

**ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ПАЛИВНОГО ЕТАНОЛУ В УКРАЇНІ:
ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ РЕСУРСИ, ЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІННОВАЦІЙНИЙ МЕТОД
ОБРОБКИ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНОЇ СИРОВИНИ**

Ободович О. М.¹, д.т.н., проф., зав. відділом

<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

Сидоренко В. В.¹, к.т.н., с.н.с.

<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>

Шейко Т. В.², к.т.н., старша дослідниця, пр.н.с.

<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

²Інститут продовольчих ресурсів, Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2025-25-03>

Предмет. Стаття присвячена оцінці стану, перспектив розвитку виробництва паливного етанолу в Україні та технологічних рішень щодо його покращення. **Мета.** Огляд потенціалу біомаси як відновлювального ресурсу для виробництва паливного етанолу в Україні, оцінка ефективності різних видів сировини та технологій, а також економічної доцільності та екологічних переваг використання паливного етанолу в енергетичному секторі. **Методи.** При написанні статті використовували аналітичні методи досліджень, а також методи причинно-наслідкового аналізу та логічного узагальнення. Аналізували інформацію з баз даних, включаючи PubMed, CrossRef, Scopus, WoS, Google Scholar, Index Copernicus. **Результати.** Наразі головними результатами комплексної переробки органічної сировини надалі залишаються енерговмістні продукти – паливний етанол та гідролізний лігнін, які мають енергетичні характеристики, сумірні з викопними видами палива. З наявної в Україні сировини для виробництва паливного етанолу лігноцелюлозна сировина залишається недорогим, поновлюваним та поширеним ресурсом, що не конкурує із продовольчими культурами. Крім того, використання лігноцелюлозної біомаси дозволяє скоротити викиди парникових газів порівняно з викопними паливами – приблизно на 30–85%, залежно від типу сировини. Отримання паливного етанолу з крохмалевмісної, цукровмісної або лігноцелюлозовмісної сировини вимагає застосування різних технологічних стадій, відповідно, собівартість паливного етанолу для кожного виду сировини є різною. У порівнянні з паливним етанолом з цукровмісної та крохмалевмісної сировини, з лігноцелюлозовмісної сировини – є дорожчим. Найбільш енерговитратною в технології отримання паливного етанолу з лігноцелюлозовмісної сировини є стадія попередньої підготовки сировини до гідролізу, оскільки цей процес та процес гідролізу розбавленими кислотами відбувається за високих температури та тиску. Для забезпечення глибокої комплексної переробки рослинної сировини, а також для зменшення загальних витрат запропоновано вдосконалення технології та обладнання, що дозволяє збільшити ступінь конверсії вихідної сировини в основні та побічні продукти. **Сфера застосування результатів.** Отримані, в ході дослідження результати, можуть бути використані для удосконалення технології виробництва паливного етанолу.

Ключові слова: біомаса, лігноцелюлозна сировина, паливний етанол, делігніфікація

**OPTIMIZATION OF FUEL ETHANOL PRODUCTION IN UKRAINE:
RENEWABLE RESOURCES, EFFICIENT TECHNOLOGIES AND INNOVATIVE METHOD
OF PROCESSING LIGNOCELLULOSIC RAW MATERIAL**

Olexandr Obodovych¹, D-r of Sc., Engineering, Professor, Head of Department,

<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

Vitalii Sydorenko¹, PhD, Engineering, Senior Researcher

<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>

Tamila Sheiko², PhD, Engineering, Senior Researcher,

Leading Researcher of Department of Sugar Technology,

Sugar-containing Products and Ingredients

<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

Subject. The article is devoted to the assessment of the state, prospects for the development of fuel ethanol production in Ukraine and technological solutions for its improvement. **Purpose.** Review of the potential of biomass as a renewable resource for fuel ethanol production in Ukraine, assessment of the efficiency of various types of raw materials and technologies, as well as the economic feasibility and environmental benefits of using fuel ethanol in the energy sector. **Methods.** The article used analytical research methods, as well as methods of cause-and-effect analysis and logical generalization. Information from databases, including PubMed, CrossRef, Scopus, WoS, Google Scholar, Index Copernicus, was analyzed. **Results.** Currently, the main products of the comprehensive processing of organic raw materials remain energy-rich products – fuel ethanol and hydrolysis lignin, which have energy characteristics comparable to fossil fuels. Among the raw materials available in Ukraine for fuel ethanol production, lignocellulosic biomass remains an inexpensive, renewable, and widespread resource that does not compete with food crops. Moreover, the use of lignocellulosic biomass allows for a reduction in greenhouse gas emissions compared to fossil fuels – approximately by 30–85%, depending on the type of raw material. The production of fuel ethanol from starch-containing, sugar-containing, or lignocellulosic raw materials requires different technological stages, and accordingly, the cost of fuel ethanol varies for each type of raw material. Compared to fuel ethanol from sugar- and starch-containing raw materials, fuel ethanol from lignocellulosic raw materials is more expensive. The most energy-intensive stage in the technology of producing fuel ethanol from lignocellulosic raw materials is the pretreatment of the raw material for hydrolysis, since the pretreatment and hydrolysis processes with diluted acids occur at high temperature and pressure. To ensure deep comprehensive processing of plant raw materials, as well as to reduce overall costs, improvements in technology and equipment have been proposed, allowing an increase in the degree of conversion of the initial raw material into main and by-products. **Scope of the results.** The results obtained during the study can be used to improve the technology of the fuel ethanol production.

Key words: biomass, lignocellulosic feedstock, fuel ethanol, pretreatment for hydrolyses, delignification

Постановка проблеми. Виходячи зі зростання глобального попиту на енергію, обмеженістю викопних джерел енергії та зростанням емісії парникових газів внаслідок використання палив на їх основі, виникає необхідність ширшого використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси. Згідно до Статистичного огляду світової енергетики за 2023 р., викиди вуглекислого газу від використання енергії, промислових процесів, спалювання у факелі та метану (в еквіваленті вуглекислого газу) зросли з 39 Гт CO₂ екв у 2021 р. до 39,3 Гт CO₂ екв у 2022 р., а викиди вуглекислого газу від енергетики зросли з 34 Гт CO₂ екв в 2021 р. до 34,3 Гт CO₂ екв в 2022 р. Залежність України від імпорту енергоносіїв, особливо газу, нафти та вугілля з росії та Білорусі, історично була значною [1]. Це призводить до енергетичної та політичної вразливості, що особливо загострюється в умовах війни. Крім того, енергетична інфраструктура країни має суттєві проблеми через її застарілість: багато теплоелектростанцій працюють вже понад 40–50 років, що викликає низьку ефективність, високі втрати енергії та часті аварії. Енергоефективність в Україні також залишає бажати кращого – країна витрачає значно більше енергії на одиницю ВВП порівняно з країнами Європейського Союзу. Основними причинами цього є погана теплоізоляція будівель, застаріле обладнання та неефективне виробництво.

Екологічне навантаження від спалювання вугілля, газу та мазуту призводить до значних викидів CO₂ та інших парникових газів, забруднення повітря сіркою, оксидами азоту і пилом, що негативно впливає на здоров'я населення. Війна та окупація окремих територій Донбасу, які мали ключове значення для вугільної енергетики, завдали додаткової шкоди енергетичній інфраструктурі через збройну агресію.

