



УДК 676.18:519.2

# ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОДЕРЖАННЯ ЦЕЛЮЛОЗИ ІЗ ЛЛЯНОГО ВОЛОКНА ІЗ ФОРМАЛІЗАЦІЄЮ КРИТЕРІЇВ ОПТИМАЛЬНОСТІ

**І. М. ДЕЙКУН**, кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів

**Д. М. СКЛАДАННИЙ**, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: ir.d2615@gmail.com

Під час одержання довгого лляного волокна утворюється коротке волокно, яке має обмежене використання і є цінним джерелом сировини для виробництва целюлози. Проблема раціонального використання рослинної сировини є актуальною.

Метою роботи є вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації процесу натронного варіння лляної целюлози з попереднім водним гідролізом шляхом формалізація лінгвістично заданих критеріїв оптимальності.

У дослідженні проведено натронні варіння лляної целюлози із короткого лляного волокна з попереднім водним гідролізом за витрат луку на варіння 20 % від маси абсолютно сухої сировини з каталізатором антрахіноном та визначено якісні показники целюлози.

Виконано формалізацію критеріїв оптимальності з використанням методів теорії нечітких множин. Обрано тип і загальний вид функцій приналежності, встановлено універсум та визначено значення числових параметрів.

Для пошуку оптимального рішення використано принцип оптимальності Белмана-Заде. Встановлено оптимальні значення технологічних параметрів одержання лляної целюлози – тривалість водного передгідролізу – 2 год 12 хв, температура передгідролізу – 154 ОС, тривалість натронного варіння – 3 год, температура варіння 166 ОС за гідромодуля 6 : 1. Одержані результати добре узгоджуються з рішеннями, отриманими іншими методами.

Ляна целюлоза після вибілювання може бути використана для виробництва нітратів целюлози або карбоксиметилцелюлози.

*Ключові слова:* лляна целюлоза, натронне варіння, багатокритеріальна оптимізація, формалізація критеріїв оптимальності, функція приналежності

**Актуальність.** Ляне волокно є одним із найміцніших рослинних волокон і відрізняється високою екологічною чистотою. Довге лляне волокно використовується для виробництва тканин із високими гігієнічними властивостями та стійких до зношування. У той же час, коротке лляне волокно має обмежене викори-

стання для виробництва мішковини, мотузок, шпагату. З костриці – здерев'янілої частини лляного стебла, яка є відходом виробництва волокна, виготовляють паливні брикети [1].

У зв'язку з цим виникає необхідність раціонального використання целюлозовмісної сировини, яка залишається після переро-



блення технічних культур. Одним із напрямків її переробки може бути використання короткого лляного волокна для виробництва целюлози різного призначення.

Для України, яка не має достатньої кількості деревини для виробництва целюлози, використання власних ресурсів волокнистої сировини є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Результатами досліджень, опублікованими в роботах [2-4], показано можливість одержання целюлози із лляної сировини для виробництва паперу та для хімічної переробки. Лляна сировина має вищий вміст целюлози і нижчий вміст лігніну, у порівнянні з деревиною, тому для одержання целюлози потрібні менші витрати реагентів та тривалість варіння, а целюлоза має вищий вихід і за своїми властивостями наближається до бавовняної.

Спроба розв'язання такої задачі проводилася і за участю авторів [5]. Для цього було реалізовано експеримент за центральним композиційним ротатбельним планом, проведена статистична обробка результатів та отримано регресійні залежності показників якості лляної целюлози від зазначених технологічних факторів процесу.

Нагронне варіння проводили з витратою NaOH 20 % від маси абсолютно сухої сировини і добавкою антрахінону у кількості 0,1 % від маси абсолютно сухої сировини.

