



Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНІШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315

<https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.329939>

ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ІЗ СТЕБЕЛ АМАРАНТУ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ПАПЕРУ І КАРТОНУ

Григорій ЛИЗАК, Данііл ДРАГАН, Валерій БАРБАШ
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
проспект Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: lizakgrisa210@gmail.com

Анотація

Проаналізовано технології переробки твердих відходів рослинної сировини на прикладі стебел амаранту у целюлозу і наноцелюлозу та використання наноцелюлози у виробництві паперу і картону. Показано, що використання двостадійної термохімічної обробки рослинної сировини дозволяє отримати целюлозу з низьким залишковим вмістом лігніну і зольністю, яка придатна для подальшого хімічного перероблення, зокрема для екстракції з неї наноцелюлози. Наведено приклади покращення показників якості паперу і картону за рахунок використання наноцелюлози із відходів рослинної сировини, що дозволяє скоротити споживання деревини та зменшити негативний вплив на довкілля.

Ключові слова: стебла амаранту, целюлоза, наноцелюлоза, папір, картон.

У сучасних умовах економічного та екологічного розвитку України особливого значення набуває пошук ефективних і сталих технологій виробництва товарів широкого споживання. Це стосується і продукції целюлозно-паперовій галузі – паперу і картону, рівень споживання яких в Україні залишається одним із найнижчих у Європі й не перевищує 32 кг на душу населення, у той час як у розвинених країнах цей показник сягає 250 кг [1]. Традиційною сировиною для виробництва паперу і картону є деревина, обсяг вільних запасів якої в Україні є обмеженим. Рівень лісистості в Україні становить лише близько 16%, що значно нижче за середній показник у країнах ЄС 39% [2]. Необхідність збереження існуючих лісових масивів відповідає принципам екологічної сталості і потребує пошуку альтернативних джерел целюлози, до яких відноситься відходи сільськогосподарських рослин. В Україні, як країні зі значним аграрним потенціалом, щорічно утворюється більше 1 млрд тонн відходів рослинного походження, які мало задіяні в промисловому виробництві [3]. Використання стебел сільськогосподарських культур, зокрема стебел амаранту, як джерела целюлози дозволять не лише зменшити обсяги використання деревини, але й створити замкнені ланцюги переробки твердих відходів біомаси.

Існуючі технології перероблення рослинної сировини у целюлозу, наприклад, сульфатний і сульфатний способи делігніфікації, забруднюють довкілля шкідливими сірковмісними речовинами [1] і потребують розробки альтернативних екологічно безпечних методів. Застосування новітніх технологій у целюлозно-паперовій промисловості є також актуальним

із-за необхідності заміни використання синтетичних хімічних допоміжних речовин (ХДР) із вичерпних джерел енергії (нафти, природного газу та кам'яного вугілля), що застосовуються у виробництві паперу і картону. Потрапляючи у навколишнє середовище, ці сполуки спричиняють забруднення водних об'єктів, повітря та ґрунтів, що унеможливорює досягнення екологічної рівноваги та зменшує тривалість життя людей і тварин.

Для заміни екологічно шкідливих ХДР упродовж останніх років проводяться активні дослідження з розробки технологій одержання і використання нових функціональних матеріалів, зокрема наноцелюлози, яка є біорозкладним, нетоксичним і високоефективним наповнювачем та армуючою речовиною, що має унікальні фізико-хімічні властивості: високу питому поверхню, механічну міцність, прозорість, термостійкість та здатність до утворення гідрогелів [4]. Тому розробка технологій одержання целюлози і наноцелюлози з відходів аграрної промисловості є інноваційним напрямом, що поєднує екологічну доцільність, економічну вигідність та технологічну ефективність. Такий підхід не лише сприяє впровадженню принципів "зеленої хімії" у целюлозно-паперову промисловість, а й розширює можливості використання наноцелюлози як функціональної добавки для поліпшення фізико-механічних та бар'єрних властивостей паперу і картону. Крім того, переробка аграрних відходів у цінні біоматеріали забезпечує скорочення викидів CO₂, зменшення обсягів спалювання твердих сільськогосподарських відходів, і тим самим підтримує національну кліматичну політику.

