

УДК 677.11.021:519.876.5

DOI 10.37734/2518-7171-2025-1-12

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПРИДАТНОСТІ ЛУБ'ЯНОЇ СИРОВИНИ ДО МЕХАНІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ

Є. О. КАЛІНСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент;

О. В. ВОРОНКО, аспірант;

В. В. РОССОЛОВ, аспірант

(Херсонський національний технічний університет)

**Анотація.** У статті представлено наукове обґрунтування та практичну реалізацію математичного моделювання системи оцінки технологічної придатності луб'яної сировини до механічної переробки. Показано необхідність створення об'єктивної системи оцінювання якості сировини для оптимізації режимів переробки та прогнозування якості кінцевої продукції. Запропоновано математичну модель на основі теорії нечітких множин та методів багатокритеріальної оптимізації, що враховує як кількісні, так і якісні показники сировини.

Метою роботи є розробка математичного апарату для комплексної оцінки технологічної придатності луб'яної сировини до механічної переробки, що дозволяє об'єктивно визначати можливість її промислового використання та оптимізувати технологічні режими.

Об'єктом дослідження є процес оцінки технологічної придатності луб'яної сировини (трести льону) та оптимізація технологічних режимів її механічної переробки.

Предметом дослідження є математичні моделі та методи комплексної оцінки технологічної придатності луб'яної сировини, а також закономірності взаємозв'язку між характеристиками сировини та ефективністю її переробки.

Розроблено комплексний показник придатності, який враховує нормовані значення показників якості з відповідними ваговими коефіцієнтами та функцію технологічних обмежень. Вагові коефіцієнти визначено методом аналізу ієрархій на основі експертних оцінок, узгодженість яких підтверджена високим значенням коефіцієнта конкордації Кендала ( $W = 0,82$ ). Створено шкалу технологічної придатності з чотирма рівнями: висока придатність ( $P > 0,8$ ), середня придатність ( $0,6 < P \leq 0,8$ ), низька придатність ( $0,4 < P \leq 0,6$ ) та непридатність до переробки ( $P \leq 0,4$ ). Експериментальна верифікація моделі на 150 партіях льону олійного різної якості показала високу точність прогнозування (94–95 %). Практичне застосування методики продемонструвало підвищення виходу волокна на 19,6 %, зниження засміченості на 33,3 % та покращення фізико-механічних показників на 16,8 %.

**Ключові слова:** луб'яна сировина, треста льону, механічна переробка, математичне моделювання, комплексний показник, оптимізація режимів.

**Постановка проблеми в загальному вигляді та зв'язок із найважливішими науковими чи практичними завданнями.** В умовах розвитку промислової переробки луб'яних культур особливої актуальності набуває питання об'єктивного визначення технологічної придатності сировини та оптимізації режимів її переробки. Існуючі методи оцінки базуються переважно на експертних оцінках та не враховують комплексний взаємозв'язок між показниками якості сировини та параметрами технологічного процесу [2, 3]. Це призводить до неефективного використання сировинної бази та зниження якості готової продукції.

У попередніх дослідженнях було розроблено методологічні основи оцінки рівня розвитку національної системи стандартизації луб'яних волокон та запропоновано систему показників якості. Також створено класифікацію стебел льону олійного та визначено їх споживні властивості [3]. Однак залишається невирішеним питання

створення математичного апарату для комплексної оцінки технологічної придатності сировини, який би дозволив автоматизувати процес прийняття рішень при первинній переробці та оптимізувати технологічні режими.

Відсутність такого математичного апарату створює ряд проблем:

- суб'єктивність оцінки якості сировини
- складність прогнозування ефективності переробки
- неможливість оптимізації технологічних параметрів
- відсутність об'єктивних критеріїв для автоматизації процесу прийняття рішень

Особливо гостро ця проблема постає для льону олійного, який є перспективною технічною культурою і може стати альтернативою імпортованій сировині. При цьому якість стебел льону олійного має значний вплив на ефективність їх механічної переробки та властивості отриманого волокна.

