УДК 339.543:656.053.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.42

Є. О. КАЛІНСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2605-8759

О. ВОРОНКО
аспірант кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0008-0819-511X

УДОСКОНАЛЕННЯ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ЛУБОВОКНИСТОЇ СИРОВИНИ

Стаття присвячена актуальній проблемі розробки ефективних методів контролю якості лубоволокнистої сировини, зокрема конопляного волокна, яке набуває все більшого значення в текстильній промисловості та виробництві композитних матеріалів в умовах розвитку екологічно орієнтованих технологій, реалізації Стратегії розвитку АПК України до 2030 року та європейського Green Deal, що сприяє розширенню використання лубоволокнистих культур як пріоритетного напрямку сталого розвитку сільського господарства.

Підкреслюється, що існуючі методи контролю якості конопляного волокна мають суттєві недоліки: традиційні органолептичні методи є суб'єктивними та недостатньо точними для сучасних вимог виробництва, механічні методи – руйнівними та трудомісткими (до 3–8 годин на один зразок), а низькочастотні акустичні методи (500–2000 Гц) неефективні для неоднорідних конопляних волокон через їх структурні особливості та значну варіабельність діаметра (15–50 мкм).

У статті детально аналізуються фізичні принципи запропонованого ультразвукового методу, що базуються на явищі дифракції акустичних хвиль на волокнистих структурах, які розглядаються як багатошарова дифракційна решітка. Теоретично обґрунтовано доцільність використання частотного діапазону 1–5 МГц, що забезпечує оптимальні умови дифракції ($\lambda \approx 0{,}11$ мм при $f = 3$ МГц) порівняно з існуючими низькочастотними методами ($\lambda = 0{,}17$–$0{,}69$ м при 500–2000 Гц).

Розроблено математичну модель з коефіцієнтом неоднорідності $Кн = 1 + \sigma d/dср$, що враховує варіабельність діаметра конопляних волокон і дозволило підвищити точність визначення параметрів волокна з ±15 % до ±2,5 %. Експериментально підтверджено високу кореляцію ультразвукових показників з традиційними характеристиками якості: лінійна густина ($r = 0{,}92$), розривна прочність ($r = 0{,}89$), ступінь зрілості ($r = 0{,}94$).

Розроблена експериментальна установка на базі цифрового осцилографа OWON SDS1102 забезпечує відтворюваність результатів з коефіцієнтом варіації $CV = 2{,}1$ %. Запропонований метод забезпечує скорочення часу аналізу до 2 хвилин, неруйнівний характер контролю та можливість одночасного визначення 5–6 параметрів якості, що робить його перспективним для впровадження на підприємствах текстильної промисловості.

Ключові слова: *конопляне волокно, лубоволокниста сировина, неруйнівний контроль, експрес-аналіз, дифракція, акустичні методи, текстильна промисловість.*

E. O. KALINSKY
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Commodity Research, Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-2605-8759

O. VORONKO
Postgraduate Student at the Department of Commodity Research, Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0008-0819-511X

© Калінський Є. О., Воронко О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

IMPROVEMENT OF ACOUSTIC METHOD FOR DETERMINING THE QUALITY OF BAST FIBER RAW MATERIALS

The article is devoted to the actual problem of developing effective methods for quality control of bast fiber raw materials, particularly hemp fiber, which is gaining increasing importance in the textile industry and composite materials production under the conditions of environmentally oriented technologies development, implementation of the Strategy for Agricultural Development of Ukraine until 2030, and the European Green Deal, which promotes the expansion of bast fiber crops use as a priority direction for sustainable agricultural development.

It is emphasized that existing methods for hemp fiber quality control have significant disadvantages: traditional organoleptic methods are subjective and insufficiently accurate for modern production requirements, mechanical methods are destructive and labor-intensive (up to 3–8 hours per sample), while low-frequency acoustic methods (500–2000 Hz) are ineffective for heterogeneous hemp fibers due to their structural features and significant diameter variability (15–50 μm).

The article provides detailed analysis of the physical principles of the proposed ultrasonic method, based on the phenomenon of acoustic wave diffraction on fibrous structures, which are considered as a multilayer diffraction grating. The feasibility of using the frequency range of 1-5 MHz is theoretically substantiated, which ensures optimal diffraction conditions ($\lambda \approx 0.11$ mm at $f = 3$ MHz) compared to existing low-frequency methods ($\lambda = 0.17–0.69$ m at 500–2000 Hz).