Метою даної роботи є огляд літератури щодо технологій переробки твердих відходів рослинної сировини у целюлозу і наноцелюлозу та використання наноцелюлози, отриманої зі стебел амаранту, як екологічно безпечного та ефективного компонента у виробництві паперу і картону.

Якість целюлози визначається способом делігніфікації, технологічними параметрами її одержання із рослинної сировини та вмістом основних компонентів, з яких вона складається [1]. В табл. 1 наведено хімічний склад стебел амаранту (*Amaranthus caudatus* L.) у порівнянні з іншими представниками рослинної сировини.

Таблиця 1. Хімічний склад рослинної сировини (%) [5, 6]

Сировина	Целюлоза	Лігнін	Розчинні речовини у		СЖВ*	Зольність
			воді	NaOH		
Амарант	32,30	13,18	23,49	46,84	30,06	11,7
Очерет	49,3	22,9	10,6	19,4	2,3	3,5
Кукурудза	41,6–42,6	17,9–18,0	10,1–11,8	18,7–19,6	3,0–3,5	3,9–4,7
Соняшник	40,6–41,8	20,1–26,1	5,6–4,8	35,2–36,6	2,1–3,8	3,0–3,4
Рисова солома	28–40	12–16	16,7	38–48	5–7	15–20
Топінамбур	28,50	14,77	26,48	48,50	33,91	3,15
Береза	41,0	21,0	2,2	11,2	1,8	0,5
Сосна	47,0	27,5	6,7	19,4	3,4	0,2

*-СЖВ- смоли, жири, воски

Аналіз наведених у табл. 1 даних свідчить про те, що за вмістом основних компонентів стебла амаранту відрізняються від представників хвойної і листяної деревини більшим вмістом речовин, що екстрагуються гарячою водою і лугом, і суттєво більшим вмістом

мінеральних речовин (зольністю), що потрібно враховувати в процесах одержання з нього волокнистих напівфабрикатів. За вмістом основних компонентів – целюлози, геміцелюлози і лігніну – стебла амаранту близькі до стебел кукурудзи, соняшника та рисової соломи, що свідчить про можливість їх перероблення на целюлозовмісну продукцію різного призначення. При цьому стебла амаранту мають менший вміст лігніну, ніж у деревині, що апріорі свідчать про необхідність менших витрат хімічних реагентів в процесах одержання з них целюлози. У складі амаранту спостерігається підвищений вміст золи та екстрактивних речовин, що з одного боку може ускладнювати очищення сировини, але з іншого — надає можливість для побічного вилучення корисних компонентів. Наприклад, високий вміст калію у зольній фракції (4,4%) створює передумови для хімічної рекуперації та потенційного використання зольних залишків амаранту як одного із компонентів мінеральних добрив [5].

На основі хімічного складу рослинної сировини можна апріорі стверджувати про актуальність використання стебел амаранту як джерела для одержання з нього целюлози і наноцелюлози. За умов проведення певних стадій термохімічної обробки стебел амаранту, зокрема попередньої лужної екстракції та органосольвентного варіння стебел амаранту можна очікувати одержання целюлози з низьким залишковим вмістом лігніну менше 1% і зольністю менше 0,5%, як це спостерігалось в наших попередніх роботах [6-9]. Проведення подальшої обробки амарантової органосольвентної целюлози методами кислотного гідролізу або окисненням в ТЕМПО-середовищі або глибокими евтектичними розчинниками можна отримати наноцелюлозу з такими показниками якості, як для наноцелюлози із стебел інших рослин: наночастинки діаметром 5-25 нм, щільністю до 1,52 г/см³, прозорістю до 81,6%, міцністю на розрив до 65 МПа [6-9]. Наноцелюлоза (НЦ) з такими показниками може бути використана як зміцнююча добавка у виробництві паперу і картону. Так, наприклад, у роботі [10] показано вплив витрати наноцелюлози на розривну довжину паперу для пакування харчових продуктів (рис. 1).