Розробка математичного апарату для оцінки технологічної придатності луб'яної сировини дозволить:

1. Створити об'єктивну систему оцінювання якості
2. Прогнозувати результати переробки
3. Оптимізувати технологічні режими
4. Автоматизувати процес прийняття рішень
5. Підвищити ефективність використання вітчизняної сировинної бази

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питанню оцінки якості луб'яної сировини та оптимізації процесів її переробки присвячено значну кількість досліджень. У роботі [2] запропоновано комплексну систему індикаторів для оцінки рівня розвитку стандартизації, що включає п'ять ключових груп: технологічність методів оцінки якості, об'єктивність вимірювань, інформативність стандартів, сучасність обладнання та відповідність міжнародним вимогам. Для кожної групи визначено вагові коефіцієнти та розроблено критерії оцінки.

Значний внесок у розвиток методології оцінки якості луб'яної сировини зроблено в роботі [3], де створено систему класифікації стебел льону олійного та визначено їх споживні властивості. Зокрема, виділено основні групи показників якості:

- функціональні (вміст лубу, вихід волокна, технічна довжина)
- естетичні (колір, засміченість)
- надійності (вологість, міцність)

Аналіз останніх публікацій свідчить про відсутність цілісного математичного апарату, який би дозволив об'єктивно оцінювати технологічну придатність луб'яної сировини та оптимізувати процес її механічної переробки.

**Формування цілей статті.** Метою дослідження є розробка математичного апарату для комплексної оцінки технологічної придатності луб'яної сировини до механічної переробки, що дозволить об'єктивно визначати можливість її промислового використання та оптимізувати технологічні режими.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Вибір математичного апарату

для оцінки технологічної придатності луб'яної сировини базується на теорії нечітких множин та методах багатокритеріальної оптимізації. Це обумовлено наступними факторами:

1. Наявність якісних показників, що важко формалізуються (колір, зовнішній вигляд)
2. Нелінійність взаємозв'язків між параметрами
3. Необхідність врахування експертних оцінок
4. Наявність невизначеностей у вхідних даних

Вагові коефіцієнти  $w_i$  визначалися методом аналізу ієрархій на основі експертних оцінок. Було залучено 12 експертів з досвідом роботи в галузі первинної переробки луб'яних культур не менше 10 років. Узгодженість експертних оцінок перевірялася за коефіцієнтом конкордації Кендала:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)}, \quad (1)$$

де:  $S$  – сума квадратів відхилень;  $m$  – кількість експертів;  $n$  – кількість показників

Отримано значення  $W = 0,82$ , що свідчить про високу узгодженість оцінок.

Функція  $F(T, M, Q)$  визначається як добуток трьох складових:

$$f_t(T) = 1 - \exp\left(-k_t \cdot \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}\right), \quad (2)$$

де:  $k_t$  – коефіцієнт технологічної ефективності ( $k_t = 2,3$ );  $T$  – поточне значення технологічного параметра;  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  – граничні значення параметра

$$f_m(M) = \frac{1}{1 + \exp\left(-k_m \cdot \frac{M - M_0}{\sigma_m}\right)}. \quad (3)$$

де:  $k_m$  – коефіцієнт механічних властивостей ( $k_m = 1,8$ );  $M$  – показник механічних властивостей;  $M_0$  – оптимальне значення показника;  $\sigma_m$  – стандартне відхилення

$$f_q(Q) = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}}. \quad (4)$$

де:  $Q$  – показник якості продукції;  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\max}$  – граничні значення показника.

Таблиця 1

#### Порівняння математичних підходів до оцінки технологічної придатності

| Математичний підхід    | Переваги                                                                 | Недоліки                                                                     | Можливість застосування               |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Регресійний аналіз     | Простота реалізації, наочність результатів                               | Складність врахування якісних показників, необхідність великої вибірки даних | Обмежена                              |
| Нейронні мережі        | Висока точність прогнозування, здатність до навчання                     | Складність інтерпретації результатів, потреба у великій навчальній вибірці   | Перспективна для подальших досліджень |
| Теорія нечітких множин | Можливість формалізації якісних показників, врахування експертних оцінок | Суб'єктивність при визначенні функцій приналежності                          | Оптимальна для поставленої задачі     |

