

УДК 633.11+631.572:547.992:66.094.941

## КОНВЕРСІЯ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНОЇ БІОМАСИ З ОТРИМАННЯМ БІОПАЛИВА

Ободович О.М.<sup>1</sup>, д.т.н., Хоменко В.О.<sup>2</sup>, Шейко Т.В.<sup>3</sup>, к.т.н., Чернявський К.Є.<sup>4</sup>, к.т.н., Парченко В.М.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>професор, завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>, e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)

<sup>2</sup>гол. конструктор Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, e-mail: [xbo1959@gmail.com](mailto:xbo1959@gmail.com)

<sup>3</sup>пр.н.с., старший дослідник Інституту продовольчих ресурсів НААН України, вул. Євгена Сверстюка 4а, Київ, 02002, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>, e-mail: [sheiko\\_tamila@ukr.net](mailto:sheiko_tamila@ukr.net)

<sup>4</sup>с.н.с. Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)

<sup>5</sup>гол. механік Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.11>

В статті проведено аналіз лігноцелюлозної біомаси, що утворюється в результаті сільськогосподарської діяльності, для переробки в біопаливо; склад лігноцелюлозних матеріалів; порівняльна характеристика методів попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси в технологіях отримання біопалива та порівняльні дані з отримання біоетанолу з різних лігноцелюлозних матеріалів.

The article analyzes lignocellulosic biomass generated as a result of agricultural activities for processing into biofuels; the composition of lignocellulosic materials; a comparative characteristic of methods for pre-processing lignocellulosic biomass in biofuel production technologies and comparative data on the production of bioethanol from various lignocellulosic materials.

Бібл. 35, табл. 3, рис. 1.

**Ключові слова:** лігноцелюлоза, біомаса, біоконверсія, делігніфікація, біопаливо.

ДСП – Деревинностружкова плита;

НАН – Національна академія наук;

РПА – роторно-пульсаційний апарат;

США – Сполучені Штати Америки.

**Вступ.** В даний час все більш уваги приділяється розробці та використанню технологій біоконверсії для переробки біомаси в біопаливо [1-3]. Ці матеріали містять велику кількість цінних компонентів, які можуть бути використані для виробництва біопалива, хімічних речовин та інших продуктів [4, 5].

Технології біоконверсії широко застосовуються у промисловості для виробництва біопалива, біопластиків, біохімікатів та інших продуктів. Проте все ще існує багато проблем, пов'язаних із економічною ефективністю, оптимізацією процесів.

Подальше дослідження та розвиток технологій біоконверсії допоможуть покращити ефективність процесів, зменшити витрати та створити нові можливості для утилізації органічних відходів. Також важливо продовжувати вивчати потенціал біоконверсії для зменшення негативного впливу виробництва, споживання навколишнього середовища та вирішення глобальних проблем, таких як зміна клімату [6].

Лігноцелюлоза – це матеріал, який складає основну частину клітинних стінок рослин і складається з целюлози, геміцелюлози та лігніну (рис. 1). Целюлоза та геміцелюлоза тісно пов'язані з лігніном за допомогою ковалентних та водневих зв'язків, що робить структуру дуже складною та міцною.

В даний час значна кількість біомаси утворюється в результаті сільськогосподарської діяльності, в основному в різних агропромислових галузях. Ці матеріали зазвичай класифікуються як лісові відходи, сільськогосподарські відходи, трав'янисті енергетичні культури, і навіть муніципальні та промислові відходи. Лісові відходи включають переважно деревну біомасу, а саме деревину твердих і м'яких порід, а також деревні відходи від лісозаготівель і деревообробки (наприклад, лісопилення та виробництво фанери і ДСП). Сільськогосподарські відходи, у свою чергу, утворюються в результаті переробки різних сільськогосподарських культур, таких як рис, куку-

рудза, пшениця, маніока, арахіс, соєві боби, цукрова тростина, джут та стебла бавовни. Енергетичні трави включають багаторічні рослини, такі як просо прутноподібне та міскантус гігантський.

Таким чином, лігноцелюлозні матеріали, що є основним компонентом клітинної стінки рослин, є складною структурою, насиченою целюлозою, геміцелюлозою і лігніном [7-11].

Їх склад варіюється в залежності від джерела, віку рослин та умов навколишнього середовища, що вказує на значну біологічну та економічну різноманітність цих ресурсів. В умовах сучасних агропромислових процесів утворюється велика кількість відходів, які містять лігноцелюлозу, що відкриває перспективи їх переробки та повторного використання в різних галузях, таких як виробництво біоматеріалів, біоенергетика та сільське господарство. Ефективне використання цих відходів не тільки сприяє зниженню екологічного навантаження, а й розвитку стійкої економіки на основі біомаси, що робить цей напрямок актуальним для подальших досліджень та практичного застосування.

Однією з основних проблем у переробці лігноцелюлозних матеріалів є їхня складна структура (табл. 1), що ускладнює ефективне вилучення цінних компонентів. Для вилучення компонентів біомаси (тобто целюлози, геміцелюлози та лігніну) або зміни структури потрібна попередня обробка. Попередня обробка є ключовим кроком у загальному процесі подолання неподатливості біомаси.

Метою роботи є аналіз існуючих методів попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси в технологіях от-

римання біопалива. Порівняння енергетичної та економічної ефективності виробництва біоетанолу та лігніну з вуглеводним паливом.