Впровадження альтернативної енергетики в Україні ускладнене нестабільним законодавством, що проявляється у частих змінах "зеленого тарифу", його зменшенні та затримках з виплатами, а також відсутністю довгострокової стратегії розвитку відновлюваних джерел енергії. Енергосистема країни не пристосована до роботи з великою кількістю малих об'єктів альтернативної енергетики, а також відсутні системи накопичення енергії, як-от акумулятори чи гідроакумуляційні станції.

Фінансові бар'єри також є значною перешкодою: високі витрати на інвестиції у альтернативну енергетику, обмежений доступ до дешевих кредитів та державної підтримки, а також підвищені ризики через війну та політичну нестабільність зменшують привабливість таких проєктів для інвесторів. Крім того, існує спротив з боку традиційних енергетичних лобі – вугільних, газових і атомних компаній, які прагнуть зберегти свої прибутки та утримати існуючу структуру ринку.

Війна додає і додаткові ризики безпеки: сонячні та вітрові електростанції зазнають пошкоджень, а будівництво нових об'єктів у прифронтових зонах є небезпечним та часто неможливим. Всі ці фактори ускладнюють перехід України до більш сталого та незалежного енергетичного майбутнього

Метою роботи є огляд потенціалу біомаси як відновлювального ресурсу для виробництва паливного етанолу в Україні, оцінка ефективності різних видів сировини та технологій, а також економічної доцільності та екологічних переваг використання паливного етанолу в енергетичному секторі.

Результати та їх обговорення.

1. Біомаса, як відновлювальний ресурс.

Потреба світової економіки в енергетичних ресурсах щорічно зростає. Так, загальносвітові запаси нафти (станом на 2015 рік) становили 1657,4 млрд. барелів. Враховуючі те, що світове споживання нафти обчислюється майже в 99 млн. барелів на добу, постає необхідність в широкому застосуванні поновлювальних джерел енергії. Біомаса є найбільшим поновлювальним ресурсом, що використовується в світовому господарстві (більше 500 млн. тон у.п. на рік) [2]. Найбільш вагомим джерелом біомаси є деревина та сільськогосподарські культури.

Щорічно приріст біомаси у світі оцінюється в 146 млрд. т в перерахунку на суху речовину [3]. За оцінкою Біоенергетичної асоціації України, станом на 2015 р. потенціал енергії з біомаси складав 20,2 млн. т. н.е. [4]. Це солома, відходи сільського господарства, відходи деревообробних підприємств тощо.

Біомаса вважається одним з ключових поновлювальних ресурсів майбутнього. Її кількість сягає 2,423 1012т, або ≈ 550 Гт вуглецю (C), з яких $\approx 80\%$ припадає на рослини, серед яких переважають наземні рослини [5].

Для $\frac{3}{4}$ населення Землі, які проживають в країнах, що розвиваються, біомаса є найважливішим джерелом енергії. В країнах, що розвиваються, біомаса забезпечує в середньому 38% первинної енергії (в деяких до 90%). Ймовірно, що в 21 сторіччі біомаса залишиться важливим глобальним джерелом енергії. Найбільш розповсюдженими джерелами біомаси є рослини (деревина, торф, солома). В процесі їх використання та переробки кожен рік утворюється велика кількість відходів, що поновлюються.

Вважається, що лише 25% відходів використовуються ефективно. Країни, що розвиваються, за рахунок біомаси теоретично можуть покрити 15% потреби в енергії, промислові – 4% [6].

2. Стан виробництва паливного етанолу в Україні та види сировини, що є доступними в Україні.

В Україні станом на 2024–2025 роки працює понад 17 підприємств, що виробляють паливний етанол – загальна потужність – більш ніж 420 тис т/рік. З них активно експортували продукцію у 2024 році: Зарубинський спиртовий завод, Гайсинський спиртовий завод, Тростянецький спиртовий завод, Хоростківський спиртзавод, Гнідавський цукровий завод, Теофіпольський цукровий завод, Узинський цукровий комбінат, Будильський експериментальний завод, Vitagro, Westnol. За даними AgroPortal та AgroReview, ці підприємства забезпечили майже весь український експорт паливного етанолу (99,3 тис т/2024 року) [6]. Westnol (Львівська обл.) – один із найпотужніших: 150 м³/день зараз, збільшення до 600 м³/добу до 2025 року [7].

У сучасних промислових умовах виробництва паливного етанолу переважно використовують два основні типи первинної сировини: крохмалевмісну сировину із зернових

культур та цукровмісну сировину – сік або мелясу цукрових культур. Така сировина класифікується як паливний етанол першого покоління [8].

У кліматичній зоні Європи, до якої належить і Україна, енергетичними культурами для виробництва етанолу вважаються рослини з високим вмістом цукру та крохмалю. До них належать зернові культури, в тому числі кукурудза, картопля, цукрові буряки [11].

Серед зазначених культур кукурудза демонструє найвищий вихід паливного етанолу з одиниці сировини – у середньому близько 40 літрів з 1 центнера зерна за умови сухого помелу. При комплексній переробці кукурудзи методом мокрого помелу отримують не лише паливний етанол, а й крохмаль, глютен (клейковину), глюкозно-фруктозні сиропи, лізин, харчовий спирт, лимонну та молочну кислоти, а також білково-мінеральні вітамінні концентрати [10].

Цукровий буряк також є ефективною сировиною для виробництва паливного етанолу в Україні. Ця культура забезпечує найбільший вихід етанолу з одного гектара посівної площі, не потребує значних витрат на попередню обробку, а також сприяє зменшенню викидів парникових газів [11]. Побічними продуктами переробки буряка є буряковий жом, що використовується як корм для сільськогосподарської худоби, меляса та фільтраційний осад [12].

У межах наукових досліджень розглядається також можливість використання нетрадиційних енергетичних культур для виробництва паливного етанолу, зокрема енергетичної верби, міскантусу та цукрового сорго [13].

Наразі оптимальною з економічної та екологічної точок зору сировиною для виробництва паливного етанолу в Україні залишається меляса – побічний продукт цукрового виробництва, що характеризується стабільною наявністю, відносно низькою вартістю та високою ефективністю переробки.

За даними авторів роботи [14], загальні витрати енергії на отримання однієї тони паливного етанолу з меляси складають 9 459 МДж, з кукурудзи – 56 565 МДж. Різниця у виробничих енерговитратах пояснюється наявністю стадії операції розварювання сировини і оцукрювання крохмалю ферментами солоду або ферментними препаратами. Процес підготовки меляси до зброджування полягає лише в гомогенізації антисептованої меляси і розведенні водою (розсиропка).

Головним недоліком меляси, як сировини для виробництва паливного етанолу є її обмежена кількість. Згідно зі статистичними даними, у 2019 році цукрові заводи України закупили одержали 832581,6 тон цукру, 256067,6 тон меляси та 1297780 тон жому. Тобто з 256067 т можна отримати 77896 тон паливного етанолу, або (77896 тон $0,64 = 49853,44$ тон н.е.) [15].