Таблиця 2

## Порівняльний аналіз методик оцінки технологічної придатності луб'яної сировини

| Методика                                | Основні показники                                                                        | Метод оцінки                                            | Точність прогнозування          | Обмеження                                                   |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Стандартний метод (ДСТУ 4149:2003)      | вологість, засміченість довжина жмені; вихід довгого волокна; ступінь вилежаності; колір | органолептична оцінка, інструментальні методи           | 70–85 % (залежно від параметра) | суб'єктивність органолептики тривалість лабораторних тестів |
| Метод Федосової Н.М.                    | морфологічні характеристики; коефіцієнт лубу; технічна довжина                           | Регресійний аналіз з використанням математичних моделей | 80–85 %                         | не враховує агротехніку та умови зберігання                 |
| Спектральний аналіз (ASTM D2495-07) [4] | хімічний склад; вміст пектинових речовин; ступінь делігніфікації                         | NIR-спектроскопія – FTIR-спектроскопія                  | 85–90 %                         | висока вартість обладнання; необхідність калібрування       |

Граничні значення показника  $P$  визначено на основі статистичного аналізу результатів переробки 150 партій льону олійного різної якості. Застосовано метод кластерного аналізу з використанням алгоритму  $k$ -means. Оптимальна кількість кластерів ( $k = 4$ ) визначена за методом «кліктя» на основі аналізу внутрішньокластерної дисперсії.

Для верифікації параметрів моделі використано метод перехресної перевірки з розбиттям вибірки на 5 частин. Середньоквадратична похибка становила:

- для навчальної вибірки – 0,054
- для тестової вибірки – 0,067

На основі системного аналізу показників якості луб'яної сировини та їх впливу на ефективність механічної переробки розроблено математичну модель оцінки технологічної придатності. Запропонована модель базується на комплексному показнику придатності  $P$ , який розраховується за формулою:

$$P = \sum (w_i \cdot K_i) \cdot F(T, M, Q), \quad (5)$$

де:  $w_i$  – вагові коефіцієнти показників якості;  $K_i$  – нормовані значення показників якості;  $F(T, M, Q)$  – функція технологічних обмежень

Для визначення вагових коефіцієнтів використано результати попередніх досліджень, де встановлено відносну важливість різних показників:

- вихід лубу/волокна ( $w_1 = 0,222$ );
- засміченість ( $w_2 = 0,184$ );
- група кольору ( $w_3 = 0,149$ );
- вологість ( $w_4 = 0,136$ ).

Нормування показників якості здійснюється за формулою:

$$K_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (6)$$

де:  $X_i$  – фактичне значення показника;  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  – граничні значення показника згідно нормативної документації

Для оцінки технологічної придатності запропоновано наступну шкалу:

- $P > 0,8$  – висока придатність (оптимальні режими переробки);

- $0,6 < P \leq 0,8$  – середня придатність (необхідна корекція режимів);

- $0,4 < P \leq 0,6$  – низька придатність (суттєва корекція режимів);

- $P \leq 0,4$  – непридатність до переробки.

Таблиця 3

## Система оцінки показників якості луб'яної сировини

| Група показників | Показники    | Граничні значення | Метод визначення |
|------------------|--------------|-------------------|------------------|
| Технологічні     | Вихід лубу   | 11,0–40,0 %       | Інструментальний |
|                  | Вологість    | 6,0–19,0 %        | Інструментальний |
| Естетичні        | Колір        | I, II, III група  | Візуальний       |
|                  | Засміченість | 5,0–20,0 %        | Інструментальний |
| Механічні        | Міцність     | Згідно стандартів | Інструментальний |

Верифікацію розробленої моделі проведено на основі експериментальних досліджень партій льону олійного різної якості. Результати верифікації представлено в таблиці 4.

Таблиця 4

## Результати верифікації математичної моделі

| Показник придатності ( $P$ ) | Прогнозована якість | Фактична якість | Відхилення, % |
|------------------------------|---------------------|-----------------|---------------|
| 0,85–1,00                    | Висока              | Висока          | 2–3           |
| 0,65–0,84                    | Середня             | Середня         | 4–6           |
| 0,40–0,64                    | Низька              | Низька          | 5–8           |

Аналіз результатів верифікації показує, що розроблена математична модель забезпечує достатньо високу точність прогнозування з середньою похибкою 5–6 %. Найбільша точність (97–98 %) досягається при оцінці сировини високої якості.

Практичне застосування розробленої методики розглянемо на прикладі оцінки технологічної придатності партії соломи льону олійного для механічної переробки.

Вихідні дані для оцінки отримано згідно з методиками діючих стандартів:

- вихід лубу – 28,5 %;
- засміченість – 12,3 %;
- група кольору – II;
- вологість – 14,2 %.

