрофобізації внаслідок необхідності впровадження у технологічний процес додаткових фізико-хімічних процесів і механічних операцій для надання матеріалу належних властивостей.

Системний підхід до розроблення наповнювально-гідрофобізуючих композицій дозволяє:

а) оптимально організувати експериментальну частину досліджень з метою отримання з метою досягнення максимальної точності вимірювань при мінімально можливій кількості поставлених досвідів за умови збереження статистичної достовірності результатів;

б) побудувати експериментально-статистичні моделі, які зв'язують фактори складу наповнювально-гідрофобізуючої композиції із властивостями досліджуваного матеріалу (в даному випадку – із властивостями велюру зі шкурок нутрії);

в) прийняти обґрунтовані оптимальні рішення на основі побудованих математичних моделей.

Мета даної роботи полягає в дослідженні математичних методів розроблення оптимальних рішень щодо складу алкенмалеїново-акрилсинтанної (АМ-АС) композиції процесу у процесі формування гідрофобізованого велюру із шкурок нутрії з грубим волосяним покривом.

Дослідження щодо розроблення оптимальних наповнювально-гідрофобізуючих композицій у виробництві велюру зі шкурок нутрії передбачало:

1) Виділення значимих факторів, які суттєво впливають на структурно-визначальні якісні характеристики оброблюваного матеріалу (компонентів наповнювально-гідрофобізуючої композиції).

2) Синтез спеціального D-оптимального плану експерименту класу «склад-властивість» і його лабораторну реалізацію.

3) Отримання шляхом апроксимації експериментальних даних сімейства поліномальних математичних моделей, що пов'язують структурно-визначальні якісні характеристики велюру з шкурок нутрії зі значеннями факторів (тобто, зі складом наповнювально-гідрофобізуючої композиції).

4) Пошук оптимального складу наповнювально-гідрофобізуючої композиції, тобто визначення сукупності значень факторів, при якій множина заданих критеріїв оцінки ефективності процесу досягне найкращих значень.

### ВИДІЛЕННЯ ФАКТОРІВ ТА ВИХІДНИХ ВЕЛИЧИН, СИНТЕЗ ПЛАНУ ЕКСПЕРИМЕНТУ

У роботі досліджувався склад наповнювально-гідрофобізуючої композиції АМ-АС для шкурок самців нутрії площею 24...25 дм<sup>2</sup> з грубим остьовим волосом після його епілювання і подублювання до температури не нижче 90 °С за технологією [1]. Досліджувана композиція включала алкенмалеїновий (АМ) полімер, синтезований на основі  $\alpha$ -алкенів C<sub>20-24</sub> і малеїнового ангідриду з середньчисловою молекулярною масою 38·10<sup>3</sup>, поліакрилову (ПА) емульсію Melio Resin A-821 фірми «Clariant» (Німеччина) і продукт синтезу 2-нафтолсульфоїкислоти з діоксидифенілсульфоном – синтанний дубитель БНС (ТУ 17-06-165-89).

Отже, склад композиції АМ-АС визначається факторами: кількість алкенмалеїново-акрилсинтанної композиції ( $x_1$ ), кількість ПА-емульсії ( $x_2$ ), кількість синтанного дубителя БНС ( $x_3$ ), та кількість АМ-полімеру ( $x_4$ ).

Ефективність впливу складу композиції АМ-АС на фізико-хімічні та технологічні властивості хутрового велюру нутрії оцінювали за наступними показниками:

$y_1$  – кількість продифундованої композиції в напівфабрикат, мас. %;

$y_2$  – тривалість динамічного водопромокання хутрового велюру, с;

$y_3$  – виходом площі хутрового велюру, %.

Слід зауважити, що в даному випадку мало місце планування експерименту при дослідженні локальних ділянок діаграм «склад-властивість»: авторів не цікавили рецептури композицій, в яких повністю були відсутні ті інші компоненти. Іншими словами, ставилося завдання дослідження залежності властивостей від складу не у всій області зміни концентрації компонентів, а в локальній ділянці діаграми «склад-властивість». Виходячи зі сказаного, план експерименту було синтезовано за модифікованим алгоритмом Макліна-Андерсона [2, 3].

Після реалізації синтезованого плану були отримані експериментальні дані, які характеризують вплив складу наповнювально-гідрофобізуючої композиції АМ-АС на властивості велюру нутрії.

### ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Коефіцієнти математичних моделей визначались шляхом апроксимації експериментальних даних за методом найменших квадратів, у припущенні, що досліджувані структурно-визначальні якісні характеристики велюру з шкурок нутрії є безперервними функціями факторів і можуть бути з достатньою точністю представлені поліномами.