Однак меляса також слугує сировиною для виготовлення харчових кислот, хлібопекарських і кормових дріжджів. Крім того, її використовують як добавку до раціону сільськогосподарських тварин, а також як зв'язувальний компонент у процесі грудкування дрібнодисперсного вугілля. [16]. Проблема можна вирішити використанням в якості сировини лігноцелюлозної біомаси.

Лігноцелюлозна біомаса є дешевим, поновлюваним та поширеним ресурсом, що не конкурує із продовольчими культурами. Крім того, використання лігноцелюлозної біомаси дозволяє скоротити викиди парникових газів порівняно з викопними паливами – приблизно на 30–85%, залежно від типу сировини [17, 18].

Водночас існують чинники, які стримують широке комерційне впровадження лігноцелюлозної сировини для виробництва паливного етанолу. Насамперед це складність технологічних процесів і висока собівартість, зумовлені природною стійкістю лігноцелюлозного комплексу до розкладу. Крім того, інтенсивне використання хімічних реагентів під час попередньої обробки спричиняє забруднення довкілля та потребує додаткових заходів для їх знешкодження.

На рис. 1 показано спрощені блок-схеми комплексної обробки основних видів сировини з отриманням паливного етанолу з позначенням побічних продуктів.

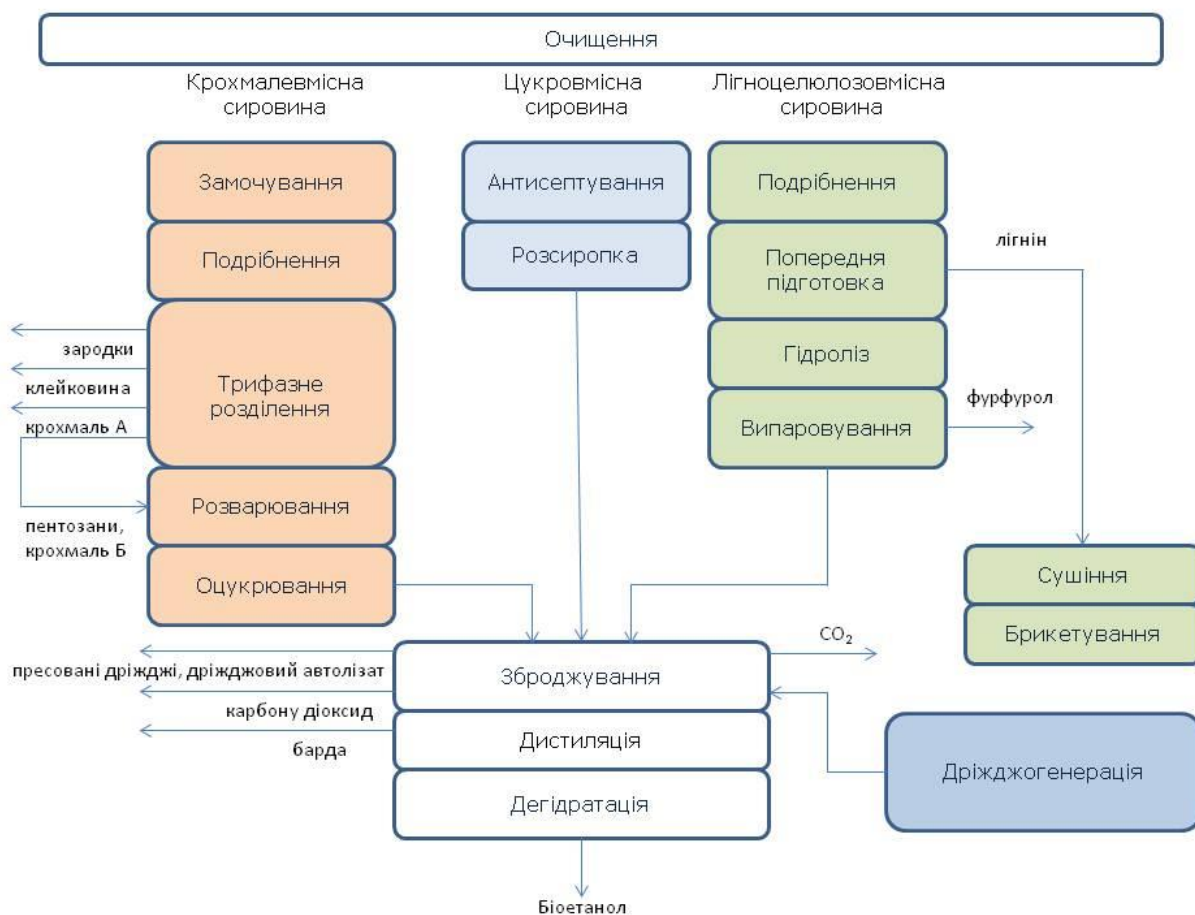


Рис. 1. Спрощена блок-схема комплексної обробки основних видів сировини для отримання паливного етанолу з позначенням побічних продуктів

В табл. 1 наведено порівняльну характеристику різних видів біомаси, як сировини для виробництва паливного етанолу.

Таблиця 1

Технологічна оцінка сировини для виробництва паливного етанолу [19]

Вид сировини	Вихід паливного етанолу, т/тони сировини	Необхідна посівна площа для виробництва однієї тони паливного етанолу, га
Зернові колоскові	0,3	1,24
Буряк	0,08	0,42
Цукрове сорго	0,09	0,14
Меяса	0,24	-
Солома пшенична	до 0,1*	-

* ферментативний гідроліз з попередньою обробкою очищеним КОН [20]

3. Економічна ефективність різних способів отримання паливного етанолу.

На сучасному етапі використання рослинної біомаси як первинного джерела енергії не може вважатися ефективним ані з економічної, ані з екологічної точки зору. Одномоментне спалювання або пряме використання біомаси, як палива, не забезпечує достатнього рівня рентабельності й супроводжується значними втратами потенційної цінності сировини. Натомість досвід ряду промислових підприємств, зокрема гідролізного профілю, демонструє, що високий рівень економічної ефективності може бути досягнутий шляхом впровадження глибокої комплексної переробки органічної сировини.

Комплексна переробка дозволяє отримувати широкий спектр продуктів з високою доданою вартістю, вартість яких значно перевищує ціну біомаси як пального ресурсу. Серед основних цільових продуктів, що формуються в результаті такого підходу, провідне місце займають паливний етанол та гідролізний лігнін – енерговмісні сполуки, які за своїми теплоутворюючими характеристиками є співставними з викопними видами палива.

Подальше підвищення ефективності технологій комплексної переробки органічної біомаси пов'язується із впровадженням сучасного технологічного обладнання та оптимізацією виробничих процесів. Зокрема, актуальним завданням є збільшення ступеня конверсії вихідної сировини у цільові та побічні продукти за умов збереження або зниження питомих енерговитрат. Це особливо важливо в контексті виробництва паливного етанолу, де вирішальним чинником економічної доцільності є обсяг спожитої енергії на одиницю готової продукції.

Існує ряд досліджень, які аналізують економічну доцільність переробки різних видів рослинної сировини для виробництва цукру з подальшим отриманням етанолу та супутніх продуктів [21–23]. Зокрема, у джерелі [23] наведено основні питомі капітальні витрати, що охоплюють будівлі, обладнання та витрати на зведення заводу, які оцінюються на основі вартості основного обладнання. Крім того, розглядаються виробничі витрати, що включають витрати на матеріали, оплату праці, комунальні послуги, обслуговування приміщень та амортизацію капіталу (рис. 2).