Відомо багато способів проведення попередньої підготовки сировини до гідролізу [30-35].

Способи можна класифікувати наступним чином:

1. Фізичні методи:

- подрібнення;
- піроліз (300 °C);
- попередня підготовка паром (160-240 °C, 0,7... 4,8 МПа);
- паровий вибух (180-240 °C, 1-3,5 МПа з подальшим різким скиданням тиску).

2. Хімічні методи:

- попередня підготовка кислотами. Найбільш прийнятними для промислового використання є попередня підготовка розбавленими кислотами, наприклад 0,75 % v/v H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 121 °C протягом 1 години.

- лужна попередня підготовка. Для попередньої обробки лугом зазвичай використовуються гідроксид натрію (NaOH), гідроксид калію (KOH), гідроксид кальцію (Ca(OH)<sub>2</sub>). Оптимальні умови обробки залежать від виду сировини та наразі є предметом досліджень.

- попередня підготовка діоксидом сірки (150 °C).

3. Органосольвентні методи.

4. Біологічні методи.

Лігнін та біоетанол є енерговмісними продуктами обробки рослинної біомаси. Калорійність сухого лігніну становить 5500-6500 ккал/кг і є порівняним



Рис. 1. Побудова клітинної стінки рослин

Fig. 1. Construction of the plant cell wall

з калорійністю еквівалентного палива (7000 ккал/кг). Калорійність продукту з вологістю 18-25 % становить 4400-4800 ккал/кг і цінність продукту з вмістом воло- ги понад 65 % 1500-1600 ккал/кг, калорійність етанолу становить відповідно 6405 ккал/кг.

За даними світового лідера по виробництву лігніну Borregaard з 1000 кг деревини після процесів автокла- вування, знебарвлення та висушування отримують 400 кг целюлози, 50 кг етанолу, 3 кг ваніліну та 400 кг гідролізного лігніну. Найпоширенішим видом викори- стання гідролізного лігніну вологістю 60-65 % є спа- лювання його для отримання тепла.

Сучасні діючі підприємства по обробці лігно- целюлозної сировини використовують отриманий в ході обробки лігнін як паливо для виробництва пари на підприємстві. Використання лігніну у якості пального дозволяє покрити до 73 % потреби в тепловій енергії на виробництво біоетанолу лужним способом [12].

Порівняльну характеристика способів попередньої обробки лігноцелюлозної сировини представлено у таблиці 2.

Біоетанол займає лідируючу позицію серед біопалив, що використовуються у транспортній галузі, і розглядається як перспективна альтернатива викоп-

ним видам палива, що відрізняється високим вмістом кисню (близько 35 мас. %) і сприяє його більш повно- му згорянню та зниженню викидів шкідливих речови- ни [13, 14]. Прогнозується, що до 2050 року біоетанол стане основним компонентом бензинових сумішей, займаючи значну частку у транспортному паливі. Очікується, що вже до 2031 року його вміст у бензино- вих сумішах зросте до 15 %, відбираючи зростаючу роль біопалива у стійкій енергетиці [15]. В автомобільній промисловості етанол широко використовується в якості антидетонаційної добавки в бензин завдя- ки його високому октановому числу, що покращує ефективність роботи двигунів внутрішнього згоряння [16]. Однак низька цетанова кількість обмежує його за- стосування в дизельних двигунах як основного палива.

Однією з ключових переваг етанолу являється його економічна доступність у порівнянні з біодизелем. Згідно з дослідженнями, собівартість виробництва етанолу складає всього 0,09-0,12 дол. США за літр, що значно нижче за вартість біодизеля і досягає 0,42-0,75 дол. США за літр [17, 18]. Економічність етанолу обумовлена дешевизною сировини, використовується для його виробництва, включаючи цукристі та крохмалисті культури, а також лігноцелюлозну

Табл. 1. Склад лігноцелюлозних матеріалів

Table 1. Composition of lignocellulosic materials

| Лігноцелюлозні матеріали     | Целюлоза (%) | Геміцелюлоза (%) | Лігнін (%) |
|------------------------------|--------------|------------------|------------|
| Сільськогосподарські відходи |              |                  |            |
| Жом цукрового тростнику      | 37,5         | 30,6             | 25,3       |
| Кукурудзяний качан           | 35,8         | 30,7             | 18,5       |
| Пшенична солома              | 34,0         | 23,2             | 20,2       |
| Рисове лушпиння              | 36,7         | 20,0             | 21,3       |
| Трави                        |              |                  |            |
| Просо прутіподібне           | 37,0         | 34,7             | 22,7       |
| Міскантус                    | 45,0         | 25,4             | 26,5       |
| М'яка деревина               |              |                  |            |
| Сосна                        | 41,8         | 22,3             | 3,01       |
| Ялина                        | 43,8         | 20,8             | 28,8       |
| Тверда деревина              |              |                  |            |
| Тополя                       | 46,8         | 16,8             | 23,4       |
| Клен                         | 41,8         | 26,3             | 27,1       |
| Дуб                          | 45,2         | 24,5             | 24,3       |
| Евкالیпт                     | 44,7         | 20,1             | 27,7       |

Табл. 2. Порівняльна характеристика способів попередньої обробки лігноцелюлозної сировини