Побудовані на основі даних експериментів математичні моделі за згаданими вище трьома показниками структурно-визначальних властивостей велюру нутрії в залежності від складу композиції АМ-АС мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_1 &= -138.69x_1 - 13.34x_2 - 84.27x_3 + 398.29x_1x_2 + \\
 &+ 429.70x_1x_3 + 535.01x_1x_4 + 468.02x_2x_3 + 225.52x_2x_4 + \\
 &+ 305.51x_3x_4 + 625.12x_1x_2x_3; \\
 \hat{y}_2 &= 765.90x_1 - 3599.70x_2 - 3315.80x_3 + 21850.00x_1x_2 + \\
 &+ 24474.00x_1x_3 + 3662.30x_1x_4 + 15166.00x_2x_3 + 11914.00x_2x_4 + \\
 &+ 12409.00x_3x_4 - 153640.00x_1x_2x_3; \\
 \hat{y}_3 &= 78.871x_1 + 35.227x_2 + 30.294x_3 + 307.490x_1x_2 - \\
 &+ 444.790x_1x_3 + 102.200x_1x_4 + 202.830x_2x_3 + 303.050x_2x_4 + \\
 &+ 284.150x_3x_4 - 2418.500x_1x_2x_3.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Для дослідження адекватності отриманих математичних моделей (1) було додатково реалізовано по два паралельних досліди у трьох довільно вибраних контрольних точках із числа точок-кандидатів. Статистична перевірка моделей (1) за критерієм Фішера показала, що адекватними є всі три отримані моделі (1), при цьому найбільш точно описує експериментальні дані модель для виходу площі хутрового велюру ( $y_3$ ). Отримані адекватні математичні моделі «склад композиції –властивості велюру нутрії» лягли в основу математичної задачі оптимізації для визначення оптимального складу алкенмалеїново-акрилсинтанної композиції при виготовленні хутрового велюру нутрії.

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДУ АЛКЕНМАЛЕЇНОВО-АКРИЛСИНТАННОЇ КОМПОЗИЦІЇ

Для знаходження оптимального складу композиції АМ-АС для обробки велюру зі шкурок нутрії необхідно було знайти оптимум задачі параметричного умовного (2):

$$\begin{aligned}
 \{y_i(\bar{X})\} \rightarrow \max, \\
 \bar{X} \in Q.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де  $y_i(\bar{X})$  – критерії оптимальності, побудовані на основі моделей (1).  $i=1,2,\dots,m$ ;  $\bar{X}$  – множина факторів оптимізації,  $\bar{X} \Leftrightarrow x_i, i=1,2,\dots,k$ ;  $\bar{X} \in Q(\bar{X})$  – система технологічних обмежень задачі оптимізації;  $m$  – кількість критеріїв оптимальності.

Як видно із попереднього технологічного аналізу критеріїв оптимізації, а також із можна бачити із рис. 1, вказані критерії є конфліктуєчими. Таким чином, вирішення задачі (2) вимагає знаходження компромісної області значень факторів.

У відповідності до задач дослідження, вирішення математичної задачі оптимізації (2) було паралельно здійснено:

- 1) ієрархічним методом послідовних поступок (методом обмежень) [4, 5];
- 2) методом на основі функції бажаності Харінгтона [2, 3].

