

DOI: 10.31319/2519-2884.48.2026.17

УДК 661.746.2

Гуляєв В.М.¹, д.т.н., професор, ORCID:0000-0002-4991-6250, e-mail: vgulyaev@dnepro.net**Коваленко А.Л.**¹, к.х.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1496-6634,

e-mail: alla.kovalenko.1948@gmail.com

Кузнєцова О.О.², к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-1786-314X ,

e-mail: olena.kuznietsova@npp.kai.edu.ua

Корнієнко Ю.М.¹, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти¹Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське²Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ**Gulyaev Vitalii**¹, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Chemical and Biological Technologies, rector**Kovalenko Alla**¹, Candidate of chemical sciences, Associate Professor of the Department of Chemical and Biological Technologies**Kuznietsova Olena**², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of Biotechnology Department**Korniienko Yurii**¹, postgraduate student¹Dniprovsky State Technical University, Kamianske²State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv

ПРИНЦИПИ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ В ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ МОЛОЧНОЇ КИСЛОТИ: ДОСВІД КРАЇН ЄС ТА ПОТЕНЦІАЛ УКРАЇНИ

Проаналізовано шляхи реалізації принципів циркулярної економіки у виробництві молочної кислоти хімічним синтезом і біотехнологічним способом. Показано, що хімічний синтез дозволяє досягти високого ступеня чистоти готового продукту та потужності виробництва за умови автоматизованого контролю технологічних параметрів, проте вимагає значних енерговитрат, використання каталізаторів і призводить до утворення відходів, які можуть чинити негативний вплив на довкілля. Біотехнологічна ферментація сільськогосподарських відходів, таких як солома, залишки від переробки фруктів та овочів, передбачає використання відновлюваної сировини, зниження карбонового сліду та інтеграцію у цикли циркулярної економіки. Однак цей підхід також має обмеження: складність попередньої обробки та варіабельність складових відходів, потреба в оптимізації штамів мікроорганізмів та умов ферментації для досягнення належної економічної ефективності.

Ключові слова: біотехнологія; відходи; молочна кислота; ферментація; хімічний синтез; циркулярна економіка.

The ways of implementing the principles of the circular economy in the production of lactic acid by chemical synthesis and biotechnological methods are analyzed. It is shown that chemical synthesis allows achieving a high degree of purity of the finished product and production capacity under the condition of automated control of technological parameters, however, it requires significant energy consumption, the use of catalysts and leads to the formation of waste that can have a negative impact on the environment. Biotechnological fermentation of agricultural waste, such as straw, residues from fruit and vegetable processing, involves the use of renewable raw materials, reducing the carbon footprint and integrating into the cycles of the circular economy. However, this approach also has limitations: the complexity of pre-treatment and the variability of waste components, the need to optimize the strains of microorganisms and fermentation conditions to achieve proper economic efficiency.

Keywords: biotechnology; waste; lactic acid; fermentation; chemical synthesis; circular economy.

Постановка проблеми

Прискорення світового розвитку промисловості призводить до збільшення витрат матеріальних та енергетичних ресурсів, зростання обсягів виробничих відходів і посилення забруднення навколишнього середовища. Країни ЄС наразі почали використовувати принципи циклічної