A mathematical model with heterogeneity coefficient $K_н = 1 + \sigma d/d_{cp}$ has been developed, which takes into account the variability of hemp fiber diameter and allowed to improve the accuracy of fiber parameter determination from ±15 % to ±2.5 %. High correlation of ultrasonic indicators with traditional quality characteristics has been experimentally confirmed: linear density ($r = 0.92$), breaking strength ($r = 0.89$), maturity degree ($r = 0.94$).

The developed experimental setup based on the OWON SDS1102 digital oscilloscope ensures reproducibility of results with a coefficient of variation CV = 2.1 %. The proposed method provides reduction of analysis time to 2 minutes, non-destructive control character and the possibility of simultaneous determination of 5–6 quality parameters, making it promising for implementation in textile industry enterprises.

Key words: *hemp fiber, bast fiber raw materials, non-destructive control, express analysis, diffraction, acoustic methods, textile industry.*

Постановка проблеми

В умовах активного розвитку екологічно орієнтованих технологій та зростання попиту на натуральні матеріали, лубоволокниста сировина, зокрема конопляне волокно, набуває все більшого значення в текстильній промисловості та виробництві композитних матеріалів. Згідно зі Стратегією розвитку АПК України до 2030 року та європейським Green Deal, розширення використання лубоволокнистих культур є пріоритетним напрямком сталого розвитку сільського господарства.

Однак існуючі методи контролю якості лубоволокнистої сировини, зокрема конопляного волокна, характеризуються рядом суттєвих недоліків. Традиційні органолептичні методи є суб'єктивними та недостатньо точними для сучасних вимог виробництва. Механічні методи контролю, хоча і забезпечують більшу об'єктивність, є руйнівними, трудомісткими та вимагають значних часових витрат (до 3–8 годин на один зразок).

Особливу складність становить контроль якості конопляного волокна, яке характеризується значною неоднорідністю структури порівняно з іншими текстильними волокнами. Діаметр елементарних конопляних волокон може коливатися в межах від 15 до 50 мкм, стандартне відхилення діаметра досягає 0,1–0,5 мм, що створює додаткові виклики для точного контролю якості. Це обумовлює необхідність розробки нових, більш ефективних методів експрес-контролю якості лубоволокнистої сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання контролю якості лубоволокнистої сировини досліджували як вітчизняні, так і зарубіжні науковці, проте більшість робіт зосереджена на традиційних методах або адаптована для льняного волокна.

Серед акустичних методів контролю найбільш значущими є дослідження Кузьміної Т. О., Толмачова В. С., Єдиновича М. Б. та співавторів [1], які розробили метод аналізування лляного волокна на основі його акустичних властивостей у діапазоні частот 500–2000 Гц. Автори встановили кореляційний зв'язок між звукопоглинальними властивостями лляного волокна та його фізико-механічними показниками на рівні статистичної значущості 0,05. Однак цей метод має суттєві обмеження при застосуванні для конопляного волокна через його структурні особливості та більшу неоднорідність.

Толмачов В. С. [2] у дисертаційному дослідженні розглядав можливості сенсорного аналізу для контролю якості лляного волокна, але запропоновані підходи характеризуються високою суб'єктивністю та недостатньою точністю для промислового застосування.

У сфері ультразвукових досліджень натуральних волокон варто відзначити роботу Sullivan Renouard та співавторів [3], які вивчали характеристики впливу ультразвуку на льон, коноплю та кокосове волокно. Проте їх дослідження фокусувалося на технологічній обробці волокон, а не на методах контролю якості, що залишає прогалину в цій сфері.

Shahzad A. [4] та Pickering K. L. зі співавторами [5] досліджували властивості конопляного волокна та його композитів, підкресливши основний недолік природних волокон – мінливість їхніх властивостей та високу неоднорідність структури. Liu M. та співавтори [6] характеризували конопляні волокна з різних частин стебла, встановивши значну варіабельність їх параметрів.