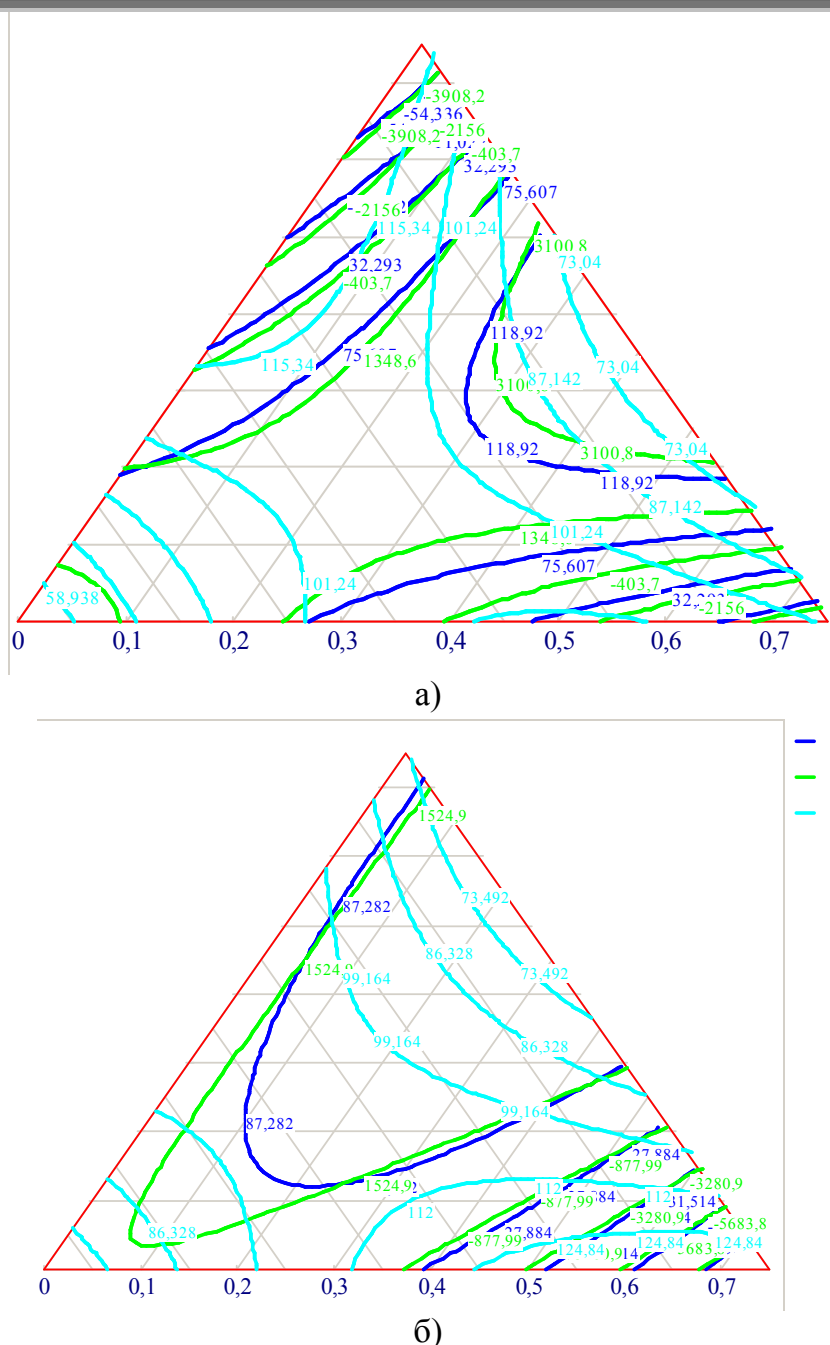


Рис. 1. Діаграма «склад-властивість» для характеристик складу алкенмалеїново-акрилсинтанної композиції:  
 а) зафіксовано фактор  $x_1=0,25$ ; б) зафіксовано фактор  $x_3=0,25$

Оптимізацію складу наповнювально-гідрофобізуючої композиції АМ-АС було виконано за такою процедурою (рис. 2):

1. Якісний аналіз відносної важливості критеріїв. Побудова ієрархічного переліку критеріїв (в порядку спадання важливості).
2. Встановлення найбільш важливого (тобто, першого із ієрархічного переліку) критерію оптимальності у якості «поточного» критерію.
3. Пошук екстремуму із урахуванням «поточного» критерію як цільової функції.
4. Включення поточного критерію до системи обмежень із урахуванням поступки.

5. Якщо ієрархічний перелік критеріїв не вичерпано, то встановлення наступного у ієрархічному переліку критерію оптимальності у якості «поточного» критерію; виконання пунктів 3 та 4 даного алгоритму. У іншому випадку процес обчислення закінчено.