Якість процесу варіння контролювалась за такими показниками: вихід целюлози ( $Y_1$ , %), вміст лігніну ( $Y_2$ , %), вміст  $\alpha$ -целюлози ( $Y_3$ , %), в'язкість одержаної

целюлози ( $Y_4$ , мПа·с). За результатами оброблення експериментальних даних побудовано адекватні експериментально-статистичні моделі, які описують залежність якісних показників процесу від його технологічних факторів у вигляді регресійних рівнянь другого порядку. Розраховані коефіцієнти моделей зведені в табл. 2.

Особливістю постановки задачі багатокритеріальної оптимізації процесу є спосіб завдання критеріїв оптимальності. У даному випадку критерії оптимальності задаються у вигляді лінгвістичних виразів, а саме:

- вихід целюлози –  $Y_1$  – «якомога вище»;
- вміст  $\alpha$ -целюлози –  $Y_2$  – «вище 90 %»;
- вміст лігніну –  $Y_3$  – «менше 2,5 %»;
- в'язкість –  $Y_4$  – «близько 20 мПа·с».

Для безпосереднього вирішення задачі оптимізації у попередній роботі застосовано функцію бажаності Харрінгтона [5]. У результаті такого розв'язку були отримані технологічно прийнятні результати багатокритеріальної оптимізації, проте математичне обґрунтування знайденого рішення дещо ускладнене через відсутність алгоритмізованої процедури обрання деяких граничних значень функції бажаності, а сама формалізація нечітко заданих критеріїв оптимальності за допомогою функції бажаності носила дещо штучний характер.

Метою даного дослідження є розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації процесу натронного варіння целюлози з попереднім водним гідролізом шляхом формалізації лінгвістично заданих критеріїв оптимальності.

### 1. Фактори процесу варіння лляної целюлози

Фактори ( $X_i$ )	Нижній рівень	Верхній рівень
$X_1$ – тривалість ПВГ, годин	2,0	3,0
$X_2$ – температура ПВГ, °С	150	170
$X_3$ – тривалість натронного варіння, годин	2,5	3,5
$X_4$ – температура натронного варіння, °С	160	180



## 2. Значення коефіцієнтів рівнянь регресії для показників якості процесу варіння лляної целюлози

Коефіцієнти	Вихід целюлози, %, $Y_1$	Вміст лігніну, %, $Y_2$	Вміст А-целюлози, %, $Y_3$	В'язкість, мПа·с, $Y_4$
$b_0$	54,8	2,22	92,0	13,0
$b_1$	-1,44	0,354	-0,408	-1,30
$b_2$	-2,75	0,483	-1,23	-1,30
$b_3$	-0,95	-0,304	-0,892	-2,09
$b_4$	-2,30	-0,445	-3,72	-7,81
$b_5$	-0,20	0,136	-0,650	-0,594
$b_6$	-0,225	0,0356	0,288	-0,556
$b_7$	0,050	0,103	-0,188	0,319
$b_8$	0,125	-0,0331	-0,0875	-0,319
$b_9$	-0,800	-0,0506	-0,962	2,33
$b_{10}$	-0,025	0,137	-0,820	0,494
$b_{11}$	-0,102	0,042	0,115	0,880
$b_{12}$	-0,165	0,310	-0,723	1,71
$b_{13}$	-0,265	0,0272	0,227	1,09

**Матеріали і методи.** Задача формалізації розв'язується з використанням методів теорії нечітких множин. Для пошуку оптимального рішення в нечітких умовах пропонується використання принципу оптимальності Беллмана-Заде.

Як зазначено вище, для математичного вирішення задачі оптимізації, проведемо формалізацію критеріїв оптимальності. Формалізація лінгвістично заданих критеріїв оптимальності широко використовується для вирішення задач оптимізації у різних галузях, наприклад [6] та довела свою ефективність. Така формалізація можлива, якщо розглянути критерії оптимальності як нечіткі множини значень та побудувати функції приналежності цих множин. Побудова функції приналежності для формалізації лінгвістичного виразу передбачає обрання загального виду функції, її конкретного типу, встановлення універсуму та визначення числових параметрів [7].