(циркулярної) економіки, що ґрунтується на інноваційній моделі ланцюжка поставок, яка є одночасно регенеративною та екологічно безпечною. Циклічна економіка підвищує ефективність використання ресурсів за рахунок замкненого циклу матеріальних та енергетичних ресурсів упродовж всього життєвого циклу продукту. Це призводить до скорочення кількості утворених відходів, зростання економічної ефективності виробництва, поліпшення соціальних умов життя суспільства та технологічного прогресу. Зростаючий акцент на сталому виробництві зумовлює необхідність розробки ефективних стратегій скорочення відходів у технологіях виробництва хімічних речовин, а саме в переробці лігнінвмісних відходів у практиці отримання молочної кислоти. Молочну кислоту можна отримати як хімічним, так і біотехнологічним методом, кожен з яких має переваги та недоліки, однак ключовим фактором є те, що молочну кислоту можна отримати шляхом переробки відходів, що є економічно доцільним рішенням із збереженням природних ресурсів. Наразі актуальним і проблемним питанням лишається можливість впровадження європейських практик циркулярної економіки в сучасних соціально-економічних реаліях України стосовно технології отримання молочної кислоти.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Запровадження принципів циркулярної економіки відіграє ключову роль у досягненні цілей сталого розвитку Організації Об'єднаних Націй [1—3]. Економічні та екологічні переваги стратегій циркулярної економіки піддаються критичній оцінці. Такі виклики, як складність ланцюгів постачання, високі початкові інвестиційні внески та технологічні бар'єри, аналізуються разом з потенційними рішеннями, включаючи співпрацю зацікавлених сторін, політичні стимули та інтеграцію принципів безвідходних технологій. Узагальнюючи найкращі та нові практики ЄС, цей підхід пропонує вагомі рішення для хімічної та біотехнологічної галузі. Враховуючи те, що Україна обрала європейський вектор розвитку, лишається не вирішеним питання переробки виробничих та інших відходів, що відображено у підтриманій урядом Національній стратегії розвитку України, яку необхідно впровадити до 2030 року. Стратегія переробки відходів в контексті виробництва молочної кислоти є актуальним питанням сьогодення, яке повинно вирішуватися, враховуючи значний попит на даний продукт.

Детальний огляд наукових джерел і практичних прикладів дозволяє сформулювати уявлення про успішні ініціативи зі скорочення відходів, реалізовані провідними виробниками [1—3]. Принципи циркулярної економіки пропонують рішення, які сприяють повторному використанню, переробці та перепрофілюванню матеріалів, створюючи тим самим замкнені системи, які зменшують негативний вплив на довкілля та сприяють сталому економічному зростанню виробництва [4, 5]. Ключові стратегії включають перепроєктування та удосконалення технологічних процесів, заміну небезпечних хімічних речовин альтернативними, більш екологічними. Впровадження цих стратегій дозволяє покращити екологічні показники та економічну конкурентоспроможність виробництва, допомагає виробникам дотримуватися суворих екологічних норм та, водночас, отримувати ринкові переваги. Однак перехід від традиційних лінійних систем до циркулярних моделей пов'язаний з низкою викликів, серед яких технічні бар'єри, економічні обмеження, регуляторні складнощі та необхідність тісної співпраці зацікавлених сторін [6].

Впровадження принципів циркулярної економіки у хімічному та біологічному синтезі молочної кислоти має на меті мінімізувати кількість утворюваних відходів, підвищити ефективність використання ресурсів і зменшити негативний вплив на навколишнє середовище [5—7].

Технології отримання молочної кислоти хімічним і біологічним синтезом у відповідності з принципами циркулярної економіки мають спільну мету — переробку сільськогосподарських лігнінвмісних відходів і спрямовані на:

- отримання молочної кислоти ($C_3H_6O_3$) заданої концентрації і чистоти;
- забезпечення стабільності продукту для подальшого використання у різних галузях народного господарства.

Обидві технології мають спільні стадії виробництва:

- підготовка сировини;
- виділення та очищення молочної кислоти з використанням типового технологічного обладнання (реактори, випарники, фільтри, іонообмінні колони) і систем контролю (температури, рН реакційного середовища).

Таким чином, технологічні рішення, розроблені для хімічного синтезу, можуть бути адаптовані до біотехнологічних процесу, і навпаки.

Взаємодоповнюваність двох розглянутих технологій полягає в наступному:

- хімічний синтез забезпечує високу продуктивність і незалежність від біологічних факторів, але призводить до отримання рацемічної суміші D- і L- ізомерів молочної кислоти, яку необхідно в подальшому розділяти на індивідуальні сполуки;

- біологічний синтез з використанням мікроорганізмів-продуцентів дозволяє одержати один з оптичних ізомерів молочної кислоти, що є важливим для її подальшого застосування у складі біополімерів і фармацевтичних субстанцій.

Біотехнологічний спосіб отримання молочної кислоти дозволяє використовувати в якості сировини відновлювальні джерела — органічні відходи, суміші простих і складних вуглеводів.