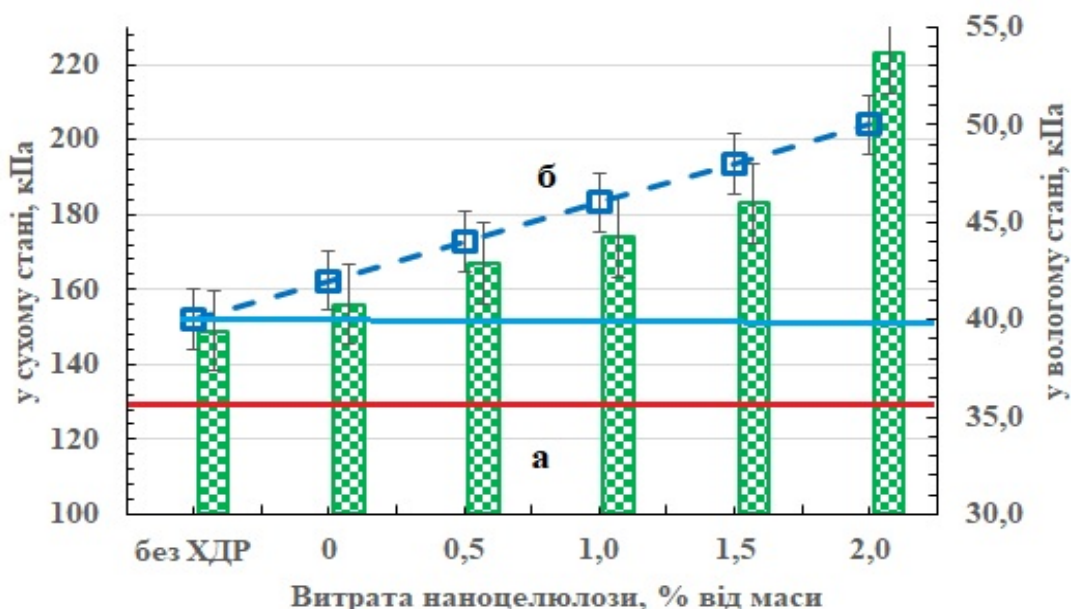


Рисунок 1. Залежність абсолютного опору продавлюванню зразків паперу від витрати НЦ у масу в сухому (а) і вологому (б) стані (горизонтальні лінії – вимоги стандарту для паперу у сухому (червона) і вологому (синя) стані)

Із отриманих залежностей видно, що збільшення вмісту НЦ у композиції паперу призводить до покращення значень показника абсолютного опору продавлювання як у сухому, так і у вологому стані. Підвищення показника абсолютного опору продавлювання зразків паперу пояснюється утворенням додаткових водневих зв'язків частинок НЦ, які мають високу поверхневу активність, з макромолекулами целюлози паперової маси, що сприяє утворенню більш міцних зв'язків між ними [10].

У роботі [11] показано, що додавання 10% нанофібрильованої целюлози (НФЦ) до целюлози з твердих порід деревини забезпечує суттєве зростання показника міцності на розрив, навіть при зниженні маси листа з 60 г/м² (рис. 2а). Крім покращення міцності, додавання НФЦ дозволяє зменшити масу волокон паперу, що зменшує витрати на сировину без втрати якості кінцевого продукту. Як показано на рис. 2б, при оптимальному вмісті НФЦ (6% для дешевших волокон і до 10% для дорожчих) можна досягти значного зниження вартості волоконної сировини — до 149 доларів США на тону при використанні волокон з високою ринковою вартістю [11].