Розрахунок комплексного показника придатності складається з наступних етапів.

1. Нормування показників якості ( $K_i$ ):

$$K1(\text{вихід лубу}) = (28,5 - 11,0)/(40,0 - 11,0) = 0,603$$

$$K2(\text{засміченість}) = (20,0 - 12,3)/(20,0 - 5,0) = 0,513$$

$$K3(\text{група кольору}) = 0,75 \text{ (для II групи)}$$

$$K4(\text{вологість}) = (19,0 - 14,2)/(19,06 - 6,0) = 0,369.$$

2. Розрахунок зваженої суми з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$P = 0,222 \cdot 0,603 + 0,184 \cdot 0,513 + 0,149 \cdot 0,75 + 0,136 \cdot 0,369 = 0,568.$$

3. Визначення технологічної придатності за шкалою:

$P = 0,569$  відповідає низькій придатності ( $0,4 < P \leq 0,6$ )

4. Рекомендації щодо режимів переробки:

1. Зниження швидкості переробки на 15–20 %.

2. Збільшення інтенсивності механічної обробки.

3. Додаткове очищення сировини.

4. Контроль вологості в процесі переробки.

Для перевірки ефективності рекомендацій проведено експериментальну переробку даної партії сировини, результати якої представлено в таблиці 5.

Таблиця 5

#### Результати експериментальної переробки

| Показник                 | Стандартний режим | Скоригований режим | Різниця, % |
|--------------------------|-------------------|--------------------|------------|
| Вихід волокна, %         | 22,4              | 26,8               | +19,6      |
| Засміченість, %          | 16,8              | 11,2               | -33,3      |
| Розривне навантаження, Н | 185               | 216                | +16,8      |

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** На основі системного аналізу показників якості луб'яної сировини розроблено математичний апарат для комплексної оцінки її технологічної придатності до механічної переробки, який враховує взаємозв'язок між характеристиками сировини та ефективністю переробки. Створено математичну модель оцінки технологічної придатності, що базується на комплексному показнику, який враховує нормовані значення показників якості, вагові коефіцієнти, функцію технологічних обмежень

Розроблено систему критеріїв оцінювання та шкалу технологічної придатності, що дозволяє об'єктивно оцінювати можливість переробки сировини, прогнозувати якість готової продукції, оптимізувати режими механічної обробки.

Експериментальна верифікація розробленої методики показала високу точність прогнозування (94-95 %) та ефективність рекомендацій щодо корегування режимів переробки, що підтверджується підвищенням виходу волокна на 19,6 %, зниженням засміченості на 33,3 %, покращенням фізико-механічних показників на 16,8 %.

Практична цінність розробленої методики полягає в можливості її використання для входного контролю сировини, оптимізації технологічних процесів, прогнозування якості продукції та підвищення ефективності виробництва

Перспективи подальших досліджень полягають в розробці програмного забезпечення для автоматизації процесу оцінки технологічної придатності сировини, розширенні математичної моделі для оцінки інших видів луб'яних культур, інтеграції розробленої методики з системами управління якістю, дослідження можливості застосування методики для оцінки придатності сировини до інших видів переробки, Створення бази даних для накопичення та аналізу результатів оцінки.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 4149:2003 Треста лляна. Технічні умови. [Чинний від 2004-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 15 с.
2. Головенко Т.М., Тіхосова Г.А., Бартков Л.Г. Розроблення системи класифікації стебел льону олійного з метою їх промислового застосування. Стандартизація, сертифікація, якість. 2017. № 3(106). С. 91–99.
3. Головенко Т.М., Янюк Т.І., Бойко Г.А., Дягілев А.С., Шовкомуд О.В. Перспективні методи й системи контролю якості інноваційної луб'яної сировини. Наука та інновації. 2019. Т. 15, № 3. С. 94–109.
4. ASTM D2495-07 Standard Test Method for Moisture in Cotton by Oven-Drying. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
5. ISO 6741-1:2019 Textiles – Fibres and yarns – Determination of commercial mass. Geneva: ISO, 2019.
6. ISO 2062:2009 Textiles – Yarns from packages – Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester. Geneva: ISO, 2009.
7. ASTM D6961/D6961M-09. Standard Test Method for Color Measurement of Flax Fiber. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009. 4 p.
8. ASTM D7025-09. Standard Test Method for Assessing Clean Flax Fiber Fineness. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009. 6 p.
9. ASTM D7076-10. Standard Test Method for Measurement of Shives in Retted Flax. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. 4 p.
10. ASTM D7879-13(2018). Standard Test Method for Determining Flax Fiber Widths Using Image Analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. doi: 10.1520/D7879-13R18.