Слід зазначити, що хімічний і біотехнологічний синтез молочної кислоти не протиставляються один одному, а перебувають у тісному технологічному та науковому зв'язку. Хімічний синтез сформував основу промислової технології, тоді як біотехнологічний синтез розвинув її у напрямку екологічності, селективності та використання відновлюваних ресурсів [8].

Формування мети дослідження

Метою роботи є аналіз перспектив впровадження принципів циркулярної економіки за прикладом ЄС в зелені технології отримання молочної кислоти на основі органічних відходів.

Виклад основного матеріалу

Зростаючий попит на молочну кислоту (МК), зумовлений її застосуванням у складі біодеградабельних пластмас, харчових добавок, фармацевтичних препаратів і косметичних засобів, вимагає розробки ефективних методів її виробництва. Традиційні процеси базуються на використанні сировини харчового призначення, що поглиблює проблему продовольчої безпеки. Нижче розглядається критична прогалина у використанні сільськогосподарських відходів як нехарчової сировини для виробництва МК, що дозволяє скоротити кількість відходів і сприяти розвитку економіки замкнутого циклу.

Молочна кислота являє собою жовту або безбарвну рідину; розчинну у воді, етанолі та інших гідрофільних органічних розчинниках. Через гігроскопічність молочної кислоти її зазвичай отримують у вигляді безбарвного концентрованого розчину з вмістом основної речовини до 90%. Молочна кислота не має запаху, менш летка і є найпростішою гідроксикарбоною кислотою з фізико-хімічними властивостями, які відрізняються для D- і L-ізомерів [9].

Річний обсяг світового ринку молочної кислоти у 2020 році оцінювався в 1,1 мільярди доларів США. Очікується, що в період з 2021 по 2028 рр. його середньорічний темп зростання становитиме 8 % [10].

Харчова, фармацевтична та хімічна галузі промисловості мають потенціал для **розширеного** використання МК (рис. 1), завдяки її високій доданій вартості, безпеці та можливості отримання з різних відходів. Більшим попитом на ринку користується L-форма МК. Лактати кальцію та натрію є ефективними емульгаторами у хлібопекарській промисловості, використання яких дозволяє скоротити час випічки та поліпшити якість продукції, у фармацевтиці вони становлять основу препаратів проти остеопорозу та дерматологічних захворювань [11].

Переробка агропромислових відходів у молочну кислоту за допомогою мікробної ферментації відповідає глобальним вимогам до сталого біовиробництва, забезпечуючи продовольчу та кормову безпеку, а також екологічну стійкість за рахунок економічно ефективного використання ресурсів [8—11].

Використання сільськогосподарських відходів у виробництві МК пов'язане з низкою проблем. Сучасні дослідження в основному зосереджені на оптимізації процесів ферментації та штамів мікроорганізмів для підвищення виходу МК. Мікробна ферментація є кращим варіантом, оскільки забезпечує високий стереохімічний контроль біосинтезу, знижує негативний вплив на навколишнє середовище та забезпечує стійкий, відновлюваний підхід до виробництва. Техніко-економічний аналіз виробництва МК з лігноцелюлозної біомаси (кукурудзяна соломка і міскантус) в річному масштабі 100 000 тон виявляє ключові фактори витрат, включаючи сировину, енергію, капіталовкладення та ефективність процесу. Серед бактеріальних, грибових і дріжджових культур для ферментації генетично модифіковані дріжджі продемонстрували найнижчі виробничі витрати (993—1123 дол. США/тонна), головним чином завдяки поліпшеній конверсії цукру та спрощеній подальшій обробці.



Рис. 1. Напрямки використання молочної кислоти

Питання забруднення довкілля та економічної доцільності великомасштабного виробництва МК залишаються недостатньо вивченими. Незважаючи на потенціал сільськогосподарських відходів як сталого джерела карбону для виробництва молочної кислоти, залишається істотна прогалина в розумінні мінливості складу сільськогосподарських субстратів та їх впливу на ефективність ферментації. Наразі відсутні всебічні дослідження, присвячені оптимізації параметрів ферментації та розробці стійких мікробних штамів, здатних ефективно перетворювати різні сільськогосподарські відходи в МК. Крім того, інтеграція передових методів попередньої обробки для підвищення біодоступності ферментованих цукрів, отриманих з лігноцелюлозної біомаси, не набула поширення [12].