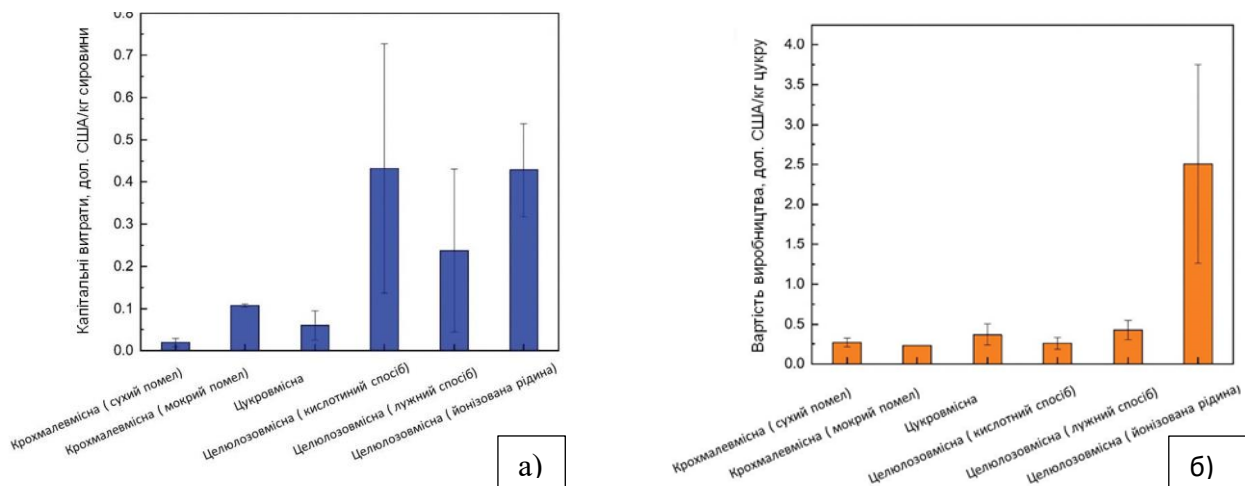


Рис. 2 Витрати на виробництво цукру з різних видів сировини:
а – основні капітальні витрати; б – виробничі витрати [23]

З рисунку видно, що при вкладенні в основні засоби переробки целюлозної сировини супроводжується більшими постійними витратами, порівняно з обробкою сировини першого покоління. Попередня обробка за допомогою кислоти має найвищі фіксовані витрати через додаткові витрати на захист обладнання від корозії. Обробка іонною рідиною та органосольвентними розчинами займає друге місце за величиною постійних витрат через необхідність додаткового обладнання для переробки і зберігання розчинників. Натомість, виробництво цукру з цукровмісної сировини є найдешевшим, оскільки процес вилучення цукру із соку відносно простий. Постійні витрати на мокрий помел вищі, ніж на сухий, через операції, пов'язані з фракціонуванням зерна кукурудзи. Обладнання, яке використовується для обробки сировини, її попередньої обробки та виділення лігніну, є основною причиною збільшення капіталовкладень для целюлозних ресурсів.

Як показано на рисунку 2 (б), попередня обробка сировини до гідролізу з використанням кислоти має найнижчі витрати на виробництво цукру, оскільки вона має високу ефективність та продуктивність цукру. Нижча продуктивність цукрової лужної попередньої обробки призводить до вищих витрат на виробництво цукру.

Найбільш перспективними в якості лігноцелюлозовмісної сировини для комплексної переробки залишаються сільськогосподарські відходи. Так, на 2017 рік первинні відходи рослинництва (солома та стебла) склали 15039 тис. тон н.е., або 57,7% від сукупного потенціалу біомаси сільськогосподарських підприємств України, деревна біомаса – 16,3%, енергетичні культури – 14,5% [24].

З рисунка 1 видно, що загальними етапами технологічного процесу виробництва паливного етанолу для різних видів сировини є: підготовка дріжджів, процес бродіння, перегонка та дегідратація етанолу. Відмінності на початкових етапах залежать від типу сировини, методу отримання цукрового розчину для бродіння, а також від способу утилізації побічних продуктів, які не використовуються для виробництва етанолу.

Найбільше енергоспоживання припадає на виробництво паливного етанолу з лігноцелюлозовної сировини, що включає етапи попередньої обробки перед гідролізом та сам гідроліз. Значна частина енергії витрачається на підтримання високих температур і тиску під час попередньої обробки та гідролізу з використанням розбавлених кислот, а також на підтримку потрібної температури протягом тривалого часу (до кількох днів) під час ферментативного гідролізу.

Основною метою попередньої обробки лігноцелюлозовної сировини є видалення лігніну, який ускладнює доступ ферментів, що розщеплюють целюлозу, до її волокон.

Комерційні методи попередньої обробки наведені у таблиці 2 [25].

Таблиця 2

Комерційні технології попередньої підготовки лігноцелюлозовної сировини до гідролізу

Вид процесу	Компанія-виробник	Характеристика
Паровий вибух	Beta Renewables	низький вихід ксилози велика кількість ферментного препарату
Одноетапна обробка розбавленою кислотою	Abengoa	високий вихід ксилози помірна кількість ферментного препарату
Двоетапна обробка розбавленою кислотою	Poet-DSM	високий вихід ксилози мала кількість ферментного препарату
Аміак і пара	Dupont	необхідна велика кількість ферментного препарату

У роботі [25] представлено розподіл витрат на обладнання для лігноцелюлозного підприємства (рис. 3). Найбільші економічні витрати пов'язані з попередньою обробкою сировини та виробництвом пари.



Рис. 3 Розподіл витрат на обладнання підприємства з виробництва паливного етанолу з целюлозовмісної сировини [25]

широко застосовуються в технологіях перемішування, гомогенізації, диспергування тощо [26].

4. Попередня підготовка лігноцелюлозовної сировини до гідролізу із застосуванням роторно-пульсаційного апарата.

Одним із способів підвищення ефективності комплексної переробки лігноцелюлозовної сировини є використання обладнання, яке дозволяє збільшити ступінь перетворення сировини в основні та побічні продукти. Прикладом такого обладнання є роторно-пульсаційні апарати – ефективні пристрої для інтенсифікації тепло- та масообміну у рідких багатокомпонентних середовищах, які

Зокрема, існує низка досліджень, що присвячені використанню роторно-пульсаційних апаратів у процесах приготування сусла з крохмалевмісної сировини [27, 28]. Результати досліджень застосування роторно-пульсаційного апарата для делігніфікації пшеничної соломи під час її попередньої підготовки до гідролізу наведені у роботі [29]. На рис. 4 представлено апаратурно-технологічну схему стадії попередньої підготовки до гідролізу, в якій використовується роторно-пульсаційний апарат та луг як агент для видалення лігніну. Обладнання складається з двох основних модулів: модуля попередньої підготовки (рис. 5) та модуля розділення і нейтралізації. Процес попередньої підготовки відбувається таким чином. Приймальна ємність (позначена як 1) та роторно-пульсаційний апарат (2) заповнюються лужним розчином. Після увімкнення двигуна в розчин, що рухається у зворотному потоці, додають попередньо подрібнену січку однорічної рослинної сировини. Отримана дисперсія проходить через роторно-пульсаційний апарат. Обробка проводиться в режимі рециркуляції при заданих умовах – температурі до 100°C та тиску до 0,1 МПа. Після цього дисперсія подається до модуля розділення і нейтралізації, де відокремлюється фільтрат, що містить лігнін, а також твердий целюлозний залишок, який направляється на наступну стадію – гідроліз.