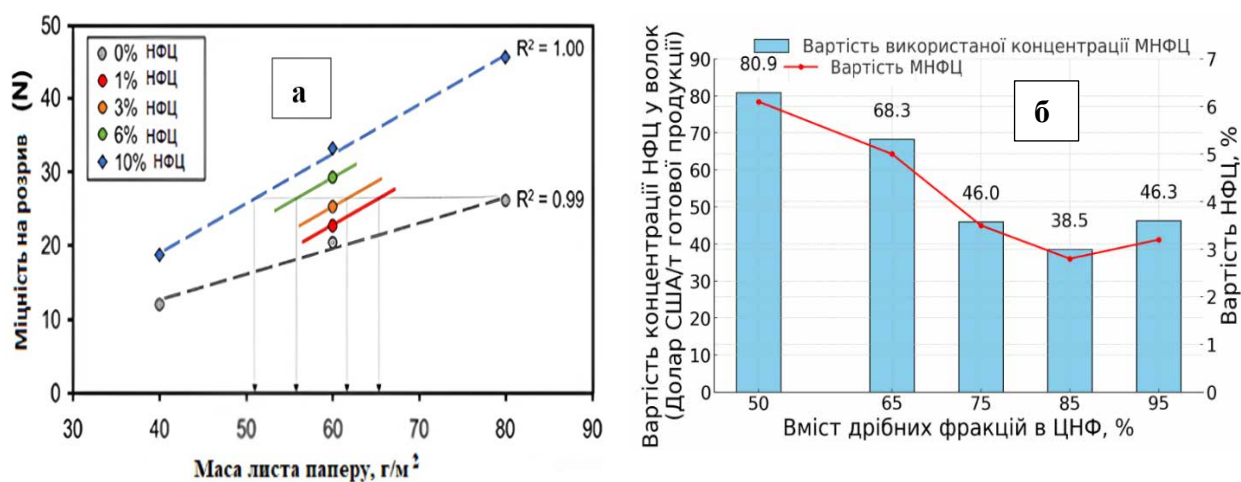


Рисунок 2. Залежність показника міцності на розрив паперу з додаванням наноцелюлози (а) і вартості готової продукції від вмісту НФЦ (б)

Окрім міцності, НЦ значно покращує бар'єрні властивості паперу. У дослідженнях [12] показано, що додавання 4,5% НЦ знижує пористість матеріалу на 80%, що позитивно впливає на водостійкість і газонепроникність (рис. 3а) та особливо важливо у виробництві пакувальних матеріалів, де потрібна надійна ізоляція від вологи, жирів та кисню.

Додавання НЦ призводить також до підвищення індексу розриву (рис. 3б). Так, додавання 6% НЦ підвищує міцність на розрив на 35%, що підтверджує ефективність армування волокнистої структури наноцелюлозними компонентами [12].

Вплив додавання наноцелюлози у волокнисту масу на показники поверхневої вбирності води під час однобічного змочування і опору продавлювання для поверхневого шару (Кобб₁₈₀₀) і нижнього шару (Кобб₆₀) картону тарного наведено на рис. 4 [9]. Отримані дані свідчать, що додавання наноцелюлози у волокнисту масу підвищує вологостійкість і механічну міцність картону. При цьому додавання біорозкладної наноцелюлози у волокнисту масу з витратами 4 кг/т від маси картону дозволяє зменшити витрати шкідливої ХДР на 50%, що сприятиме покращенню стану довкілля і здоров'я людей та отримати значення показників, які задовольняють вимогам стандарту підприємства.

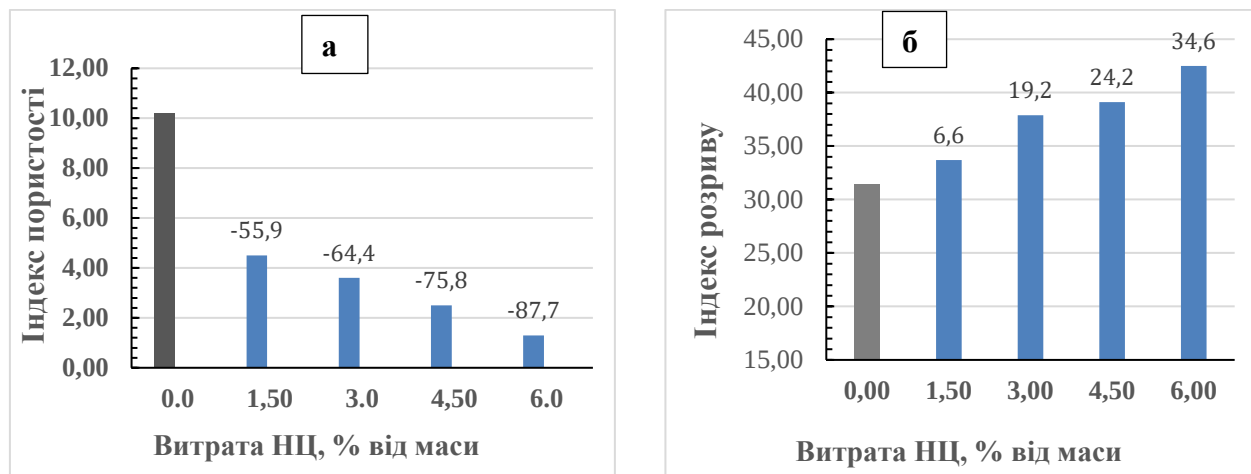


Рисунок 3. Залежність індексів пористості (а) і розриву (б) паперу від витрати наноцелюлози в масу паперу (цифри на рисунках показують зміну відповідних показників у відсотках від значення для зразків паперу без використання наноцелюлози)