Table 2. Comparative characteristics of methods for pre-treatment of lignocellulosic raw materials

| Спосіб попередньої обробки                    | Механізм процесу                                                                                                                                                                                                                                | Переваги                                                                                                                                                                                                                                              | Недоліки                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                             | 2                                                                                                                                                                                                                                               | 3                                                                                                                                                                                                                                                     | 4                                                                                                                                                                        |
| <b>Фізичні способи</b>                        |                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                          |
| Механічний процес                             | Під дією механічного впливу зменшується розмір частинок і змінюється структура поверхні.                                                                                                                                                        | Довговічність і надійність використовуваного обладнання, підходить для промислового застосування.                                                                                                                                                     | Сильно енерговитратний процес разом із незначним ефектом по зміні структури целюлози. Для підвищення ефективності процесу необхідне встановлення додаткового обладнання. |
| Екструзія                                     | Лігноцелюлозна сировина під тиском проштовхується крізь отвори головної частини екструдера.                                                                                                                                                     | Простий процес, низьке енергоспоживання, короткий час перебування, помірна температура і тиск.                                                                                                                                                        | Робота обладнання під тиском, що вимагає регулярної перевірки для забезпечення стабільної роботи екструдера, дуже трудомісткий процес, висока вартість обслуговування.   |
| Мікрохвильове опромінення                     | Частота мікрохвильового опромінювання становить близько 0,3-300 ГГц. молекул в лігніноцелюлозній біомасі через поляризацію діелектрика в хімічних зв'язках                                                                                      | Короткий період нагріву, помірна температура, менше утворення інгібіторів.                                                                                                                                                                            | Наявність зон з більш високою температурою призводить до утворення сполук фурфуролу, що є інгібіторами процесу, в результаті розпаду вуглеводів.                         |
| <b>Теплофізичні способи</b>                   |                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                          |
| Паровий вибух                                 | Витримка сировини під тиском при температурі 170-200 °C протягом 10-30 хвилин з наступним швидким скиданням тиску. Волокнисті аморфні частини полімерних ланцюгів целюлози гідролізуються, залишаючи в незміненому стані кристалічну структуру. | Екологічно чистий процес. Швидка декомпресія сировини сприяє розділенню целюлози, геміцелюлози і лігніну, що дає можливість ефективно проводити подальший ферментативний гідроліз целюлози. Здійснення процесу без внесення додаткових каталізаторів. | За високої температури відбувається утворення інгібіторів процесу сполук фурфуролу. Складність апаратурного оформлення і важкість контролю технологічних умов процесу.   |
| Обробка в роторно-пульсаційному апараті (РПА) | Обробка в режимі рециркуляції з лужним каталізатором при температурі 90-95 °C і атмосферному тиску, покращуються процеси диспергування, розчинення, перемішування, нагріву, тепломасопереносу.                                                  | Низька температура та атмосферний тиск, швидке і максимальне виділення лігніну, не відбувається процесу утворення інгібіторів (сполук фуруролу).                                                                                                      | Попереднє порівняння сировини до часток розміром не більш 500 мкм.                                                                                                       |

| Хімічні способи                              |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Кислотний гідроліз                           | Гідроліз лігноцелюлозної сировини при кип'ятінні в розчині кислоти, розчинення геміцелюлози та зміна модифікації структури лігніну, що покращує подальший ферментативний гідроліз целюлозної фракції           | Руйнування лігноцелюлозної матриці та аморфної структури целюлози.                                                                                                                                                     | Жорсткі умови процесу, висока температура реакції, кислотна корозія обладнання, необхідність нейтралізації кислоти.                                                                                                                           |
| Лужний гідроліз                              | Руйнація зв'язків між целюлозою, лігніном і геміцелюлозою за допомогою лугів. Під дією лугу відбувається видалення уренової кислоти, яка заважає подальшому ферментативному гідролізу целюлози і геміцелюлози. | Видалення лігнінової фракції без значної руйнації вуглеводів. Низька температура і тиск, тобто більш м'які умови процесу. Хімічні реагенти після лужної обробки не є корозійними і не забруднюють оточуюче середовище. | Тривалий час реакції, зниження кристалічності целюлози, можливість перетворення лугу на відповідну сіль, що погіршує процес.                                                                                                                  |
| Гідроліз за допомогою органічного розчинника | Перетворення кристалічної структури лігноцелюлозної біомаси в аморфну форму і деструкція хімічних зв'язків між молекулами лігніну і целюлози.                                                                  | Застосування нетоксичних, дешевих, екологічно чистих розчинників, які є похідними полімерної біомаси і можуть легко перероблятися. Процес здійснюється в присутності каталізаторів.                                    | Завдяки низькій температурі кипіння, розчинник легко випаровується з середовища.                                                                                                                                                              |
| Біологічні способи                           |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                               |
| Оцукрення сировини мікроорганізмами          | Бактерії і плісняві гриби виділяють целюлолітичний фермент, який руйнує зв'язки в лігноцелюлозній біомасі з утворенням целюлози, геміцелюлози і лігніну.                                                       | Низькі капіталовкладення. Невелике енергоспоживання, оскільки делігніфікація біомаси відбувається за температури не вище 32 °С. Ефективний і екологічно безпечний процес.                                              | Тривалий час делігніфікації лігноцелюлозної біомаси, зазвичай 15-20 діб. Менший вміст розчинного гідролізату, коефіцієнт ефективності приблизно 37-40 %. Сповільнена швидкість гідролізу сировини, зазвичай видаляється близько 30 % лігніну. |