Якщо розглядати паливний етанол як товар, він характеризується стабільним високим попитом і швидкою оборотністю, що забезпечує рентабельність на рівні 15–30%. Виробнича будівля має досить компактні розміри – 30×21×24 метри. Водночас, зведення комплексу з виробництва паливного етанолу дає підприємству можливість модернізувати виробництво та налагодити випуск додаткових продуктів, таких як хлібопекарські дріжджі, фурфурол або скраплена вуглекислота, які можна реалізовувати окремо.

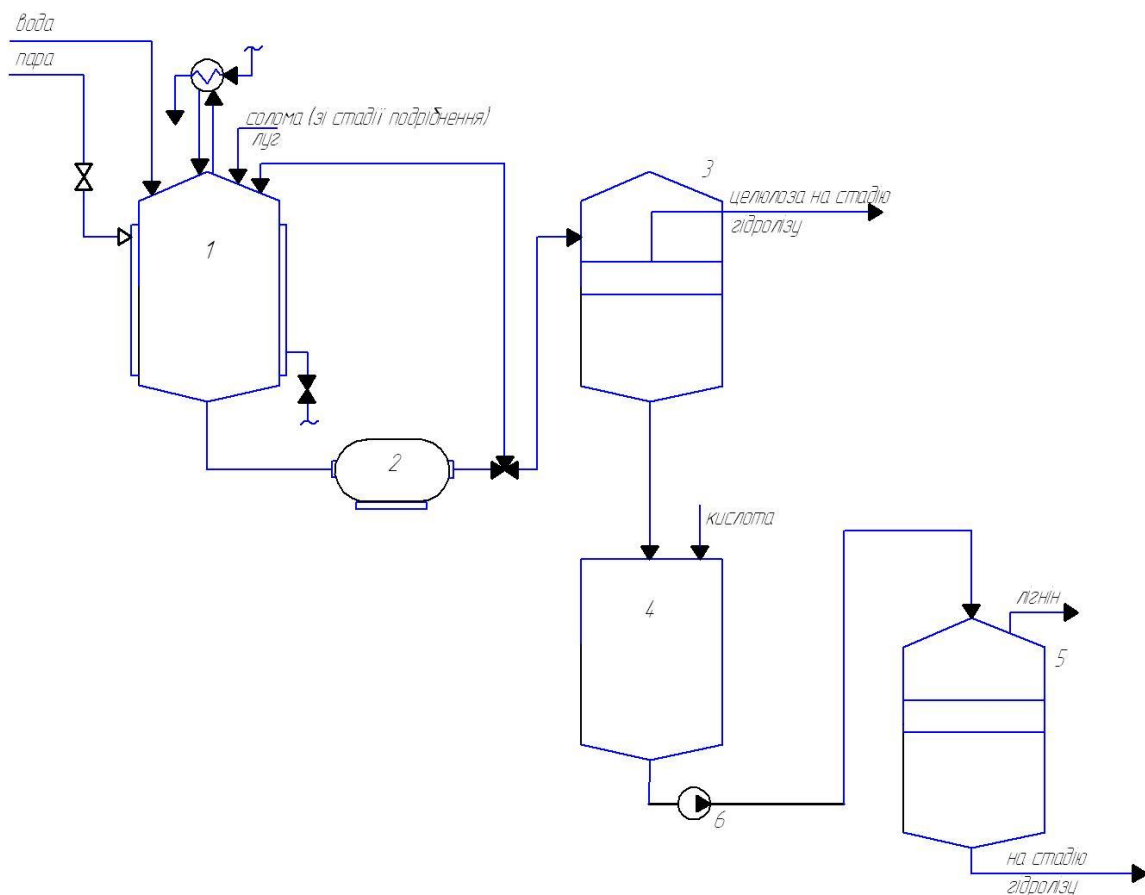


Рис. 4. Апаратурно-технологічна схема стадії попередньої підготовки до гідролізу з використанням роторно-пульсаційного апарата:

1 – приймальна ємність; 2 – роторно-пульсаційний апарат; 3, 5 – фільтр;
4 – проміжна ємність; 6 – насос



Рис. 5. Зовнішній вигляд модулю попередньої підготовки та робочі органи роторно-пульсаційного вузла роторно-пульсаційного апарата:

1 – приймальний бункер; 2 – ємності для сировини; 3 – вібродозатор; 4 – роторно-пульсаційний апарат; 5 – електродвигун

На перспективу розглядають проекти будівництва потужностей з виробництва біогазу шляхом метанізації барди та жому, що дозволить виробляти «зелену» електроенергію з коефіцієнтом ефективності 2,2–2,5. Наприклад, завод, який переробляє 200 тонн меляси на добу, виробляє 50 тонн паливного етанолу та 40 тонн вуглекислоти [30].

Лігнін та паливний етанол є цінними енергоносіями, що отримуються в результаті комплексної переробки рослинної біомаси. Калорійна цінність сухого лігніну становить 5500–6500 ккал/кг, що є порівнянним з теплотворною здатністю традиційного палива (близько 7000 ккал/кг). При вологості 18–25% теплота згоряння лігніну знижується до 4400–4800 ккал/кг, а за вологості понад 65% – до 1500–1650 ккал/кг. Для порівняння, калорійність етанолу становить 6405 ккал/кг, що робить його ефективним альтернативним паливом.

Згідно з даними провідного світового виробника лігніну – компанії Borregaard – з 1000 кг деревини в результаті процесів автоклавовання, знебарвлення та сушіння отримують 400 кг целюлози, 50 кг етанолу, 3 кг ваніліну та 400 кг гідролізного лігніну. Потенційні ресурси лігніну в Україні, які утворюються як побічні продукти у дріжджовому, кормовому та целюлозно-паперовому виробництвах, оцінюються в межах 5–15 млн тонн на рік.

Глибока комплексна переробка рослинної сировини є важливим фактором підвищення ефективності та рентабельності біотехнологічних виробництв. Завдяки отриманню продуктів з високою доданою вартістю, знижується собівартість основної продукції, що загалом підвищує економічну доцільність переробки. Продукти хімічної деструкції органічної сировини, що утворюються у гідролізному або дріжджовому виробництві, знаходять широке застосування у фармацевтичній, хімічній, косметичній промисловості, а також у будівництві.

У країнах з розвинутою промисловістю активно функціонують комбінати комплексної переробки органічної сировини. Зокрема, австрійська компанія Lenzing AG виробляє фурфурол, оцтову кислоту, сульфат натрію, калій та лігнін, одночасно генеруючи теплову та електричну енергію з використанням лігніну як палива. У Канаді фірма Ensyn спеціалізується на швидкому піролізі аграрних та деревних відходів з отриманням біодизелю, деревного вугілля, сполучних смол, паливного етанолу, дизельного та авіаційного палива. Отримані продукти застосовуються як паливо та сировина для хімічної промисловості. Компанія GEA Wiegand GMBH (Німеччина), займаючись виробництвом

паливного етанолу, додатково отримує глютенове борошно, крохмаль, декстрозу, фруктозний сироп та інші цінні продукти.