МК утворюється в результаті різних хімічних реакцій, включаючи гідроліз похідних МК, наприклад, її естерів або нітрילів, гідроліз заміщених пропіонових кислот, декарбоксілювання похідних 2-метилмалонової кислоти, відновлення, окислення, перегрупування та диспропорціонування [13]. Комерціалізованим є хімічний синтез МК з її похідних, а також з використанням різних джерел карбону (рис. 2).

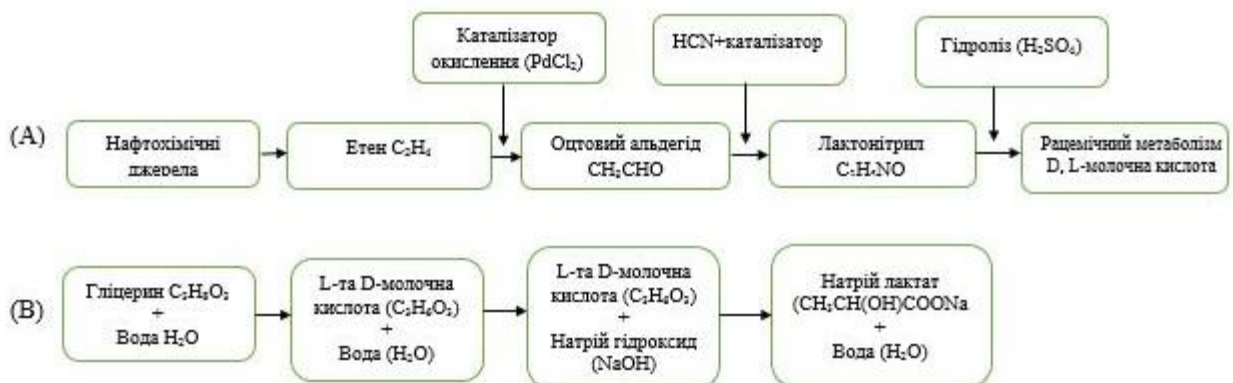


Рис. 2. Схеми хімічного синтезу молочної кислоти з різних карбонвмісних джерел

Стадії виробництва МК з використанням нафтохімічних джерел включають окислення етену в присутності паладій (II) хлориду з утворенням оцтового альдегіду, який у рідкій фазі під високим тиском з гідроген ціанідом у присутності основи перетворюється на лактонітрил. Лактонітрил виділяють та очищують, а сульфатну кислоту використовують для гідролізу лактонітрилу з утворенням рацемічної суміші L– і D–ізомерів МК.

За іншою схемою синтез МК або її лактату здійснюють із суміші гліцерину та води в присутності натрій гідроксиду в якості каталізатору. В цьому випадку також утворюється рацемічна суміш L– і D–ізомерів МК [10–12].

У роботі [13] показано, що МК також можна синтезувати з манітолу (C₆-поліолу) в лужному середовищі при нагріванні, однак вихід МК з цього субстрату нижчий, порівняно з глюкозою або гліцерином. Інші шляхи хімічного синтезу МК включають окиснення пропіленгліколю при низькій температурі, перетворення пропену в α -нітропропіонову кислоту в присутності нітратної кислоти з наступним гідролізом її в МК [13].

Харчові відходи та лігноцелюлозна біомаса останнім часом розглядається як альтернатива нафтохімічним джерелам для синтезу МК. Харчові відходи зазвичай багаті на вуглеводи, зокрема крохмаль, в той же час лігноцелюлозна біомаса вважається кращим субстратом [14]. Лігноцелюлоза складається з целюлози, обгорнутої щільними структурами геміцелюлози та лігніну [13–14], також містить ксилан, глюкани та манани, невелику кількість золи, пектину, екстрактивних речовин і білків [15]. Целюлоза, геміцелюлоза та лігнін є структурними каркасами клітинних стінок рослин, їх розподіл варіює в різних видах і частинах рослин.

Важливими факторами, які визначають вміст целюлози, геміцелюлози та лігніну, є регіон зростання та умови вирощування рослин. Сільськогосподарські, лісові, промислові, тверді побутові відходи є найбільш часто використовуваними джерелами лігноцелюлози (рис. 3).