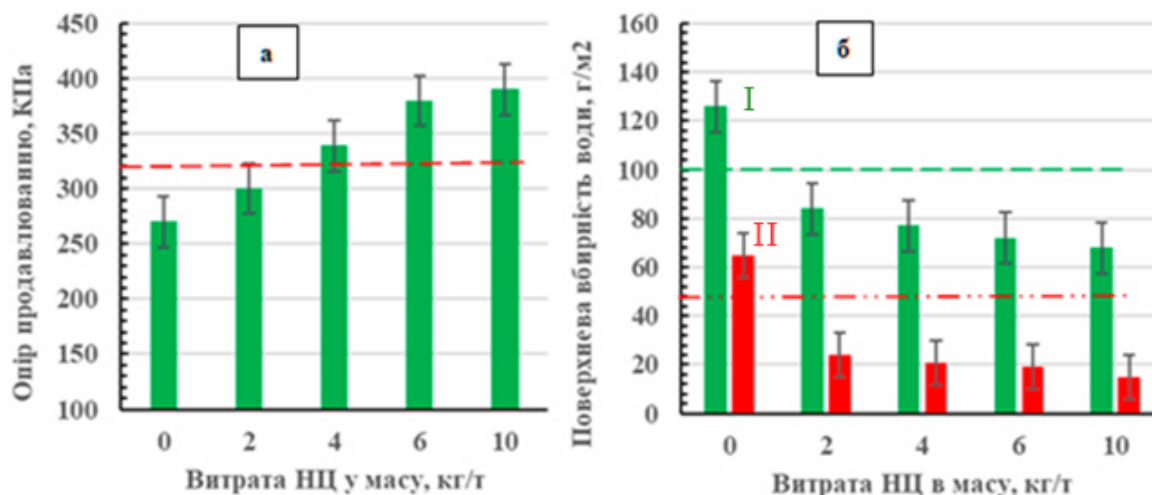


Рисунок 4. Залежності опору продавлювання (а) і поверхневої вбирності води під час одностороннього змочування (б) для поверхневого шару (I – Кобб1800) і нижнього шару (II – Кобб60) картону тарного від витрат НЦ (горизонтальні лінії – вимоги стандарту)

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок про доцільність використання стебел амаранту як альтернативного джерела целюлози і наноцелюлози для потреб целюлозно-паперової промисловості. Хімічний склад стебел амаранту, зокрема високий вміст целюлози та низький рівень лігніну, є сприятливим для одержання целюлози і наноцелюлози за менших витратами хімічних реагентів. Отримана наноцелюлоза показала високу ефективність як функціональна добавка: вона істотно підвищує фізико-механічні властивості паперу і картону, знижує його масу без втрати міцності, покращує бар'єрні характеристики та сприяє зменшенню витрат волокнистої сировини. Наведені дані підтвердили наявність лінійної залежності між міцністю на розрив і масою листа паперу з додаванням наноцелюлози в його волокнисту композицію. При цьому максимальний економічний ефект від додавання наноцелюлози досягається за її витрати 6–10% в залежності від вартості волокна.

Використання наноцелюлози, отриманої з амаранту, є ефективним екологічно обґрунтованим підходом, що дозволяє підвищити якість картонно-паперової продукції, скоротити споживання традиційної сировини та зменшити негативний вплив шкідливих синтетичних хімічних допоміжних речовини на довкілля. З огляду на наявність значного обсягу цього виду сільськогосподарських залишків в Україні, дана технологія має високий потенціал для широкого промислового впровадження.