Лігнін, як продукт глибокої переробки, знайшов широке застосування як диспергатор, емульгатор, в'язуча речовина, клей, а також як сорбент для медичних та технологічних потреб, зокрема – для очищення стічних вод [31, 32]. У фармацевтичній галузі лігнін розглядається як перспективний матеріал для виробництва гідрогелів завдяки своїм антиоксидантним та антибактеріальним властивостям [33]. Зокрема, лігнін може бути використаний як основа для виготовлення пов'язок для ран за допомогою 3D-друку. Крім того, продукти термічного або хімічного розкладу лігніну вивчаються як потенційні антивірусні засоби та антиоксиданти [34].

Незважаючи на певні обмеження, лігніни й надалі активно застосовуються в комерційному секторі, переважно як компонент біопалив. Вони використовуються для виробництва паливних брикетів і пелет, у тому числі в сумішах із тирсою, вугільним та торф'яним пилом, а також для генерації паливного газу, що може бути використаний у газопоршневих газогенераторах для виробництва електроенергії, або ж як котельне паливо.

Найпоширенішою формою використання гідролізного лігніну з вологістю 60–65% залишається його пряме спалювання з метою одержання теплової енергії.

На сучасних підприємствах, що спеціалізуються на переробці лігноцелюлозної сировини, лігнін, отриманий у процесі обробки, використовується як паливо для виробництва технологічної пари. Застосування лігніну як енергетичного ресурсу дає змогу покривати до 73% загальної потреби у тепловій енергії при виробництві паливного етанолу, зокрема за лужною технологією [34].

Висновки. Виробництво паливного етанолу з крохмалевмісної, цукровмісної або лігноцелюлозної сировини передбачає застосування різних технологічних етапів, через що собівартість етанолу для кожного типу сировини відрізняється. Порівняно з паливним етанолом, отриманим із цукровмісної або крохмалевмісної сировини, етанол з лігноцелюлозної сировини має вищу ціну. Найбільше енерговитратною стадією у процесі виробництва паливного етанолу з лігноцелюлозної сировини є етап її попередньої підготовки до гідролізу.

Покращити рентабельність виробництва паливного етанолу з лігноцелюлозної сировини можна двома основними способами: по-перше, шляхом комплексної та глибокої переробки сировини з отриманням компонентів, які мають більшу вартість порівняно з вихідною органічною сировиною, що використовується як паливо; по-друге, за рахунок удосконалення технології та обладнання, що дозволить підвищити ступінь перетворення сировини у основні та побічні продукти.

Бібліографія

1. Petrović S. N., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A., Bühler F., Grandal R., Boucenna M., Balyk O. Exploring the Long-Term Development of the Ukrainian Energy System. *Energies*. 2021. 14 (22). 7731. <https://doi.org/10.3390/en14227731>.
2. IEA Bioenergy. (2021). Global Biomass Supply and Demand. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/09/Global-biomass-supply-and-demand-2021.pdf>.
3. Krausmann F., Erb K.-H., Gingrich S., Haberl H., Bondeau A., Gaube V., Lauk C., Plutzer C., Searchinger T. D. Global human appropriation of net primary production (HANPP). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 2013. 110(10). 4231–4236. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211349110>.
4. Практичний посібник з використання біомаси в якості палива у муніципальному секторі України <http://dia.dp.gov.ua/wp-content/uploads/2019/04/Посібник-для-представників-АПК-з-використання-біомаси-як-палива-у-муніципальному-секторі.pdf>
5. Bar-On Y. M., Phillips R., Milo R. The biomass distribution on Earth. *PNAS*. 2018. 115 (25). 6506–6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
6. Топ-10 постачальників українського біоетанолу на експорт. https://agroportal.ua/ru/news/novosti-kompanii/top-9-naybilshih-v-ukrajini-eksporteriv-bioetanolu?utm_source=chatgpt.com.

7. Сайт компанії Weshol https://www.westnol.com/?utm_source=chatgpt.com.
8. Zabed H., Faruq G., Sahu J. N., Azirun M. S., Hashim R., Boyce A. N. Bioethanol Production from Fermentable Sugar Juice. *The Scientific World Journal*. 2014. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/957102>
9. Пришляк В. М., Пришляк Н. В. Техніко-економічні та екологічні аспекти виробництва біоетанолу в Україні. Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків : зб. наук. праць / Ін-т біоенергет. культур і цукр. буряків, Нац. акад. аграр. наук України. К.: ФОП Корзун Д. Ю., 2013. Вип. 19. С. 219–226.
10. Пришляк Н. В. Ефективність виробництва біопалива на підприємствах бурякоцукрового комплексу: дис. ... канд. екон. наук: 08.00.04 / Вінниц. нац. аграр. ун-т. Вінниця, 2015. 187 с.
11. Лотиш А. Побічні продукти цукрового виробництва або як заробити на альтернативних видах продукції. *Цукор України*. 2015. 1 (109). 31–33 <http://ukrsugar.com/uk/post/cukor-ukraini-no1-109>
12. Калетнік Г. М., Скорук О. П., Браницький Ю. Ю. Організаційно-економічні засади організації біопаливного виробництва у Вінницькій області на базі Уладово-Люлинецької ДСС. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2017. 5. 7–25. http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2017_5_3
13. Олійнічук С. Т., Сосницький В. В. Прогресивні технології біопалива з рослинної сировини. *Продовольчі ресурси*. 2014. 2. 8-14. http://nbuv.gov.ua/UJRN/pr_2014_2_4.
14. Сайт Державної служби статистики. Реалізація промислової продукції за видами за переліком PRODCOM. <http://www.ukrstat.gov.ua>.
15. Нагурський О. А., Мальований М. С., Бунько В. Я. Застосування відходів бурякоцукрового виробництва для виробництва екологічно безпечних капсульованих мінеральних добрив. *Цукор України*. 2014. № 5. С. 39–41. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Cu_2014_5_8.
16. Saini J. K., Saini R., Tewari L. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. *3 Biotech* 2015. 5. 337–353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>.
17. Sarkar N., Ghosh S. K., Bannerjee S., Aikat K. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*. 2012. 37. 1. 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>.
18. Калетнік Г. М., Олійнічук С. Т., Скорук О. П. Економічна ефективність виробництва та використання паливний етанолу в Україні. *Збірник наукових праць ВНАУ Серія: Економічні науки*. 2012. №1 (56). С. 3–6. <http://econjournal.vsau.org/files/pdfa/491.pdf>.
19. Tutt M., Kikas T., and Olt J. Influence of different pretreatment methods on bioethanol production from wheat straw. *Agronomy Research Biosystem Engineering*. 2012. 1. 269–276 <https://agronomy.emu.ee/vol10Spec1/p10s131.pdf>.
20. Cheng M.-H., Wang Z., Dien B. S., Slininger P. J. W., Singh V. Economic Analysis of Cellulosic Ethanol Production from Sugarcane Bagasse Using a Sequential Deacetylation, Hot Water and Disk-Refining Pretreatment. *Processes*. 2019. 7. 642. <https://doi.org/10.3390/pr7100642>.
21. Sassner P., Galbe, M., Zacchi, G. Techno-economic evaluation of bioethanol production from three different lignocellulosic materials. *Biomass & Bioenergy*. 2008. 32. 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.10.014>.
22. Cheng M. H., Huang H., Dien B. S., Singh V. The costs of sugar production from different feedstocks and processing technologies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2019. 13. 723–739. <https://doi.org/10.1002/bbb.1976>.
23. Гальчинська Ю. М. Оцінка потенціалу біомаси побічної продукції сільськогосподарських культур в аграрному секторі економіки. *Економіка АПК*. 2019. № 5. С. 15–26. http://nbuv.gov.ua/UJRN/E_apk_2019_5_5.
24. Valdivia M., Galan J. L., Laffarga J., Ramos J. L. Biofuels 2020: Biorefineries based on lignocellulosic materials. *Microbial Biotechnology*. 2016. 9 (5). 585–94. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12387>.
25. Микро- и наноразмерные процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей / под общей ред. А. А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. К.: Академперіодика, 2015. 464 с.
26. Ободович О. М., Грабова Т. Л., Коба А. Р., Горячев О. А. Совершенствование технологии приготовления суслу из крахмалосодержащего сырья в спиртовом производстве с применением метода дискретно-импульсного ввода энергии. *Промышленная теплотехника*. 2007. Т. 29. № 4. С. 59–63.
27. Лимар А. Ю. Особливості дискретно-імпульсного введення енергії при диспергуванні крохмалевмісної сировини: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06. Київ, 2014. 24 с.