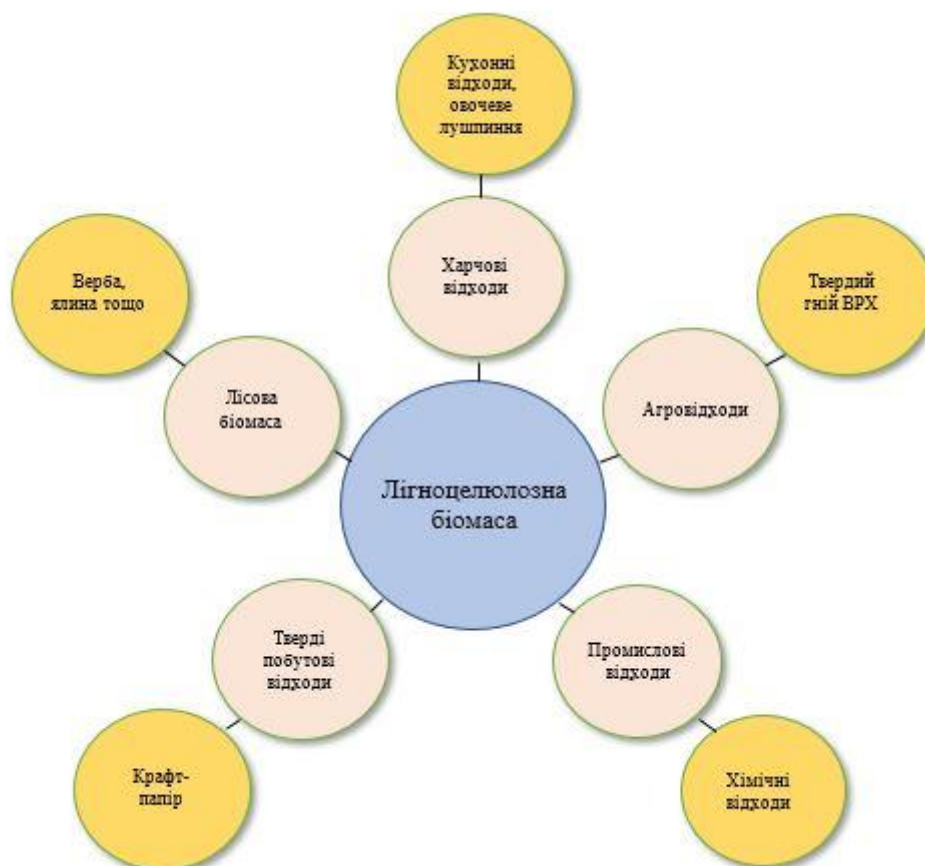


Рис. 3. Джерела лігноцелюлози

Через багатокомпонентний склад лігноцелюлозних матеріалів, для їх подальшого застосування потрібна попередня обробка, яка дозволяє видалити лігнін і геміцелюлозу, знизити кристалічність целюлози та збільшити пористість обробленої таким чином сировини [16, 17]. При цьому макро– і мікроскопічна будова рослинної біомаси, а також її хімічний склад руйнуються для досягнення більш швидкого гідролізу полісахаридів, що призводить до більш високого виходу простих вуглеводів. Попередня обробка може бути здійснена фізичними методами (подрібнення, помел, піроліз), хімічними (кислотний або лужний гідроліз, окислювальна делігніфікація, озоноліз), біологічними (обробка ферментними препаратами, які здійснюють гідроліз лігніну, целюлози).

У табл. 1 зазначено основні виклики, пов'язані із впровадженням принципів циркулярної економіки в хімічній інженерії, та запропоновані рішення.