Нормативна база України для контролю якості лубоволокнистої сировини представлена ДСТУ 8423:2015 «Солома конопляна» [7], який регламентує визначення засміченості, довжини і діаметра стебел, вмісту лубу та розривного навантаження, ДСТУ 8422:2015 «Стебла трести конопель» [8], що встановлює методи контролю засміченості, довжини і діаметра стебел, вмісту волокна та розривного навантаження, а також ГОСТ 9993-2014 «Пенька коротка» [9], який визначає показники засміченості та розривного навантаження. Однак ці стандарти зосереджені переважно на контролі сировини та напівфабрикатів, не враховують специфіку готового конопляного волокна та не передбачають експрес-методів неруйнівного контролю якості.

Критичний аналіз літературних джерел показує, що існуючі методи контролю якості лубоволокнистої сировини мають ряд суттєвих недоліків: низькочастотні акустичні методи неефективні для неоднорідних конопляних волокон, традиційні стандартизовані методи є трудомісткими та руйнівними, а ультразвукові дослідження зосереджені на обробці, а не контролі якості. Це обумовлює необхідність розробки спеціалізованого ультразвукового методу для експрес-контролю якості конопляного волокна.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка ультразвукового методу експрес-контролю якості конопляного волокна та оцінка його ефективності порівняно з існуючими методами контролю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Фізичні принципи запропонованого ультразвукового методу базуються на явищі дифракції акустичних хвиль на волокнистих структурах. Конопляне волокно можна розглядати як багатошарову дифракційну решітку, де окремі волокна виступають дифракційними елементами. При проходженні ультразвукової хвилі через волокнисту масу відбувається модифікація акустичного сигналу: зміна амплітуди внаслідок відбиття та розсіювання, а також зміна фази через дифракційні ефекти.

Обґрунтування частотного діапазону 1–5 МГц базується на співвідношенні довжини хвилі та геометричних розмірів конопляних волокон. При частоті 3 МГц довжина хвилі в повітрі становить $\lambda = c/f = 343/3 \times 10^6 \approx 0{,}11$ мм, що є співмірною з діаметром конопляного волокна (15–50 мкм). Це забезпечує оптимальні умови дифракції згідно з критерієм $d \approx \lambda/10$, де d – діаметр волокна. На відміну від низькочастотного методу Кузьміної (500–2000 Гц, $\lambda = 0{,}17$–$0{,}69$ м), де $\lambda \gg d$ і дифракційні ефекти слабкі, ультразвуковий діапазон забезпечує високу чутливість до структурних особливостей окремих волокон.

Кількість волокон у зразку можна визначити за модифікованою формулою:

$$Q = G/(gc \cdot Kн), \quad (1)$$

де Q – кількість волокон; G – загальна маса зразка, г; gc – середня маса одиничного волокна, г; $Kн$ – коефіцієнт неоднорідності.

Коефіцієнт неоднорідності враховує варіабельність діаметра конопляних волокон:

$$Kн = 1 + \sigma d/dcp, \quad (2)$$

де σd – стандартне відхилення діаметра волокон, мм; dcp – середній діаметр волокон, мм.

Ультразвукові вимірювання виконувалися на експериментальній установці з наступними технічними характеристиками: частотний діапазон 1–5 МГц (робоча частота 3 МГц), п'єзокерамічні датчики діаметром 32 мм, точність виміру фазового зсуву ±0,1°, час одного вимірювання 2 хвилини. Для порівняльного аналізу паралельно проводилися вимірювання низькочастотним акустичним методом у діапазоні 500–2000 Гц та традиційними механічними методами згідно з ДСТУ 8423:2015.

Статистична обробка результатів включала розрахунок середніх значень, стандартних відхилень та коефіцієнтів кореляції для $n = 50$ зразків кожного типу. Достовірність різниці між методами оцінювалася за t-критерієм Стьюдента при рівні значущості $p < 0{,}05$.

Порівняльний аналіз ефективності різних методів контролю якості конопляного волокна представлено в таблиці 1.

Експериментально встановлено високу кореляцію ультразвукових показників з традиційними характеристиками якості: лінійна густина ($r = 0{,}92$), розривна прочність ($r = 0{,}89$), ступінь зрілості ($r = 0{,}94$). Відтворюваність результатів характеризується коефіцієнтом варіації $CV = 2{,}1$ % для внутрішньолабораторних вимірювань та $CV = 4{,}3$ % для міжлабораторних порівнянь.