Згідно рекомендацій, викладених у

[8], для показників  $Y_1$  та  $Y_2$  слід обрати S-подібну функцію приналежності, для  $Y_3$  обираємо Z-подібну, для  $Y_4$  – П-подібну функції. Стосовно конкретного виду функції, з метою полегшення вирішення в подальшому задачі оптимізації, нами прийнято рішення зупинитися на сигмоїдальній функції виду  $\mu_i = 1/(1 + \exp(-a_i \cdot (Y_i - b_i)))$ ,  $i = 1...3$  для показників  $Y_1 - Y_3$ , та дзвонеподібної (bell-shaped) функції виду  $\mu_4 = 1/\left(1 + \left(\frac{Y_4 - c_4}{a_4}\right)^{2b_4}\right)$  для показника  $Y_4$ .

Для функцій приналежності  $\mu_1$  та  $\mu_2$  межами універсуму будуть найгірше значення показника якості, отримане в результаті реалізації експерименту та найкраще теоретично можливе значення цього показника (100 %). Аналогічно визначимо універсум функції  $\mu_3$  – від теоретично можливого найкращого значення (0 %) до найгіршого значення, отриманого експериментально. Універсум функції  $\mu_4$  буде лежати в межах одержаних у



### 3. Функції приналежності для показників якості целюлози

Показник якості	Функція приналежності			
	позначення	універсум	тип	параметри
вихід целюлози	$\mu_1$	[42 ... 100]	сігмоїдальна	$a_1 = 0,4; b_1 = 52$
вміст $\alpha$ -целюлози	$\mu_2$	[74 ... 100]	сігмоїдальна	$a_2 = 0,3; b_2 = 90$
вміст лігніну	$\mu_3$	[0 ... 4,4]	сігмоїдальна	$a_3 = -2,4; b_3 = 2,5$
в'язкість	$\mu_4$	[5 ... 36]	дзвонеподібна	$a_4 = 6,25; b_4 = 3;$ $c_4 = 20$

експерименті найменшого найгіршого та найбільшого найгіршого значень.

Оскільки як сигмоїдальна, так і дзвонеподібна функції приналежності породжують не строго нормально, а субнормально опуклі нечіткі множини, для визначення їх числових параметрів задаємося максимальним граничним відхиленням, прийнятим нами 0,01. Це значення задає максимальне відхилення розрахованих значень функції приналежності на границях їх універсумів від 0 та 1 відповідно. У випадку сігмоїдальних функцій  $\mu_2$  і  $\mu_3$ , точка переходу бі однозначно задані лінгвістичним виразом. Для функції  $\mu_1$  приймаємо цю точку як середнє значення показника якості в експерименті. Для дзвонеподібної функції  $\mu_4$  параметр  $c_4$  однозначно вказано, а параметр  $b_4$  обираємо з технологічних міркувань як прийнятне відхилення показника якості від заданого значення. Параметр  $a_i$  ( $i = 1...4$ ) розраховуємо з урахуванням викладеної вище умови про максимальне граничне відхилення.

Результати побудови функцій приналежності для формалізації показників якості процесу варіння целюлози зведено в табл. 3.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації на основі побудованих функцій приналежності, нами використано принцип оптимальності Беллмана-Заде [7, 8] який визначає необхідну та достатню умову оптимуму для ситуацій з нечіткими критеріями. Згідно з цим принципом, оптимальним вважається такий розв'язок, для якого най-

менша з функцій приналежності буде мати максимальне значення. Для даної задачі умова оптимальності математично формулюється як:  $\min\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4\} \rightarrow \max$ . Керуючись вказаним принципом, знайдено наступне оптимальне рішення: тривалість водного передгідролізу ( $X_1$ ) 2 год 12 хв., температура передгідролізу ( $X_2$ ) 154 °C, тривалість варіння ( $X_3$ ) 3 год., температура варіння ( $X_4$ ) 166 °C; очікувані значення якісних показників одержаної целюлози: вихід целюлози ( $Y_1$ ) 57,8 %, вміст лігніну ( $Y_2$ ) 2,1 %, вміст  $\alpha$ -целюлози ( $Y_3$ ) 93,1 %, в'язкість ( $Y_4$ ) 19,6 мПа·с; значення функцій приналежності  $\mu_1 = 0,910$ ,  $\mu_2 = \mu_3 = 0,736$ ,  $\mu_4 = 0,999$ . Як видно з результатів, саме вміст лігніну та вміст  $\alpha$ -целюлози були лімітуючими для знайденого оптимального значення. Одержаний розв'язок добре узгоджується з рішеннями, отриманими іншими методами та підтверджується технологічними міркуваннями.