Таблиця 1. Проблеми впровадження практик циркулярної економіки та запропоновані рішення

Виклики	Запропоновані рішення
Високі початкові інвестиції	Державні стимули, субсидії та стратегії поетапного впровадження
Технологічні обмеження	Інвестиційний розвиток, партнерство з розробниками технологій та пілотні проекти
Регуляторні труднощі	Чіткі нормативно-правові рамки, співпраця в галузі та програми підтримки дотримання вимог
Ланцюг поставок	Зміцнення мереж постачальників, політика циркулярних закупівель і вдосконалення логістики
Опір змінам	Навчання співробітників, програми підвищення обізнаності та прихильності керівництва до сталого розвитку

Основним викликом є високі початкові інвестиції, необхідні для модернізації промислової інфраструктури та автоматизації технологічного процесу виробництва, які можна зменшити шляхом залучення державних фінансових стимулів, субсидій і стратегій поетапного впровадження. Технологічні обмеження також гальмують реалізацію принципів циркулярної економіки, оскільки окремі галузі не мають доступу до передових технологій відновлення та переробки; цю проблему можна вирішити за допомогою впровадження пілотних, малотоннажних проектів [18].

Невідповідність нормативно-правової бази України і країн ЄС ускладнює дотримання вимог через різницю в екологічній політиці, але чіткі політичні рамки, співпраця між галузями та програми підтримки можуть спростити впровадження замкнених технологій. Обмеження ланцюга поставок ще більше ускладнюють впровадження циркулярних практик, що вимагає зміцнення мереж постачальників і вдосконалення логістики.

Принципи циркулярної економіки сприяють створенню стійкої та стабільної виробничої системи, в якій відходи мінімізуються, цінні матеріали постійно відновлюються, а негативний вплив на навколишнє середовище суттєво зменшується. Однак перехід до цих стійких практик супроводжується значними викликами. Дотримання нормативних вимог залишається актуальною проблемою, оскільки виробники повинні постійно адаптуватися до мінливих стандартів, таких як обмеження на використання небезпечних речовин.

Висновки

Реалізація принципів циркулярної економіки в хімічній інженерії та біотехнології полягає у виключенні відходів, збереженні цінних, високовартісних матеріалів (повторне використання, переробка, відновлення) і відновленні природних систем. Цього можна досягти, використовуючи такі принципи, як утилізація відходів, промисловий симбіоз, екодизайн і передові технології каталізу для перетворення побічних продуктів (CO₂, пластмаси, біомаса) на нову сировину, тим самим зменшуючи залежність від первинних ресурсів і забруднення навколишнього середовища.

Молочна кислота може бути отримана з сільськогосподарських відходів. Цей підхід використовує залишки сільськогосподарських культур, такі як пшенична солома та кукурудзяне бадилля в якості сировини для процесів ферментації. За допомогою різних мікроорганізмів ці багаті карбоном органічні відходи можуть бути ефективно перетворені на молочну кислоту. В результаті можна не тільки досягти скорочення кількості відходів, але і сформувати екологічно чисту альтернативу традиційним методам виробництва. Отриману в результаті цього процесу молочну кислоту можна використовувати у виробництві біодеградабельних пластмас, харчових добавок і фармацевтичних препаратів, тим самим сприяючи розвитку економіки замкнутого циклу та просуванню стійких практик. Традиційні хімічні методи виробництва молочної кислоти значною мірою базуються на нафтохімічних процесах, які є як екологічно шкідливими, так і нестійкими в довгостроковій перспективі. Повторне використання органічних побічних продуктів мінімізує екологічну шкоду, підтримуючи при цьому циклічну економіку, що сприяє розвитку європейського вектору України.

Дану роботу виконано в рамках діючого гранту Жана Моне: Waste Management in the Context of Transition to a Circular Economy: the EU Experience (101172378 — CIRCLEMAN — ERASMUS-JMO-2024-HEI-TCH-RSCH)).