## REFERENCES

1. DSTU 4149:2003. (2004). *Tresta Iliana. Tekhnichni umovy* [Flax straw. Technical specifications]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy. [in Ukrainian].
2. Holovenko, T.M., Tikhosova, H.A., & Bartkiv, L.H. (2017). Rozroblennia systemy klasyfikatsii stebel lonu oliinoho z metoiu yikh promyslovoho zastosuvannia [Development of a classification system for oil flax stems for their industrial application]. *Standartyzatsiia, sertyfikatsiia, yakist*, 3(106), 91–99. [in Ukrainian].
3. Holovenko, T.M., Yaniuik, T.I., Boiko, H.A., Diahilev, A.S., & Shovkomud, O.V. (2019). Perspektyvni metody y systemy kontroliu yakosti innovatsiinoi lubianoï syrovyny [Promising methods and systems for quality control of innovative bast raw materials]. *Nauka ta innovatsii*, 15(3), 94–109. [in Ukrainian].
4. ASTM D2495-07. (2007). *Standard Test Method for Moisture in Cotton by Oven-Drying*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
5. ISO 6741-1:2019. (2019). *Textiles – Fibres and yarns – Determination of commercial mass*. Geneva: ISO.
6. ISO 2062:2009. (2009). *Textiles – Yarns from packages – Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester*. Geneva: ISO.
7. ASTM D6961/D6961M-09. *Standard Test Method for Color Measurement of Flax Fiber*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2009. 4 p.
8. ASTM D7025-09. *Standard Test Method for Assessing Clean Flax Fiber Fineness*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2009. 6 p.
9. ASTM D7076-10. *Standard Test Method for Measurement of Shives in Retted Flax*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2010. 4 p.
10. ASTM D7879-13(2018). *Standard Test Method for Determining Flax Fiber Widths Using Image Analysis*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2018. DOI: 10.1520/D7879-13R18.

**Ye. Kalinsky**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor; **O. Voronko**, Postgraduate Student; **V. Rossolov**, Postgraduate Student (Kherson National Technical University). **Mathematical modeling of the evaluation system for technological suitability of bast raw materials for mechanical processing**

**Abstract.** The article presents the scientific substantiation and practical implementation of mathematical modeling of the evaluation system for technological suitability of bast raw materials for mechanical processing. The necessity of creating an objective system for assessing raw material quality to optimize processing modes and predict final product quality is demonstrated. A mathematical model based on fuzzy set theory and multi-criteria optimization methods is proposed, taking into account both quantitative and qualitative indicators of raw materials.

The purpose of the work is to develop a mathematical apparatus for comprehensive assessment of the technological suitability of bast raw materials for mechanical processing, which allows objectively determining the possibility of its industrial use and optimizing technological modes.

The object of research is the process of assessing the technological suitability of bast raw materials (flax straw) and optimization of technological modes of its mechanical processing.

The subject of research is mathematical models and methods for comprehensive assessment of the technological suitability of bast raw materials, as well as patterns of relationship between raw material characteristics and processing efficiency.

A comprehensive suitability indicator has been developed that takes into account normalized values of quality indicators with corresponding weight coefficients and a function of technological limitations. Weight coefficients were determined by the hierarchy analysis method based on expert assessments, the consistency of which is confirmed by a high value of Kendall's concordance coefficient ( $W = 0.82$ ). A technological suitability scale with four levels was created: high suitability ( $P > 0.8$ ), medium suitability ( $0.6 < P \leq 0.8$ ), low suitability ( $0.4 < P \leq 0.6$ ), and unsuitability for processing ( $P \leq 0.4$ ). Experimental verification of the model on 150 batches of oil flax of various qualities showed high prediction accuracy (94–95 %). Practical application of the methodology demonstrated an increase in fiber yield by 19.6 %, reduction of contamination by 33.3 %, and improvement of physical and mechanical parameters by 16.8 %.

**Key words:** bast raw materials, flax straw, mechanical processing, mathematical modeling, comprehensive indicator, optimization of modes.