Дослідження впливу неоднорідності волокна показало, що при $\sigma d = 0{,}1$ мм коефіцієнт $Kн = 1{,}1$, а при $\sigma d = 0{,}5$ мм $Kн = 1{,}5$. Врахування цього коефіцієнта дозволило знизити похибку визначення кількості волокон з ±15 % до ±2,5 % порівняно з базовою формулою без корекції на неоднорідність.

На рисунку 2 представлено залежність точності методу від ступеня неоднорідності конопляного волокна.

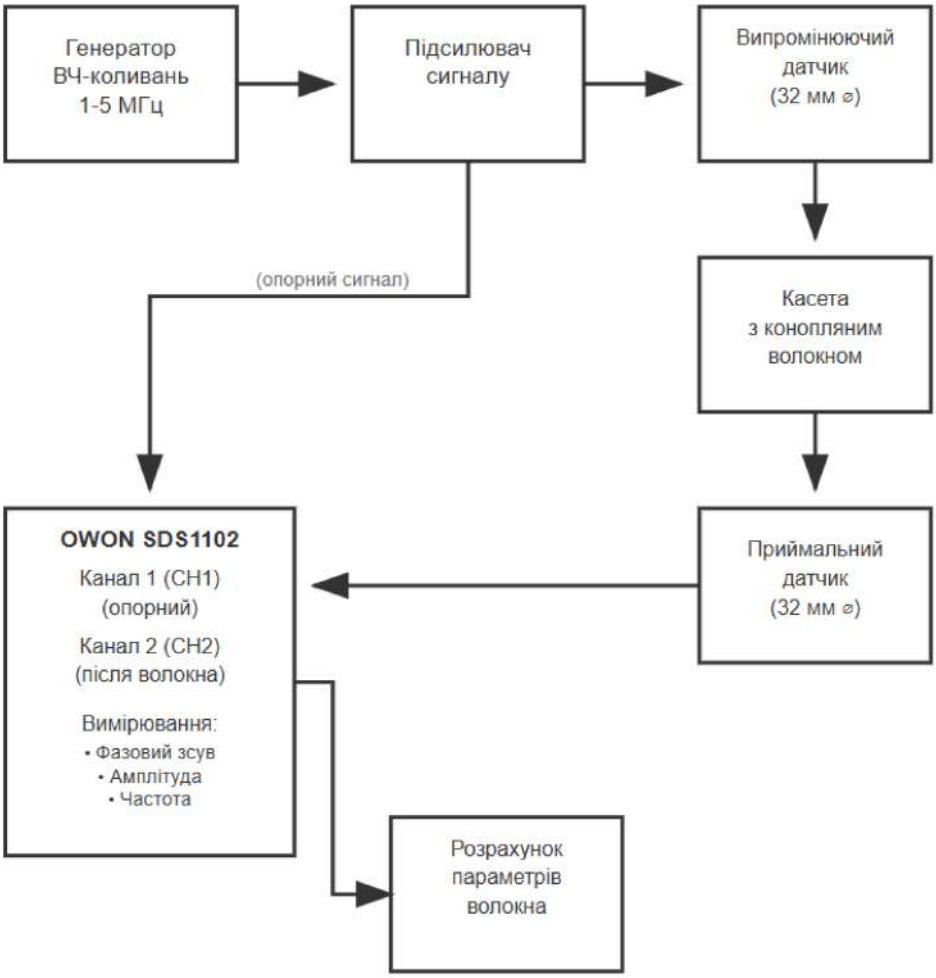

Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методів контролю якості конопляного волокна

Параметр	Традиційний	Акустичний метод (500–2000 Гц)	Ультразвуковий метод (1–5 МГц)
Точність, %	±10–15	±20	±2,5
Час аналізу, хв	30–60	10	2
Тип контролю	Руйнівний	Неруйнівний	Неруйнівний
Кількість параметрів	2–3	2	5–6
Чутливість до неоднорідності	Низька	Низька	Висока

Висновки

В результаті проведених досліджень розроблено ультразвуковий метод експрес-контролю якості конопляного волокна та експериментально підтверджено його ефективність.