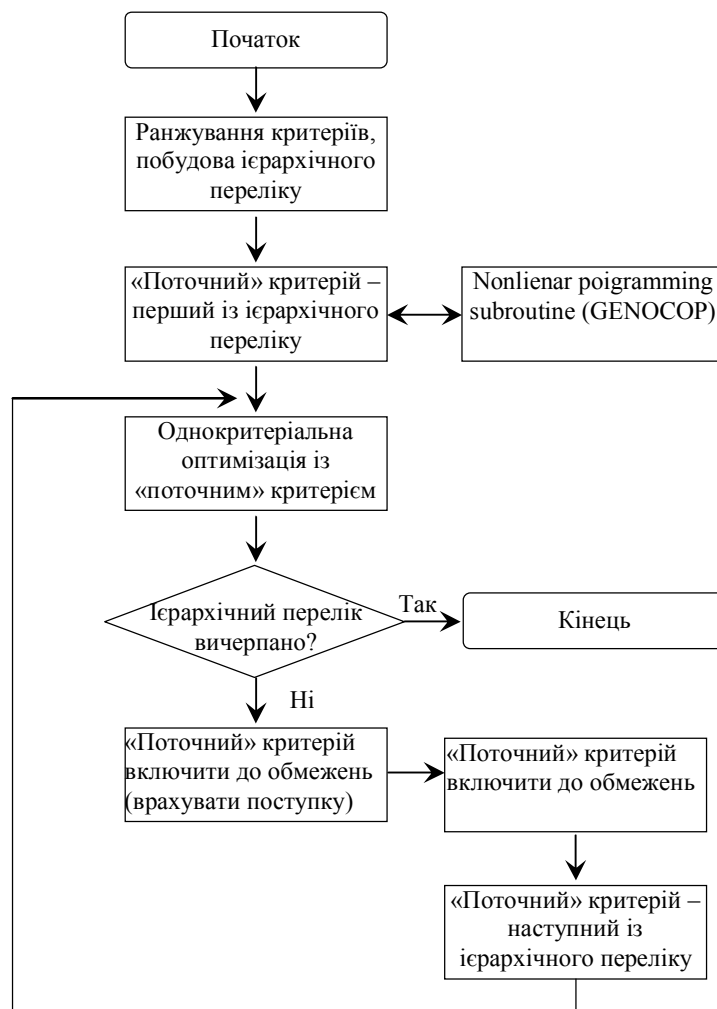


Рис. 2. Процедура багатопараметричної оптимізації у відповідності до методу послідовних поступок

Хід та результати вирішення задачі оптимізації складу композиції АМ-АС у відповідності до методу послідовних поступок представлено у табл. 1.

Таблиця 1. Вирішення задачі оптимізації складу композиції АМ-АС у відповідності до методу послідовних поступок

Номер кроку	Склад композиції				«Поточний» критерій		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	позначення	оптимум	поступка
0	0,030	0,140	0,110	0,210	-	-	-
1	0,030	0,258	0,312	0,400	$y_2$	2041,9	1837,7
2	0,030	0,340	0,283	0,347	$y_3$	107,11	106,95
3	0,031	0,371	0,253	0,345	$y_1$	84,4	-

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНА ПІДТРИМКА ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

Хід та результати вирішення задачі оптимізації складу композиції АМ-АС у відповідності до підходу на основі функції бажаності представлено на рис. 3. Зауважимо, що для критерію оптимальності  $y_1$  застосовано «двобічний» профіль бажаності.

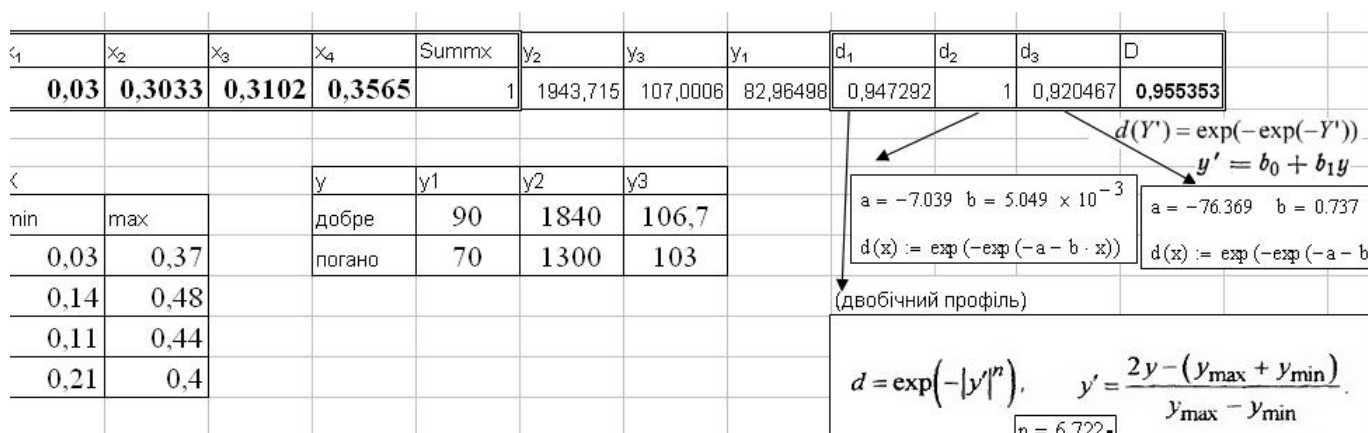


Рис. 3. Вирішення задачі оптимізації складу композиції АМ-АС у відповідності до підходу на основі функції бажаності Харрінгтона

Обидва підходи до багатокритеріальної оптимізації дали результати (табл. 2), які належать до шуканої компромісної області (рис. 4) і досить близько кореспондують між собою.