**Висновки і перспективи.** У результаті проведених досліджень визначено оптимальні значення технологічних параметрів натрального варіння з попереднім водним гідролізом короткого лляного волокна для одержання целюлози, призначеної для хімічної переробки. Показано ефективність одержання розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації процесу за необхідності формалізувати нечітко задані критерії оптимальності.

Одержана в результаті дослідження лляна целюлоза відповідає високим критеріям якості і після вибілювання може бути використана для виробництва нітратів целюлози або карбоксиметилцелюлози.



## Література

1. Карпунин И. И., Голуб И. А., Казакевич П. П. Химия льна и перспективные технологии его углубленной переработки. Минск: Беларус. навука, 2013. 96 с.
2. Меньяйло-Басиста І.О. Порівняльні властивості целюлози, одержаної з рослинної сировини. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2012. №6. С. 124-127.
3. Куничан В. А., Харитонов С. В. Синтез карбоксиметилцеллюлозы из льняной целлюлозы. Химия растительного сырья. 1999. №2. С. 155-157.
4. Левданский В. А., Левданский А.В., Кузнецова Б. Н. Способ получения из льна целлюлозного продукта с высоким содержанием альфа-целлюлозы. Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2014. №7. P. 63-70.
5. Барбаш В.А., Дейкун І.М., Складанний Д.М. Оптимізація процесу одержання целюлози для хімічної переробки натронним способом з попереднім водним гідролізом. Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2003. №3. С. 105–109.
6. Garga H., Ranib M., Sharmab S. P., Yashi V. Intuitionistic fuzzy optimization technique for solving multi-objective reliability optimization problems in interval environment. Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. Issue 7. P. 3157-3167.
7. Sakawa M. Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization (Applied Information Technology). New York: Springer Publishing Company, Incorporated, 2013. 306 p.
8. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

## References

1. Karpunyn, Y. Y., Holub, Y. A., Kazakevych, P. P. (2013). Khymyia lna y perspektyvnye tekhnolohy eho uhlublennoy pererabotky [Chemistry of flax and advanced technologies for its in-depth processing]. Belarus. Navuka, 96.
2. Mieniailo-Basyista, I. O. (2012). Porivnialni vlastyvyosti tseliulozy, oderzhanoi z roslynnoi syrovyny [Comparative properties of cellulose obtained from plant raw materials]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky, 6, 124-127.
3. Kunychan, V. A., Kharytonov, S. V. (1999). Syntez karboksymetyltseliulozy yz lnianoi tseliulozy [Synthesis of carboxymethylcellulose from linen cellulose]. Khymyia rastytelnoho syria, 2, 155-157.
4. Levdanskyi, V. A., Levdanskyi, A. V., Kuznetsova, B. N. (2014). Sposob polucheniya yz lna tseliuloznogo produkta s vysokym sodержanym alfa-tseliulozy [A method of producing a cellulose product with a high alpha-cellulose content from flax]. Journal of Siberian Federal University. Chemistry 1, 7, 63-70.
5. Barbash, V. A., Deykun, I. M., Skladannyi, D. M. (2003) Optimizatsiya protsesu oderjannya celulozy dlya himichyji pererodky natronnym sposobom z poperednim wodnym gidrolizom [Optimization of the process of cellulose production for chemical treatment by soda method with preliminary water hydrolysis]. Naukovi Visti NTUU KPI, 3, 105-109.
6. Garga, H., Ranib, M., Sharmab, S. P., Yashi, V (2014) Intuitionistic fuzzy optimization technique for solving multi-objective reliability optimization problems in interval environment. Expert Systems with Applications, 41 (7), 3157-3167 doi:10.1016/j.eswa.2013.11.014
7. Sakawa, M. (2013) Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization. Springer Publishing Company, 306.
8. Leonenkov, A. V. (2005) Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in the MATLAB and fuzzyTECH]. BVH-Peterburg, 736.