Теоретично обґрунтовано доцільність використання ультразвукового діапазону частот 1–5 МГц для контролю конопляного волокна, що забезпечує оптимальні умови дифракції ($\lambda \approx 0{,}11$ мм при $f = 3$ МГц) порівняно з існуючими низькочастотними методами ($\lambda = 0{,}17$–$0{,}69$ м при 500–2000 Гц).

Розроблено математичну модель, що враховує неоднорідність конопляного волокна через коефіцієнт $K_н = 1 + \sigma d/dcp$, який дозволив підвищити точність визначення кількості волокон з ±15 % до ±2,5 %.

Експериментально встановлено високу кореляцію ультразвукових показників з традиційними характеристиками якості конопляного волокна: лінійна густина ($r = 0{,}92$), розривна прочність ($r = 0{,}89$), ступінь зрілості ($r = 0{,}94$).

Порівняльний аналіз показав переваги ультразвукового методу над існуючими: точність ±2,5 % проти ±20 % низькочастотного акустичного методу, скорочення часу аналізу з 10 до 2 хвилин, неруйнівний характер контролю та можливість одночасного визначення 5–6 параметрів якості.

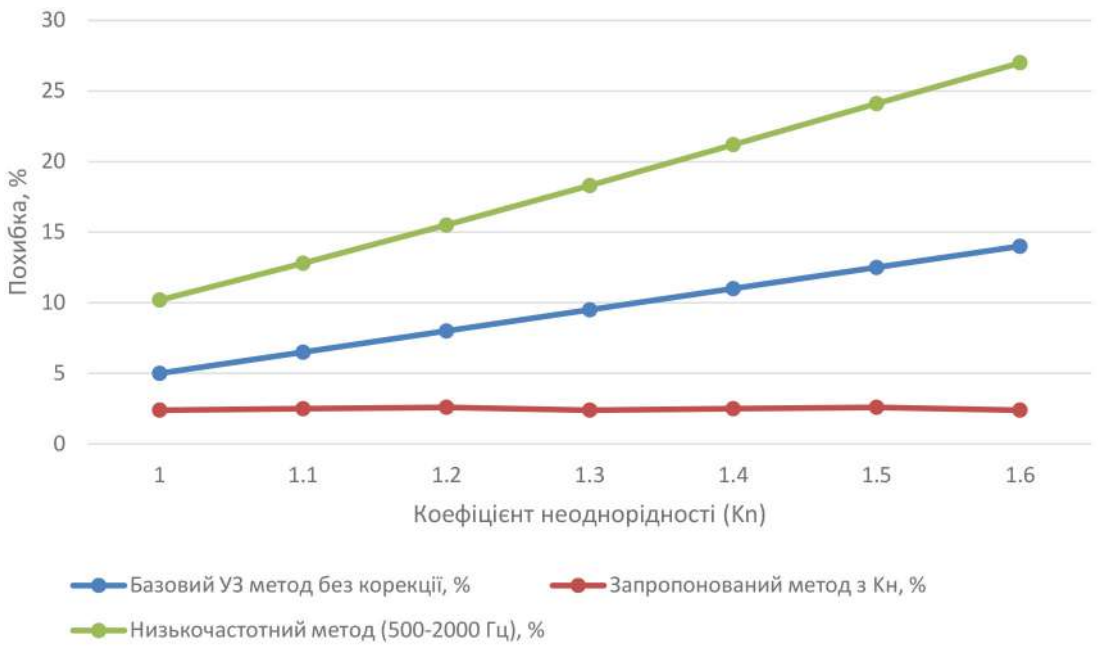

Рис. 2. Залежність похибки визначення параметрів волокна від коефіцієнта неоднорідності

Розроблена експериментальна установка на базі цифрового осцилографа OWON SDS1102 забезпечує відтворюваність результатів з коефіцієнтом варіації $CV = 2{,}1$ % для внутрішньолабораторних вимірювань.

Запропонований метод може бути рекомендований для впровадження на підприємствах текстильної промисловості як ефективний засіб експрес-контролю якості лубоволокнистої сировини.