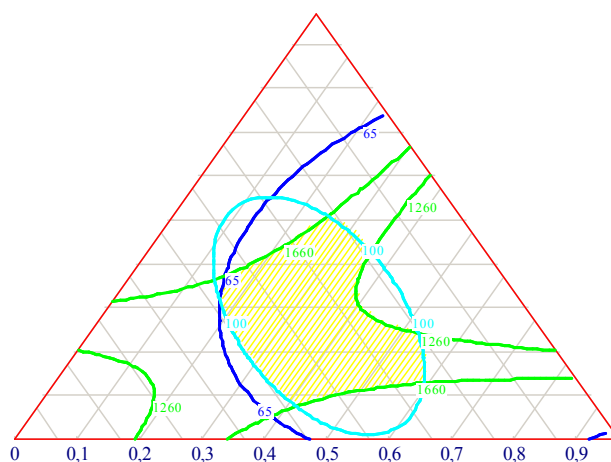


Рис. 4. Діаграма компромісної області пошуку оптимального складу алкенмалеїново-акрилсинтанної композиції (зафіксовано фактор  $x_1=0,03$ )

Таблиця 2. Порівняння результатів оптимізації складу композиції АМ-АС

Метод	Склад композиції				Критерії оптимальності		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
Поступок	0,031	0,371	0,253	0,345	84,4	1837,7	107,11
На основі функції бажаності	0,03	0,303	0,31	0,357	82,97	1943,71	107,00

Слід зауважити, що незважаючи на відомі переваги методу на основі функції бажаності, за результатами оптимізації та за особливостями процедури оптимізації

(можливість контролю за процесом пошуку оптимуму на усіх стадіях процедури) технологи схильні віддавати перевагу ієрархічному методу послідовних поступок.

### ВИСНОВКИ

Досліджено математичні методи розроблення оптимального складу алкенмалеїново-акрилсинтанної (АМ-АС) композиції у процесі формування гідрофобізованого велюру із шкурок нутрії з грубим волоссяним покривом. Встановлено оптимальний склад наповнювально-гідрофобізуючої композиції з використанням ієрархічного методу послідовних поступок та методу на основі функції бажаності Харінгтона. Оптимізований склад наповнювально-гідрофобізуючої композиції може бути ефективно використаний в технологіях виготовлення овчинно-шубних і шкіряних матеріалів підвищеної водостійкості. За комплексом властивостей отриманий гідрофобізований велюр нутрії придатний для виробництва нагольних виробів різного призначення, що експлуатуватимуться в екстремальних умовах.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Данилкович А. Г., Ліщук В. І., Стрембулевич Л. В. Сучасне виробництво хутра. Київ: Фенікс, 2016.
2. Данилкович А. Г., Омельченко Н. В., Шахновський А. М. Оптимизация композиции для гидрофобизации эластичных материалов. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* – № 1. – 2012. – С. 74-78
3. Danylkovych A. H., Korotych O. I. Optimization of Leather Filling Composition Containing SiO<sub>2</sub> Nanoparticles. *JALCA*, Vol. 114, 2019. P. 333–343.
4. Mavrotas G. Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Appl. Math. Comput.* – 2009. – 213. – pp. 455–465.
5. Oliveira L., Saramago S. Multiobjective optimization techniques applied to engineering problems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.* – 2010. – 32. pp. 94-105.

## ПРОЕКТУВАННЯ СХЕМ ПРОМИСЛОВОГО ВОДОСПОЖИВАННЯ: ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ЙМОВІРНІСНИХ МЕТОДІВ ПОШУКУ ЕКСТРЕМУМУ

Поплевські Г.<sup>1</sup>, Шахновський А. М.<sup>2</sup>, Квітка О. О.<sup>2</sup>, Бохенек Р.<sup>1</sup>

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ: ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА

Поплевски Г.<sup>1</sup>, Шахновский А. М.<sup>2</sup>, Квитка А. А.<sup>2</sup>, Бохенек Р.<sup>1</sup>

## DESIGN OF INDUSTRIAL WATER USAGE NETWORKS: EXPERIENCE OF APPLICATION OF PROBABILISTIC EXTREME SEARCH METHODS

Poplewski G.<sup>1</sup>, Shakhnovsky A. M.<sup>2</sup>, Kvitka O. O.<sup>2</sup>, Bochenek R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza,  
Rzeszów, Polska  
[ichgp@prz.rzeszow.pl](mailto:ichgp@prz.rzeszow.pl)

<sup>2</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Київ, Україна  
[amshakhn@gmail.com](mailto:amshakhn@gmail.com)