## SUMMARY

*I. M. Deykun, D. M. Skladannyi. Optimization the cellulose production process from flax fibre with the formalization of the optimality criteria/ Biological Resources and Nature Managment. – 2018. – 10, №1–2. – P.129–134.*

*During the long flax fibres production, the short fibres, which have limited using, are formed. The short fibre is valuable raw materials for the cellulose production. The problem of vegetable raw materials rational using is relevant. The aim of the research is solution the multi-criteria optimization problem of the flax celluloses soda boiling*





with the previous aqueous hydrolysis process by formalizing the linguistically defined optimality criteria.

The soda boiling of flax cellulose from short flax fibre with preliminary aqueous hydrolysis is carried out in the research. The alkali consumption for boiling is 20% of the mass of dry raw materials with anthraquinonoid catalyst. Quality indicators of cellulose are established.

The formalization of the optimality criteria using the methods of the fuzzy set theory is carried out. General view and type of membership functions are chosen, the universe and the values of numerical parameters are determined.

The Bellman-Zade optimality principle is used to find the optimal solution. The optimum values of

technological parameters for obtaining linseed cellulose are established, namely: the duration of aqueous pre-hydrolysis is 2 hours 12 minutes, the temperature of preliminary hydrolysis is 154 OC, the duration of sodium hydroxide is 3 hours, the boiling temperature is 166 OC with the hydro-module is 6:1. The obtained results are in good agreement with solutions obtained by other methods.

Linseed cellulose can be used after bleaching for the cellulose nitrates or carboxymethyl-cellulose production.

**Keywords:** linseed cellulose, soda boiling, multi-criteria optimization, formalization of optimality criteria, membership function

## АННОТАЦІЯ

**І. Н. Дейкун, Д. Н. Складанний.** Оптимізація процесу отримання целюлози з льняного волокна з формалізацією критеріїв оптимальності // Біоресурси і природопольовання. – 2018. – 10, №1–2. – С.129–134.

При отриманні довгого льняного волокна образуються коротке волокно, яке має обмежене використання, але є цінним джерелом сировини для виробництва целюлози. Проблема раціонального використання рослинної сировини є актуальною.

Метою роботи є рішення задачі багатокритеріальної оптимізації процесу натронної варки льняної целюлози з попереднім водним гідролізом шляхом формалізації лінгвістически заданих критеріїв оптимальності.

В дослідженні проведені натронні варки льняної целюлози з короткого льняного волокна з попереднім водним гідролізом з витратою щелочи на варку 20 % від маси абсолютно сухої сировини з каталізатором антрахіноном і визначені якісні показники целюлози.

Виконана формалізація критеріїв оптимальності з використанням методів теорії нечітких множин. Вибран тип і загальний вигляд функцій при-

надлежности, установлен универсум и определены значения числовых параметров.

Для поиска оптимального решения использован принцип оптимальности Беллмана-Заде. Установлены оптимальные значения технологических параметров получения льняной целюлозы – продолжительность водного предгидролиза – 2 часа 12 мин, температура предгидролиза – 154 OC, продолжительность натронной варки – 3 часа, температура варки 166 OC при гидромодуле 6 : 1. Полученные результаты хорошо согласуются с решениями, полученными другими методами.

Льняная целюлоза после отбеливания может быть использована для производства нитратов целюлозы или карбоксиметилцелюлозы.

**Ключевые слова:** льняная целюлоза, натронная варка, многокритериальная оптимизация, формализация критериев оптимальности, функция принадлежности