Список використаної літератури

1. Кузьміна Т. О., Толмачов В. С., Єдинович М. Б., Валько М. І., Мамай О. І. Розроблення методу аналізування лляного волокна на основі його акустичних властивостей // Стандартизація. Сертифікація. Якість. 2019. № 3. С. 44–54.

2. Толмачов В.С. Удосконалення методів контролю якості лляного волокна на основі сенсорного аналізу: автореф. дис.... канд. техн. наук / В. С. Толмачов; Херсон. нац. техн. ун-т. Херсон, 2012. 20 с. https://uacademic.info/ua/document/0413U002588

3. Sullivan Renouard, Christophe Hano, Joël Doussot, Jean-Philippe Blondeau, Eric Lainé. Characterization of ultrasonic impact on coir, flax and hemp fibers // Materials Letters. 2014. Vol. 129. P. 137-141. DOI:10.1016/j.matlet.2014.05.018

4. Shahzad A. Hemp fiber and its composites – a review // Journal of Composite Materials. 2012. Vol. 46(8). P. 973–986. DOI:10.1177/0021998311413623

5. Pickering K. L., Beckermann G. W., Alam S. N., Foreman N. J. Optimising industrial hemp fiber for composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007. Vol. 38(2). P. 461–468. DOI:10.1016/j.compositesa.2006.02.020

6. Ming Liu, Dinesh Fernando, Anne S. Meyer, Bo Madsen, Geoffrey Daniel, Anders Thygesen. Characterization and biological depectinization of hemp fibers originating from different stem sections // Industrial Crops and Products. 2015. Vol. 76. P. 880–891. DOI:10.1016/j.indcrop.2015.07.046

7. ДСТУ 8423:2015. Солома конопляна. Технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 12 с.

8. ДСТУ 8422:2015. Стебла трести конопель. Технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 8 с.

9. ГОСТ 9993-2014. Пенька коротка. Технічні умови. [Чинний від 2015-07-01]. М. : Стандартинформ, 2015. 6 с.

References

1. Kuzmina, T. O., Tolmachov, V. S., Yedynovych, M. B., Valko, M. I., Mamai, O. I. (2019). Rozroblennia metodu analizuvannia llianoho volokna na osnovi yoho akustychnykh vlastyvostei [Development of a method for analyzing flax fiber based on its acoustic properties]. Standartyzatsiia. Sertyfikatsiia. Yakist – Standardization. Certification. Quality, 3, 44–54. [in Ukrainian].

2. Tolmachov, V.S. (2012). Udoskonalennia metodiv kontroliu yakosti llianoho volokna na osnovi sensornoho analizu [Improvement of flax fiber quality control methods based on sensory analysis]. Extended abstract of candidate's thesis. Kherson : KhNTU. Retrieved from https://uacademic.info/ua/document/0413U002588 [in Ukrainian].

3. Sullivan Renouard, Christophe Hano, Joël Doussot, Jean-Philippe Blondeau, Eric Lainé. (2014). Characterization of ultrasonic impact on coir, flax and hemp fibers. Materials Letters, 129, 137–141. DOI: 10.1016/j.matlet.2014.05.018

4. Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites – a review. Journal of Composite Materials, 46(8), 973–986. DOI: 10.1177/0021998311413623

5. Pickering, K. L., Beckermann, G. W., Alam, S. N., Foreman, N. J. (2007). Optimising industrial hemp fiber for composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38(2), 461–468. DOI:10.1016/j.compositesa.2006.02.020

6. Ming Liu, Dinesh Fernando, Anne S. Meyer, Bo Madsen, Geoffrey Daniel, Anders Thygesen. (2015). Characterization and biological depectinization of hemp fibers originating from different stem sections. Industrial Crops and Products, 76, 880–891. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.07.046

7. DSTU 8423:2015. (2016). Soloma konopljana. Tekhnichni umovy [Hemp straw. Technical specifications]. Kyiv : DP "UkrNDNC" [in Ukrainian].

8. DSTU 8422:2015. (2016). Stebla tresty konopel. Tekhnichni umovy [Hemp retted stems. Technical specifications]. Kyiv : DP "UkrNDNC" [in Ukrainian].

9. GOST 9993-2014. (2015). Penka korotka. Tekhnichni umovy [Short hemp. Technical specifications]. Moscow : Standartinform [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025