Література

1. Барбаш, В.А. Технології перероблення недеревної рослинної сировини у целюлозовмісну продукцію : монографія / В. А. Барбаш. Київ : Каравела, **2022**. – 360 с. ISBN 978-996-96914-60. https://caravela.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=282
2. Forests in the EU: 39% of the EU is covered with forests. Eurostat, 2021. 5 с. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/edn-20210321-1>
3. Русан, В.М.; Жураковська, Л.А. Аграрний сектор України у 2023 році: складники стійкості, проблеми та перспективні завдання. Центр економічних і соціальних досліджень. 2024, 7 с. https://niss.gov.ua/sites/default/files/2024-02/az_agrosector_15022024.pdf
4. Postek, M.T.; Moon, R.J.; Rudie, A.W.; Bilodeau, M.A. Production and Applications of Cellulose Nanomaterials. *TAPPI PRESS*, **2013**, 321 p., ISBN: 978-1-59510-224-9
5. Fišerová, M.; Gigac, J.; Majtnerová, A.; Szeiffová, G. Evaluation of annual plants (*Amaranthus caudatus* L., *Atriplex hortensis* L., *Helianthus tuberosus* L.) for pulp production. *Cell. Chemistry & Technology*. **2006**, 40(6), 405. <https://www.researchgate.net/publication/280020563>
6. Barbash, V.A., Yashchenko, O.V. Preparation, Properties and Use of Nanocellulose from Non-Wood Plant Materials. In: Novel Nanomaterials, Editor Krishnamoorthy K., pp. 61-83, IntechOpen, London, **2021**. ISBN 978-1-83881-025-2. DOI: 10.5772/intechopen.94272
7. Barbash, V.A.; Yashchenko, O.V.; Gondovska, A.S.; Deykun I.M. Preparation and characterization of nanocellulose obtained by TEMPO-mediated oxidation of organosolv pulp from reed stalks. *Appl Nanosci*. **2022**, 12, 835. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01749-z>.
8. Barbash, V.A.; Yashchenko, O.V.; Yakymenko, O.S. et al. Extraction, properties and use of nanocellulose from corn crop residues. *Appl Nanosci*. **2023**. <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02926-y>
9. Барбаш, В.А.; Якименко, О.С.; Березовський, Г. Г.; Ященко, О. В. Вплив соняшникової наноцелюлози на показники якості картону тарного вологостійкого. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. **2024**, 4, 69. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2024.319131>
10. Барбаш, В.А.; Якименко, О.С.; Ященко, О.В. Вплив конопляної наноцелюлози на показники якості паперу для пакування харчових продуктів. *Вопроси хімії і хімічної технології*. **2023**, 6, 5.
11. Zambrano, F.; Starkey, H.; Wang, Y.; Abbati de Assis, C.; Venditti, R.; Pal, L.; Jameel, H.; Hubbe, M. A.; Rojas, O. J.; Gonzalez, R. Using micro- and nanofibrillated cellulose as a means to reduce weight of paper products: A review, *BioResources*. **2020**, 15(2), 4553.
12. Sanchez-Salvador, J.L.; Balea, A.; Monte, M.C.; Negro, C.; Miller, M.; Olson, J., Blanco A. Comparison of mechanical and chemical nanocellulose as additives to reinforce recycled cardboard. *Scientific Reports*, **2020**, 10, 60507. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60507-2>

TECHNOLOGIES FOR OBTAINING NANOCELLULOSE FROM AMARANTH
STEMS AND ITS USE IN PAPER AND CARDBOARD PRODUCTION

Hryhorii LYZAK

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 0356, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-9502-4572>

Daniil DRAGAN

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 0356, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-7569-9143>

Valerii BARBASH

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 0356, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7933-6038>

Abstract

The technologies for processing solid waste of plant raw materials using the example of amaranth stems into cellulose and nanocellulose and the use of nanocellulose in the production of paper and cardboard are analyzed. It is shown that the use of two-stage thermochemical treatment of plant raw materials allows to obtain cellulose with a low residual lignin content and ash content, which is suitable for further chemical processing, in particular for the extraction of nanocellulose from it. Examples of improving the quality of paper and cardboard through the use of nanocellulose from plant waste are given, which allows to reduce wood consumption and reduce the negative impact on the environment.

Key words: amaranth stems, cellulose, nanocellulose, paper, cardboard.