біомасу, яка перетворюється в етанол за допомогою процесів оцукрювання та ферментації [19, 20]. Крім того, нові підходи до отримання етанолу, такі як газифікація вугілля із застосуванням каталізаторів на основі недорогих металів, демонструють високу ефективність і відкривають перспективи розширення його виробництва [21]. Він також виступає як прекурсор для синтезу хімічних сполук та органічних розчинників. Виробництво біоетанолу ділиться на три покоління: 1G використовує продовольчі культури, забезпечуючи до 95 % світового виробництва,

але стикається з критикою через конкуренцію з продовольчим сектором; 2G переробляє лігноцелюлозні відходи, знижуючи екологічний вплив, але вимагає високої вартості обробки; 3G зосереджений на біомасі водорослів, перебуваючи на стадії розробки. Біоетанол другого покоління (2G) виробляється з лігноцелюлозних відходів, включаючи сільськогосподарські та деревні залишки, що знижує екологічні збитки та мінімізує конкуренцію з продовольчим сектором [22]. Третє покоління (3G), засноване на біомасі водоростей, знаходиться на стадії розробки [23]. Хоча 1G-біопаливо

має високу продуктивність, воно конкурує з продовольчим сектором, тоді як 2G вирішує цю проблему, використовуючи не харчові матеріали. Лігноцелюозна сировина перетворюється на ферментовані цукри, які мікроорганізми, (*Saccharomyces cerevisiae* та *Pichia stipitis*) перетворюють на біоетанол [24, 25].

Сучасні дослідження зосереджені на оптимізації процесів попередньої обробки та ферментації для зниження витрат. Інтеграція виробництва 1G та 2G біоетанолу може стати ключовим рішенням, надаючи більше високу ефективність. Останні досягнення в області біоетанолу демонструють значний прогрес. Наприклад, використання попередньо обробленої лігноцелюозної сировини, такої як жом цукрової тростини та біомаси соснової хвої, дозволило досягти концентрації етанолу до 10,67 г/л та 0,148 г/г біомаси, відповідно [30]. Ці результати підкреслюють можливості впровадження інноваційних методів переробки та ферментації. Крім того, виробництво біоетанолу третього покоління, заснованого на біомасі водоростей, продовжує розвиватись. Цей підхід відрізняється високою ефективністю використання ресурсів і меншим впливом на навколишнє середовище, що робить його перспективним напрямом для досягнення сталого розвитку.

Мамун та ін. [15] досліджували можливість використання біомаси *Arthrospira platensis* (відомою як спіруліна) для виробництва біоетанолу із застосуванням комбінованого методу попередньої обробки – мікрохвильової активації та кислотного гідролізу. У роботі були оптимізовані ключові параметри, такі як концентрація кислоти (від 0,1 до 0,3 М  $H_2SO_4$ ) та час гідролізу (30-180 хв.). Результати показали, що комбінована попередня обробка значно збільшила вихід ферментованих цукрів, досягнувши максимального рівня 78,4 %, що перевищує традиційний кислотний гідроліз. Ферментація з використанням *Saccharomyces cerevisiae* забезпечила вихід етанолу у розмірі 0,06 г на грам біомаси. Результати роботи підтверджують потенціал спіруліни як джерела третього покоління біоетанолу для стійкої енергетики, незважаючи на існуючі обмеження, такі як вартість та масштабованість технології.

Audibert та ін. [26] досліджували оптимізацію процесу виробництва біоетанолу другого покоління (2G) з лігноцелюозної біомаси деревини шляхом використання парового вибуху в якості попередньої об-

робки. У рамках дослідження були вивчені три різних типи деревини (дуб, тополя та ялина) з метою виявлення залежності між виходом біоетанолу і витратами на попередню обробку. Результати показали, що ефективність виробництва біоетанолу варіювалася в залежності від типу деревини. Для дуба і тополі було визначено оптимальні значення температури та часу, що забезпечують до 70 % і 48 % теоретично можливого виходу біоетанолу відповідно, в той час як для ялини ефективність була нижчою через високу рекальцитрантність її лігніну. Автори також підкреслили, що надмірно жорсткі умови обробки не призводять до додаткового поліпшення виходу, і як наслідок робить середній рівень умов обробки найбільш привабливим для промислового застосування.

У таблиці 3 представлені порівняльні дані отримання біоетанолу з різних лігноцелюозних матеріалів [2, 10, 33, 27-29].

Як видно з таблиці, в якості сировини для отримання біоетанолу було досліджено солому пшениці, кукурудзяні стебла, цукрову тростину, тирсу деревини, багасу тростини та рисове лушпиння. Для кожного матеріалу вказані етапи попередньої обробки, гідролізу, ферментації, вихід біоетанолу в г/г біомаси.

Найбільший вихід біоетанолу 0,45 г/г біомаси спостерігається при використанні сировини цукрової тростини, але для України ця сировина не є актуальною. Більш важливе значення має сировина у вигляді відходів сільського господарства (солома пшениці, кукурудзяні стебла). Застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії при переробці соломи пшениці, у порівнянні з паровим вибухом, дозволяє підвищувати вихід біоетанолу з 0,38 до 0,414 г/г та знизити вдвічі температуру процесу і практично досягти показників виходу спирту з кукурудзяних стебел.