28. Sablii L. A., Obodovych O. M., Sydorenko V. V., Sheyko T. V. Study of wheat straw delignification in a rotary-pulsation apparatus. *Acta Periodica Technologica*. 2020. 51. 103–111. www.tf.uns.ac.rs/download/nauka/publikacije/acta/apteff-51-2020.pdf.

29. Український погляд на «біоетанол»: історія, проекти, перспективи <http://www.ukrsugar.com/uk/post/ukrainskij-poglad-na-bioetanol-istoria-proekti-perspektivi>.

30. Naseer A., Jamshaid A., Hamid A., Muhammad N., Ghauri M., Iqbal J., Rafiq S., Khuram S., and Samad Shah N. Lignin and Lignin Based Materials for the Removal of Heavy Metals from Waste Water-An Overview *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 2019. 233 (3). 315–345. <https://doi.org/10.1515/zpch-2018-1209>.

31. Suteu D., Zaharia C., & Malutan T. Biosorbents based on lignin used in biosorption processes from wastewater treatment. A review. In book: *Lignin: Properties and Applications in Biotechnology and Bioenergy* New York. Nova Science Publishers Inc. 2012. 278–305 https://www.academia.edu/31163115/Biosorbents_based_on_lignin_used_in_biosorption_processes_from_wastewater_treatment_A_review.

32. Asina F., Brzonova I., Kozliak E., Kubatova A., Ji Y. Microbial treatment of industrial lignin: Successes, problems and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. 77. 1179–1205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.098>.

33. Yu O., Osbert, Yu, Kim, K. H. Lignin to Materials: A Focused Review on Recent Novel Lignin Applications. *Application Science*. 2020. 10 (13). 4626. <https://doi.org/10.3390/app10134626>.

34. Koutinas A.A., Yianoulis P., Gravalos K., Koliopoulos K. A processing scheme for industrial ethanol production from straw. *Energy Conversion & Management*. 1981. 21 (2). 131–135. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90034-0).

References

1. Petrović, S. N., Diachuk, O., Podolets, R., Semeniuk, A., Bühler, F., Grandal, R., Boucenna, M., Balyk, O. (2021). Exploring the Long-Term Development of the Ukrainian Energy System. *Energies*. 14 (22). 7731. <https://doi.org/10.3390/en14227731>.

2. IEA Bioenergy. (2021). Global Biomass Supply and Demand. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/09/Global-biomass-supply-and-demand-2021.pdf>.

3. Krausmann, F., Erb, K.-H., Gingrich, S., Haberl, H., Bondeau, A., Gaube, V., Lauk, C., Plutzer, C., Searchinger, T. D. (2013). Global human appropriation of net primary production (HANPP). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 110 (10). 4231–4236. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211349110>.

4. Praktychnyi posibnyk z vykorystannia biomasy v yakosti palyva u munitsypalnomu sektori Ukrainy [A practical guide to the use of biomass as a fuel in the municipal sector of Ukraine] [in Ukrainian] <http://dia.dp.gov.ua/wp-content/uploads/2019/04/Посібник-для-представників-АПК-з-використання-біомаси-як-палива-у-муніципальному-секторі.pdf>.

5. Bar-On, Y. M., Phillips, R., Milo, R. The biomass distribution on Earth. *PNAS*. 2018. 115 (25). 6506–6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.

6. Top-10 postachalnykiv ukrainskoho bioetanolu na eksport [Top 10 suppliers of Ukrainian bioethanol for export]. https://agroportal.ua/ru/news/novosti-kompanii/top-9-naybilshih-v-ukrajini-eksporteriv-bioetanolu?utm_source=chatgpt.com.

7. Weshol company website https://www.westnol.com/?utm_source=chatgpt.com.

8. Zabeed, H., Faruq, G., Sahu, J. N., Azirun, M. S., Hashim, R., Boyce, A. N. Bioethanol Production from Fermentable Sugar Juice. *The Scientific World Journal*. 2014. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/957102>.

9. Pryshliak, V. M., Pryshliak, N. V. (2013). Tekhniko-ekonomichni ta ekolohichni aspekty vyrobnytstva bioetanolu v Ukraini [Technical, economic and environmental aspects of bioethanol production in Ukraine]. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovyykh buriakiv: zb. nauk. prats / In-t bioenerhet. kultur i tsukr. buriakiv, Nats. akad. ahrar. nauk Ukrainy*. Kyiv : FOP Korzun D.Iu. 19. 219–226. [in Ukrainian].

10. Pryshliak, N. V. (2015). Efektyvnist vyrobnytstva biopalyva na pidpriemstvakh buriakotsukrovoho kompleksu [Efficiency of biofuel production at the enterprises of the beet-sugar complex]. PhD. dissertation, Faculty of Economics and Entrepreneurship, Vinnytskyi natsionalnyi ahrarnyi universytet. Vinnytsia, Ukraine. 187. [in Ukrainian].