Список використаної літератури

1. Droege H., Raggi A., Ramos T. Overcoming Current Challenges for Circular Economy Assessment Implementation in Public Sector Organisations. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No 6. P. 1182–1197.
2. Yurgilevich A., Birge T., Kentala-Lehtonen J. Transition to a circular economy in the food system. *Sustainable Development*. 2016. Vol.8, No 2. P. 69–75.
3. Stegmann P., Londo M., Junginger M. Circular bioeconomy: its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resour. Conserv. Recycling*. 2020. Vol. 6. P. 100–116.
4. Yankov D. Fermentative lactic acid production from lignocellulosic feedstocks: from source to purified product. *Front. Chem*. 2022. Vol.10. P.1–34.
5. Nowak-Marchewka K., Osmólska E., Stoma M. Progress and Challenges of Circular Economy in Selected EU Countries. *Sustainability ER*. 2025. Vol. 17, No 1. P. 320–331.
6. Nwamekwe Ch., Chidiebube I. Human-Robot Collaboration in Industrial Engineering: Enhancing Productivity and Safety. *Journal of Industrial Engineering & Management Research*. 2025. Vol. 6, No 5. P. 1–20.
7. Kwakye N. J. M., Esiri, N. A. E. Circular economy practices in the oil and gas industry: a business perspective on sustainable resource management. *GSC Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 20, No 3. P.267–285.
8. Rahman N., Ngaini Z., Farooq S. Sustainable lactic acid production from agricultural waste: a review of current techniques, challenges and future directions. *Bioresour Bioprocess*. 2025. Vol. 12, No 1. P. 81–92.
9. Nahla M. Salatein A.M. Lactic acid separation technologies: Enhancing efficiency and purity using membrane separation technology (mini review). *Results in Chemistry*.2025. Vol. 15. P. 102–120.
10. Krishna B.S., Nikhilesh G.S.S. Industrial production of lactic acid and its applications. *Int. J. Biotechnol. Res*. 2018. Vol. 1. P. 42–54.
11. Aguirre-Garcia Y. L., Nery-Flores S.D., Campos-Muzquiz L.G. Lactic acid fermentation in the food industry and bio-preservation of food. *Fermentation*. 2024. Vol. 10, No 3. P. 168–181.
12. Augustiniene E., Valanciene E., Matulis P. Bioproduction of L- and D-lactic acids: achievements and trends in the application and engineering of microbial strains. *Crit. Rev. Biotechnol*. 2022. Vol. 42. P. 342–360.
13. Castillo Martinez F.A., Balciunas E.M., Salgado J.M. Properties, application and production of lactic acid: review. *Trends. Food. Sci. Technol*. 2013. Vol. 30. P. 70–83.
14. Ramírez-López C.A., Ochoa-Gómez J.R., Fernández-Santos M. Synthesis of lactic acid by alkaline hydrothermal conversion of glycerol at high glycerol concentration. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2010. Vol. 49. P. 6270–6278.

15. Abdel-Rahman M.A.; Sonomoto K. Opportunities to overcome the current limitations and challenges for efficient microbial production of optically pure lactic acid. *J. Biotechnol.* 2016. Vol. 236. P. 176–192.
16. Mokhena T.C., Sefadi, J.S. Thermoplastic processing of PLA/cellulose nanomaterials composites. *Polymers.* 2018. Vol.10. P.1363–1374.
17. Abo B.O., Gao M., Wang Y. Lignocellulosic biomass for bioethanol: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation processes. *Rev. Environ. Health.* 2019. Vol. 34. P. 57–68.
18. Abbate E., Ragas A.M. J., Caldeira C. Operationalization of the safe and sustainable by design framework for chemicals and materials: challenges and proposed actions. *Integrated Environmental Assessment and Management.* 2025. Vol. 21, No 2. P. 245–262.

PRINCIPLES OF CIRCULAR ECONOMY IN LACTIC ACID PRODUCTION TECHNOLOGY: EXPERIENCE OF EU COUNTRIES AND POTENTIAL OF UKRAINE

Abstract

The circular economy increases the efficiency of resource use by closing the loop of material and energy resources throughout the product life cycle. This leads to a reduction in the amount of waste generated, an increase in the economic efficiency of production, an improvement in the social conditions of society and technological progress. The growing emphasis on sustainable production necessitates the development of effective waste reduction strategies in chemical production technologies, namely in the processing of lignin-containing waste in the practice of obtaining lactic acid. Lactic acid can be obtained by both chemical and biotechnological methods, each of which has advantages and disadvantages, but the key factor is that lactic acid can be obtained by recycling waste, which is an economically feasible solution while preserving natural resources.

Lactic acid can be produced from agricultural waste. This approach uses crop residues such as wheat straw and corn stover as raw materials for fermentation processes. With the help of various microorganisms, these carbon-rich organic wastes can be efficiently converted into lactic acid. As a result, not only can waste be reduced, but also an environmentally friendly alternative to traditional production methods can be formed. The lactic acid obtained from this process can be used in the production of biodegradable plastics, food additives and pharmaceuticals, thereby contributing to the development of a circular economy and the promotion of sustainable practices.