**Висновки.** Конверсія лігноцелюозної біомаси неможлива без попередньої обробки, тобто розділення на целюлозу, геміцелюлозу та лігнін. Цей процес є одним з найскладніших у технологіях отримання біопалива (біоетанолу та лігніну), оскільки пов'язаний з великими енергозатратами, складністю в експлуатації технологічного обладнання, технікою безпеки. Найбільш ефективно попередня обробка проходить з застосуванням парового вибуху або дискретно-імпульсного введення енергії з використанням роторно-пульсаційних апаратів. В обох випадках, основною дієвою силою, діючою на деструкцію лігноцелюозного комплексу являється кавітація.

Табл. 3. Порівняльні дані отримання біоетанолу з лігноцелюлозних матеріалів

Table 3. Comparative data on bioethanol production from lignocellulosic materials

| Матеріал                  | Попередня обробка                                                          | Гідроліз                                                      | Ферментація                              | Вихід біоетанолу  | Ключові результати                                                                          |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Солома пшениці            | Паровий вибух: 200 °C, 10 хв.                                              | Ензиматичний: В-глюкозидазу 20 U/г, 48 год., 50 °C.           | Saccharomyces cerevisiae, 30°C, 72 год.  | 0,38 г/г біомаси  | Високий вихід завдяки видаленню лігніну, зниження вмісту геміцелюлози.                      |
| Солома пшениці            | Дискретно-імпульсне введення енергії з використанням РПА: 95 °C, 10-20 хв. | Ензиматичний: В-глюкозидазу 20 U/г, 48 год., 50 °C.           | Saccharomyces cerevisiae, 30 °C, 72 год. | 0,414 г/г біомаси | Високий вихід завдяки максимальному зниженню концентрації лігніну і геміцелюлоз.            |
| Кукурудзяні стебла        | Лужна обробка: 2 % NaOH, 80 °C 1 год.                                      | Ензиматичний: В-глюкозидазу 15 U/г, 48 год.                   | Pichia stipitis, 32 °C, 48 год.          | 0,42 г/г біомаси  | Вміст етанолу вище завдяки видаленню ксиланів та високій активності ферменту.               |
| Цукрова тростина          | Кислотний гідроліз: 1 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 121 °C, 30 хв.    | Ензиматичний: целюлоза 25 FPU/г, 50 °C, 72 год.               | Zymomonas mobilis, 30 °C, 48 год.        | 0,45 г/г біомаси  | Збільшення виходу за рахунок оптимізації кислотного гідролізу та ефективного ферментування. |
| Тирса деревини            | Озоноліз: озон 5 %, 2 год.                                                 | Ензиматичний: целюлоза 30 FPU/г, 55 °C, 72 год.               | Saccharomyces cerevisiae, 30 °C, 72 год. | 0,33 г/г біомаси  | Складність обробки деревних матеріалів вимагає додаткових кроків для збільшення виходу.     |
| Відходи цукрової тростини | Гідротермальна 180 °C, 20 хв.                                              | Кислотний: H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2 %, 121 °C, 30 хв. | Saccharomyces cerevisiae, 30 °C, 72 год. | 0,40 г/г біомаси  | Високий рівень видалення лігніну забезпечує покращену ферментативну доступність целюлози.   |
| Рисове лушпиння           | Мікрохвильова обробка: 800 Вт, 10 хв.                                      | Ензиматичний: целюлоза 20 FPU/г, 50 °C, 48 год.               | Candida shehatae, 32 °C, 48 год          | 0,37 г/г біомаси  | Швидка обробка покращує руйнацію лігноцелюлозної структури.                                 |

Встановлено, що калорійність сухого лігніну складає 5500-6500 ккал/кг, а біоетанолу 6405 ккал/кг, в порівнянні з калорійністю еквівалентного палива (7000 ккал/кг). Використання лігніну в якості пального дозволяє покрити до 73 % потреб в тепловій енергії на виробництво біоетанолу. Перевагою біоетанолу являється його економічна доступність в порівнянні з біодизелем. Собівартість біоетанолу складає 0,09-0,12 дол. США за літр, що значно нижче собівартості біодизелю (0,42-0,75 дол. США за літр).

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Akhtar J., Amin N.A.S. A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15. P. 1615-1624. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.054>.
2. Balat M., Balat H., Öz C. Progress in bioethanol processing. Progress in Energy and Combustion Science. 2008. Vol. 34. P. 551-573. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.11.001>.