-
11. Lotysh, A. (2015). Pobichni produkty vyrobnytstva tsukru abo yak zarobyty na alternatyvnykh produktakh [By-products of sugar production or how to make money on alternative products]. *Tsukor Ukrainy* [Sugar of Ukraine]. 1(109). 31-33. <http://uksugar.com/uk/post/cukor-ukraini-no1-109>.
12. Kaletnik, H. M., Skoruk, O. P., Branytskyi, Yu. Yu. (2017). Orhanizatsiino-ekonomichni zasady orhanizatsii biopalyvnoho vyrobnytstva u Vinnytskii oblasti na bazi Uladovo-Liulynetskoi DSS. [Organizational and economic principles of organization of biofuel production in Vinnytsia region on the basis of Uladovo-Lyulinetska DSS]. *Ekonomika. Finansy. Menedzhment: aktualni pytannia nauky i praktyky* [Ekonomika. Finansy. Menedzhment: aktualni pytannia nauky i praktyky]. 5. 7–25. [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2017_5_3.
13. Oliinichuk, S. T., Sosnytskyi, V. V. (2014). Prohresyvni tekhnolohii biopalyva z roslynnoi syrovyny [Advanced technologies of biofuels from plant raw materials]. *Prodovolchi resursy* [Prodovolchi resursy]. 2. 8–14. (in Ukrainian). http://nbuv.gov.ua/UJRN/pr_2014_2_4.
14. Sait Derzhavnoi sluzhby statystyky. Realizatsiia promyslovoi produktsii za vydamy za perelikom PRODCOM (Website of the State Statistics Service. Sales of industrial products by types according to the PRODCOM list). <http://www.ukrstat.gov.ua>.
15. Nahurskyi, O. A., Malovanyi, M. S., , V. Ya. (2014). Zastosuvannia vidkhodiv buriakotsukrovoho vyrobnytstva dlia vyrobnytstva ekolohichno bezpechnykh kapsulovanykh mineralnykh dobryv [Application of beet-sugar production waste for production of ecologically safe encapsulated mineral fertilizers]. *Tsukor Ukrainy* [Sugar of Ukraine]. 5. 39–41. [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Cu_2014_5_8.
16. Saini, J. K., Saini, R., Tewari, L. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. *3 Biotech* 2015. 5. 337–353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>.
17. Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*. 37 (1). 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>.
18. Kaletnik, H. M., Oliinichuk, S. T., Skoruk, O. P. (2012). Ekonomichna efektyvnist vyrobnytstva ta vykorystannia bioetanolu v Ukraini [Economic efficiency of bioethanol production and use in Ukraine]. Collection of scientific papers of the Ukrainian National Academy of Sciences Series: Economic Sciences [Zbirnyk naukovykh prats VNAU Serii: Ekonomichni nauky]. 1 (56). 3–6. (in Ukrainian). <http://econjournal.vsau.org/files/pdfa/491.pdf>.
19. Tutt, M., Kikas, T., Olt, J. (2012). Influence of different pretreatment methods on bioethanol production from wheat straw. *Agronomy Research Biosystem Engineering*. 1. 269–276 <https://agronomy.emu.ee/vol10Spec1/p10s131.pdf>.
20. Cheng, M.-H., Wang, Z., Dien, B. S., Slininger, P. J. W., Singh, V. (2019). Economic Analysis of Cellulosic Ethanol Production from Sugarcane Bagasse Using a Sequential Deacetylation, Hot Water and Disk-Refining Pretreatment. *Processes*. 7. 642. <https://doi.org/10.3390/pr7100642>.
21. Sassner, P., Galbe, M., Zacchi, G. (2008). Techno-economic evaluation of bioethanol production from three different lignocellulosic materials. *Biomass & Bioenergy*. 32. 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.10.014>.
22. Cheng, M. H., Huang, H., Dien, B. S., Singh, V. (2019). The costs of sugar production from different feedstocks and processing technologies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 13. 723–739. <https://doi.org/10.1002/bbb.1976>.
23. Halchynska, Yu. M. (2019). Otsinka potentsialu biomasy pobichnoi produktsii silskohospodarskykh kultur v aharnomu sektori ekonomiky [Assessment of the biomass potential of crop by-products in the agricultural sector of the economy]. *Ekonomika APK* [Agriculture and Industrial Complex Economics]. № 5, 15–26. [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/E_apk_2019_5_5.
24. Valdivia, M., Galan, J. L., Laffarga, J., Ramos, J. L. Biofuels 2020: Biorefineries based on lignocellulosic materials. *Microbial Biotechnology*. 2016. 9 (5). 585–94. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12387>.
25. Mikro- i nanourovnevnyie protsessy v tekhnologiyah DIVE: Tematicheskii sbornik statey [Micro- and nanoscale processes in DPIE technologies: Thematic collection of articles] edited by A. A. Dolinskij; Institute of Engineering Thermophysics. Kyiv: Akademperryodyka. 2015, 464 p. [russian].
26. Obodovich, O. M., Grabova, T. L., Koba, A. R., Gorjachev, O. A. Sovershenstvovanie tekhnologii prigotovleniya susla iz krahmalosoderzhashego syrya v spirtovom proizvodstve s primeneniem metoda diskretno-impulsnogo vvoda energii [Improvement of the technology of wort preparation from starch-containing raw materials in alcohol production using the method of discrete-pulse energy input]. *Promyshlennaja teplotekhnika* [Industrial Engineering]. 2007, 29 (4), 59–63.
-

-
27. Lymar, A. U. Osoblyvosti dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii pry dysperhuvanni krokhmalevmisnoi syrovyny [Features of discrete-pulse energy input during dispersion of starch-containing raw materials]. Ph.D. dissertation, Institute of Engineering Thermophysics. Kyiv, Ukraine. 2014. [in Ukrainian].
28. Sablii, L. A., Obodovych, O. M. Sydorenko, V. V., Sheyko, T. V. (2020). Study of wheat straw delignification in a rotary-pulsation apparatus. *Acta Periodica Technologica*. 51. 103–111. www.tf.uns.ac.rs/download/nauka/publikacije/acta/apteff-51-2020.pdf
29. Ukrainskyi pohliad na «bioetanol»: istoriia, proekty, perspektyvy [Ukrainian view on "bioethanol": history, projects, prospects] <http://www.ukrsugar.com/uk/post/ukrainskij-poglad-na-bioetanol-istoria-proekti-perspektivi>.
30. Naseer, A., Jamshaid, A., Hamid, A., Muhammad, N., Ghauri, M., Iqbal, J., Rafiq, S., Khuram, S., Samad Shah, N. (2019). Lignin and Lignin Based Materials for the Removal of Heavy Metals from Waste Water-An Overview. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 233 (3). 315–345. <https://doi.org/10.1515/zpch-2018-1209>.
31. Suteu, D., Zaharia, C., Malutan, T. (2012). Biosorbents based on lignin used in biosorption processes from wastewater treatment. A review. In book: *Lignin: Properties and Applications in Biotechnology and Bioenergy* New York. Nova Science Publishers Inc. 278-305. https://www.academia.edu/31163115/Biosorbents_based_on_lignin_used_in_biosorption_processes_from_wastewater_treatment_A_review.
32. Asina, F., Brzonova, I., Kozliak, E., Kubatova, A., Ji Y. (2017). Microbial treatment of industrial lignin: Successes, problems and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 77. 1179–1205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.098>.
33. Yu, O., Kim, K. H. (2020). Lignin to Materials: A Focused Review on Recent Novel Lignin Applications. *Application Science*. 10 (13). 4626. <https://doi.org/10.3390/app10134626>.
34. Koutinas, A. A., Yianoulis, P., Gravalos, K., Koliopoulos, K. (1981). A processing scheme for industrial ethanol production from straw. *Energy Conversion & 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).
-