This research was conducted within the framework of an ongoing Jean Monnet grant: Waste Management in the Context of Transition to a Circular Economy: the EU Experience (101172378 — CIRCLEMAN — ERASMUS-JMO-2024-HEI-TCH-RSCH)).

References

- [1] Droege H., Raggi A., Ramos T. (2021). Overcoming Current Challenges for Circular Economy Assessment Implementation in Public Sector Organisations. *Sustainability.* 13(6). 1182–1197.
- [2] Yurgilevich A., Birge T., Kentala-Lehtonen J. (2016). Transition to a circular economy in the food system. *Sustainable Development.* 8(2). 69–75.
- [3] Stegmann P., Londo M., Junginger M. (2020). Circular bioeconomy: its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resour. Conserv. Recycling.* 6. 100–116.
- [4] Yankov D. (2022). Fermentative lactic acid production from lignocellulosic feedstocks: from source to purified product. *Front. Chem.* 10. 1–34.
- [5] Nowak-Marchewka K., Osmólska E., Stoma M. (2025). Progress and Challenges of Circular Economy in Selected EU Countries. *Sustainability ER.* 17(1). P. 320–331.
- [6] Nwamekwe Ch., Chidiebube I. (2025). Human-Robot Collaboration in Industrial Engineering: Enhancing Productivity and Safety. *Journal of Industrial Engineering & Management Research.* 6(5). 1–20.

- [7] Kwakye N. J. M., Esiri N. A. E. (2024). Circular economy practices in the oil and gas industry: a business perspective on sustainable resource management. *GSC Advanced Research and Reviews*. 20(3). P.267–285.
- [8] Rahman N., Ngaini Z., Farooq S. (2025). Sustainable lactic acid production from agricultural waste: a review of current techniques, challenges and future directions. *Bioresour Bioprocess*. 12(1). 81–92.
- [9] Nahla M. Salatein A.M. (2025). Lactic acid separation technologies: Enhancing efficiency and purity using membrane separation technology (mini review). *Results in Chemistry*. 15. 102–120.
- [10] Krishna B.S., Nikhilesh G.S.S. (2018). Industrial production of lactic acid and its applications. *Int. J. Biotechnol. Res.* 1. 42–54.
- [11] Aguirre-Garcia Y. L., Nery-Flores S.D., Campos-Muzquiz L.G. (2024). Lactic acid fermentation in the food industry and bio-preservation of food. *Fermentation*. 10(3). 168–181.
- [12] Augustiniene E., Valanciene E., Matulis P. (2022). Bioproduction of L- and D-lactic acids: achievements and trends in the application and engineering of microbial strains. *Crit. Rev. Biotechnol.* 42. 342–360.
- [13] Castillo Martinez F.A., Balciunas E.M., Salgado J.M. (2013). Properties, application and production of lactic acid: review. *Trends. Food. Sci. Technol.* 30. 70–83.
- [14] Ramírez-López C.A., Ochoa-Gómez J.R., Fernández-Santos M. (2010). Synthesis of lactic acid by alkaline hydrothermal conversion of glycerol at high glycerol concentration. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49. 6270–6278.
- [15] Abdel-Rahman M.A.; Sonomoto K. (2016). Opportunities to overcome the current limitations and challenges for efficient microbial production of optically pure lactic acid. *J. Biotechnol.* 236. 176–192.
- [16] Mokhena T.C., Sefadi, J.S. (2018). Thermoplastic processing of PLA/cellulose nanomaterials composites. *Polymers*. 10. 1363–1374.
- [17] Abo B.O., Gao M., Wang Y. (2019). Lignocellulosic biomass for bioethanol: an overview on pre-treatment, hydrolysis and fermentation processes. *Rev. Environ. Health.* 34. 57–68.
- [18] Abbate E., Ragas A.M. J., Caldeira C. (2025). Operationalization of the safe and sustainable by design framework for chemicals and materials: challenges and proposed actions. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 21(2). 245–262.

Надійшла до редколегії 06.02.2026

Прийнята після рецензування 24.02.2026

Опублікована 26.03.2026