3. *Awasthi Manish K., Sarsaiya Siddharth, Patel Ankit, Singh Rupesh, Zhang Zhiqiang, Kumar Abhay.* Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2020. Vol. 109876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109876>.
4. *Basu Prabir.* Biomass Characteristics. In: *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction.* Elsevier, 2013. P. 47-86. ISBN: 978-0-12-396488-5.
5. *Behrendt Frank, Neubauer Yves, Oevermann Michael, Wilmes Bernhard, Zobel Nicole.* Direct Liquefaction of Biomass. *Chemical Engineering & Technology.* 2008. Vol. 31. P. 667-677. <https://doi.org/10.1002/ceat.200800077>.
6. *Bisen Prakash S., Sanodiya Bhagwati S., Prasad G. Thakur Gurmeet S., Baghel Rajni K.* Biodiesel production with special emphasis on lipase-catalyzed transesterification. *Biotechnology Letters.* 2010. Vol. 32. P. 1019-1030. <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0275-z>.
7. *Cherubini Francesco.* The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management.* 2010. Vol. 51. P. 1412-1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>.
8. *Chum Helena L., Nigro Francisco E. B., McCormick Robert L., Gregg T. Beckham.* Conversion Technologies for Biofuels and Their Use. *Bioenergy & Sustainability: Bridging the gaps.* Paris: SCOPE. 2015. Vol. 72. P. 375-467. ISBN 978-2-9545557-0-6.
9. *Davis Ryan, Kataria Rajesh, Cerrone Flavio, Solano Javier, Surendran Ashok.* Conversion of grass biomass into fermentable sugars and its utilization for medium chain length polyhydroxyalkanoate (mcl-PHA) production by *Pseudomonas* strains. *Bioresource Technology.* 2013. Vol. 150. P. 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.001>.
10. *Demirbaş Ayhan.* Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management.* 2001. V. 42. P. 1357-1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0).
11. *Gaurav Neha, Sivasankari Sangeetha, Kiran G., Manimaran Rajasekaran.* Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2017. Vol. 73. P. 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.070>.
12. *Koutinas A.A., Yianoulis P., Koliopoulos K.A. Gravalos K.* Processing scheme for industrial ethanol production from straw. *Energy Conversion and Menegment.* 1981. Vol. 21, Issue 2. P. 131-135. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90034-0).
13. *Bernstad Saraiva Adriana.* System boundary setting in life cycle assessment of biorefineries: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology.* 2017. Vol. 14. P. 435-452. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1138-5>.
14. *Micic V., Jotanovic M.* Bioethanol as fuel for internal combustion engines. *Zastita Materijala.* 2015. Vol. 56. P. 403-408. <https://doi.org/10.5937/ZasMat1504403M>.
15. *Ma'mun S., Prasetyo M.W., Anugrah A.R., Syamsul A.* Bioethanol from *Arthrospira platensis* biomass using a combined pretreatment. *Chemical Engineering Journal Advances.* 2024. Vol. 19. P. 100616. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.100616>.
16. *Abdellatif T.M.M., Ershov M.A., Kapustin V.M., Sadykov V.A.* Recent trends for introducing promising fuel components to enhance the anti-knock quality of gasoline: A systematic review. *Fuel.* 2021. Vol. 291. P. 120112. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120112>.
17. *Khounani Z., Nazemi F., Shafiei M., Bazargan A.* Techno-economic aspects of a safflower-based biorefinery plant co-producing bioethanol and biodiesel. *Energy Conversion and Management.* 2019. Vol. 201. P. 112184. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112184>.
18. *Mizik T., Gyarmati G.* Economic and Sustainability of Biodiesel Production – A Systematic Literature Review. *Clean Technologies.* 2021. Vol. 3. P. 19-36. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3010002>.
19. *Bušić A., Marđetko N., Kundas S., Morzak G., Belskaya H., Šantek B., Novak S., Šantek M.I.* Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and its Separation and Purification: A Review. *Food Technology and Biotechnology.* 2018. Vol. 56. P. 289-311. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5546>.
20. *Van Rooyen J., Mbella Teke G., Coetzee G., Loubser M.* Enhancing bioethanol yield from food waste: Integrating decontamination strategies and enzyme dosage optimization for sustainable biofuel production. *Fuel.* 2024. Vol. 378. P. 133026. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133026>.
21. *Kang Y.-H., Zhang X.-Q., Gao J., Wang J., Shen L.* Deep hydroconversion of ethanol-soluble portion from the ethanolysis of Hecaogou subbituminous coal to ultra-clean liquid fuel over hierarchical porous zeolite Y supported Ni-Co nanoparticles. *Journal of the Energy Institute.* 2021. Vol. 99. P. 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.08.006>.
22. *Robak K., Balcerek M.* Review of Second-Generation Bioethanol Production from Residual Biomass. *Food Technology and Biotechnology.* 2018. Vol. 56. P. 174-187. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.02.18.5428>.

23. *Maliha A., Abu-Hijleh B.* A review on the current status and post-pandemic prospects of third-generation biofuels. *Energy Systems*. 2023. Vol. 14. P. 1185-1216. <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00514-7>.
24. *Devi A., Bajar S., Kour H., Gupta N.* Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: A Circular Bioeconomy Approach. *BioEnergy Research*. 2022. Vol. 15. P. 1820-1841. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10401-9>.
25. *Karagoz P., Bill R.M., Ozkan M.* Lignocellulosic ethanol production: Evaluation of new approaches, cell immobilization and reactor configurations. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 143. P. 741-752. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.045>.
26. *Audibert E., Floret J., Quintero A., Cortot C., Francoz F., Bouvet A.* Determination of trade-offs between 2G bioethanol production yields and pretreatment costs for industrially steam exploded woody biomass. *Applied Energy*. 2025. Vol. 380. P. 125028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125028>.
27. *Kumar Ashok K., Sharma Saurabh.* Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresources and Bioprocessing*. 2017. Vol. 4. P. 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>.
28. *Hassan Shoheb S., Williams Gavin A., Jaiswal Amit K.* Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 262. P. 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.099>.
30. *Carrillo-Nieves D., Rostro Alanis M.J., de la Cruz Q.R., Ruiz H.A., Iqbal HMN., Parra-Saldivar R.* Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renew Sustain Energy Rev*. 2019. 102. P. 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.031>.
31. *Da Silva, A.R.G., Errico, M., Rong, B.G.* Systematic procedure and framework for synthesis and evaluation of bioethanol production processes from lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol Rep*. 2018. 4. P. 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.08.015>.
32. *Fan Guo-Zhi.* Preparation of microcrystalline cellulose from rice straw under microwave irradiation. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017. 22. 134. <https://doi.org/10.1002/app.44901>.
33. *Fernandes M.C., Ferro M.D., Paulino A.F., Mendes J.A., Gravitis J., Evtuguin D.V., et al.* Enzymatic saccharification and bioethanol production from *Cynara cardunculus* pretreated by steam explosion. *Bioresource Technology*. 2015. 186. P. 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.037>.
34. *Kumar R., Prakash O.* Experimental investigation on effect of season on the production of bioethanol from wheat-stalk (WS) using simultaneous saccharification and fermentation (SSF) method. *Fuel*. 2023. P. 128958. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128958>.
35. *Shukla A., Kumar D., Girdhar M., Kumar A., Goyal A., Malik T., Mohan A.* Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2023. 16 (44). <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2>.

## CONVERSION OF LIGNOCELLULOUS BIOMASS TO PRODUCE BIOFUEL

Obodovych O.M.<sup>1</sup>, Khomenko V.O.<sup>2</sup>, Sheiko T.V.<sup>3</sup>,  
Chernyavskiy K.Ye.<sup>4</sup>, Parchenko V.M.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dr. Sci. (Engin.), Professor, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, [orcid.org/0000-0001-7213-3118](https://orcid.org/0000-0001-7213-3118), e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)  
<sup>2</sup>PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [xbo1959@gmail.com](mailto:xbo1959@gmail.com)

<sup>3</sup>PhD (Engin.), Institute of Food Resources of the NAAS of Ukraine, 4a, Yevhena Sverstyuka Str., Kyiv, 02002, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>, e-mail: [sheiko\\_tamila@ukr.net](mailto:sheiko_tamila@ukr.net)

<sup>4</sup>PhD (Phys. & Math.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)

<sup>5</sup>Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.11>

The article analyzes lignocellulosic biomass generated as a result of agricultural activities for processing into biofuels; the composition of lignocellulosic materials; a comparative characteristic of methods for pre-processing lignocellulosic biomass in biofuel production technologies and comparative data on the production of bioethanol from various lignocellulosic materials.

Lignocellulosic materials, which are the main component of the plant cell wall, are a complex structure, rich in cellulose, hemicellulose and lignin. Their composition varies depending on the source, age of the plants and environmental conditions, which indicates a significant biological and economic diversity of these resources. In the conditions of modern agro-industrial processes, a large amount of waste containing lignocellulose is formed, which opens up prospects for their processing and reuse in various industries, such as biomaterials production, bioenergy and agriculture. The effective use of these wastes not only contributes to reducing the environmental load, but also to the development of a sustainable biomass-based economy, which makes this area relevant for further research and practical application.

One of the main problems in the processing of lignocellulosic materials is their complex structure, which complicates the effective extraction of valuable components. Pretreatment is required to extract biomass components (i.e. cellulose, hemicellulose and lignin) or to change the structure. Pretreatment is a key step in the overall process of overcoming biomass recalcitrance.

Analysis of data on the processing of lignocellulosic raw materials into biofuels has shown that the most effective pretreatment is carried out using steam explosion or discrete-pulse energy input using rotary-pulsation devices. In both cases, the main effective force acting on the destruction of the lignocellulosic complex is cavitation.

References 35, tables 3, figures 1.

**Key words:** lignocellulose, biomass, bioconversion, delignification, biofuel.

1. Akhtar J., Amin N.A.S. (2011). A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. 1615-1624. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.054>.

2. Balat M., Balat H., Öz C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34. 551-573. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.11.001>.

3. Awasthi Manish K., Sarsaiya Siddharth, Patel Ankit, Singh Rupesh, Zhang Zhiqiang, Kumar Abhay (2020). Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 109876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109876>.

4. Basu Prabir (2013). Biomass Characteristics. In: *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. Elsevier. 47-86. ISBN: 978-0-12-396488-5.

5. Behrendt Frank, Neubauer Yves, Oevermann Michael, Wilmes Bernhard, Zobel Nicole (2008). Direct Liquefaction of Biomass. *Chemical Engineering & Technology*. 31. 667-677. <https://doi.org/10.1002/ceat.200800077>.

6. Bisen Prakash S., Sanodiya Bhagwati S., Thakur Gurmeet S., Baghel Rajni K., Prasad G. (2010). Biodiesel production with special emphasis on lipase-catalyzed transesterification. *Biotechnology Letters*. 32. 1019-1030. <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0275-z>.

7. Cherubini Francesco (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*. 51. 1412-1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>.

8. Chum Helena L., Nigro Francisco E. B., McCormick Robert L., Gregg T. Beckham (2015). Conversion Technologies for Biofuels and Their Use. *Bioenergy & Sustainability: Bridging the gaps*. Paris: SCOPE. 72. 375-467. ISBN 978-2-9545557-0-6.
9. Davis Ryan, Kataria Rajesh, Cerrone Flavio, Solano Javier, Surendran Ashok (2013). Conversion of grass biomass into fermentable sugars and its utilization for medium chain length polyhydroxyalkanoate (mcl-PHA) production by *Pseudomonas* strains. *Bioresource Technology*. 150. 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.001>.
10. Demirbaş Ayhan (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*. 42. 1357-1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0).
11. Gaurav Neha, Sivasankari Sangeetha, Kiran G., Manimaran Rajasekaran (2017). Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 73. 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.070>.
12. Koutinas A.A., Yianoulis P., Koliopoulos K.A. Gravalos K., (1981). Processing scheme for industrial ethanol production from straw. *Energy Conversion and Management*. 21 (2). 131-135. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90034-0).
13. Bernstad Saraiva Adriana (2017). System boundary setting in life cycle assessment of biorefineries: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 14. 435-452. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1138-5>.
14. Micic V., Jotanovic M. (2015). Bioethanol as fuel for internal combustion engines. *Zastita Materijala*. 56. 403-408. <https://doi.org/10.5937/ZasMat1504403M>.
15. Ma'mun S., Prasetyo M.W., Anugrah A.R., Syamsul A. (2024). Bioethanol from *Arthrospira platensis* biomass using a combined pretreatment. *Chemical Engineering Journal Advances*. 19. 100616. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.100616>.
16. Abdellatif T.M.M., Ershov M.A., Kapustin V.M., Sadykov V.A. (2021). Recent trends for introducing promising fuel components to enhance the anti-knock quality of gasoline: A systematic review. *Fuel*. 291. 120112. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120112>.
17. Khoumami Z., Nazemi F., Shafiei M., Bazargan A. (2019). Techno-economic aspects of a safflower-based biorefinery plant co-producing bioethanol and biodiesel. *Energy Conversion and Management*. 201. 112184. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112184>.
18. Mizik T., Gyarmati G. (2021). Economic and Sustainability of Biodiesel Production – A Systematic Literature Review. *Clean Technologies*. 3. 19-36. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3010002>.
19. Bušić A., Mardetko N., Kundas S., Morzak G., Belskaya H., Šantek B., Novak S., Šantek M.I. (2018). Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and its Separation and Purification: A Review. *Food Technology and Biotechnology*. 56. 289-311. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5546>.
20. Van Rooyen J., Mbella Teke G., Coetzee G., Loubser M. (2024). Enhancing bioethanol yield from food waste: Integrating decontamination strategies and enzyme dosage optimization for sustainable biofuel production. *Fuel*. 378. 133026. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133026>.
21. Kang Y.-H., Zhang X.-Q., Gao J., Wang J., Shen L. (2021). Deep hydroconversion of ethanol-soluble portion from the ethanolysis of Hecaogou subbituminous coal to ultra-clean liquid fuel over hierarchical porous zeolite Y supported Ni-Co nanoparticles. *Journal of the Energy Institute*. 99. 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.08.006>.
22. Robak K., Balcerek M. (2018). Review of Second-Generation Bioethanol Production from Residual Biomass. *Food Technology and Biotechnology*. 56. 174-187. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.02.18.5428>.
23. Maliha A., Abu-Hijleh B. (2023). A review on the current status and post-pandemic prospects of third-generation biofuels. *Energy Systems*. 14. 1185-1216. <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00514-7>.
24. Devi A., Bajar S., Kour H., Gupta N. (2022). Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: A Circular Bioeconomy Approach. *BioEnergy Research*. 15. 1820-1841. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10401-9>.
25. Karagoz P., Bill R.M., Ozkan M. (2019). Lignocellulosic ethanol production: Evaluation of new approaches, cell immobilization and reactor configurations. *Renewable Energy*. 143. 741-752. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.045>.
26. Audibert E., Floret J., Quintero A., Cortot C., Francoz F., Bouvet A. (2025). Determination of trade-offs between 2G bioethanol production yields and pretreatment costs for industrially steam exploded woody biomass. *Applied Energy*. 380. 125028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125028>.
27. Kumar Ashok K., Sharma Saurabh. (2017). Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresources and Bioprocessing*. 4. 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>.
28. Hassan Shoheb S., Williams Gavin A., Jaiswal Amit K. (2018). Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 262. 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.099>.

30. Carrillo-Nieves D., Rostro Alanis M.J., de la Cruz Q.R., Ruiz H.A., Iqbal HMN., Parra-Saldivar R. (2019). Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renew Sustain Energy Rev.* 102. 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.031>.
31. Da Silva, A.R.G., Errico, M., Rong, B.G. (2018). Systematic procedure and framework for synthesis and evaluation of bioethanol production processes from lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol Rep.* 4. 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.08.015>.
32. Fan Guo-Zhi (2017). Preparation of microcrystalline cellulose from rice straw under microwave irradiation. *Journal of Applied Polymer Science.* 22. 134. <https://doi.org/10.1002/app.44901>.
33. Fernandes M.C., Paulino A.F., Mendes J.A., Gravitis J., Ferro M.D., Evtuguin D.V., et al. (2015). Enzymatic saccharification and bioethanol production from *Cynara cardunculus* pretreated by steam explosion. *Bioresource Technology.* 186. 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.037>.
34. Kumar R., Prakash O. (2023). Experimental investigation on effect of season on the production of bioethanol from wheat-stalk (WS) using simultaneous saccharification and fermentation (SSF) method. *Fuel.* 128958. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128958>.
35. Shukla A., Kumar D., Malik T., Kumar A., Goyal A., Girdhar M., Mohan A. (2023). Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts.* 16 (44). <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2>.

Отримано 11.05.2025

Received 11.05.2025

Прийнято до друку 04.11.2025  
Accepted for publication 04.11.2025