

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.16

УДК 661.746.2

Гуляєв В.М.¹, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4991-6250, e-mail: vgulyaev@dnepro.net**Корнієнко І.М.**², к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-3872-0957,

e-mail: irina.kornienko.1979@gmail.com

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

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

Коваленко А.Л.¹, к.х.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1496-6634,

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

Анацький А.С.¹, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-5689-7660, e-mail: asanatsky@ukr.net**Філімоненко О.Ю.**¹, старший викладач, ORCID: 0000-0001-9343-960X,

e-mail: olga.filimonenko82@gmail.com

Корнієнко Ю.М.², здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,¹Дніпровський 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**Korniienko Iryna**², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of Biotechnology Department**Kuznietsova Olena**², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of Biotechnology Department**Kovalenko Alla**¹, Candidate of chemical sciences, Associate Professor of the Department of Chemical and Biological Technologies**Anatskyi Andrii**¹, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Chemical and Biological Technologies**Filimonenko Olha**¹, Senior lecturer of the Department of Chemical and Biological Technologies**Korniienko Yurii**², postgraduate student¹Dniprovsky State Technical University, Kamianske²State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv**ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ МОЛОЧНОЇ КИСЛОТИ ШЛЯХОМ КАТАЛІТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНИХ ВІДХОДІВ З УРАХУВАННЯМ ПРИНЦИПІВ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ**

Проведено оптимізацію хіміко-каталітичного перетворення лігноцелюлозних відходів у молочну кислоту, виконано порівняння хімічного та ферментативного каталізу з урахуванням принципів циркулярної економіки, які є важливими при проєктуванні будь-яких виробництв у країнах ЄС. Запропоновано проводити подрібнення лігноцелюлозних відходів на кульовому млині задля покращення процесу каталізу та скорочення часу перетворення. В якості каталізаторів досліджено оксиди металів — Al_2O_3 , Fe_3O_4 , ZrO_2 . Температура хіміко-каталітичного процесу становила 463 К.

Встановлено, що використання каталізатору, який містить 10 % ZrO_2 , дозволяє отримати вихід молочної кислоти 21,5 % при тривалості процесу 7 годин, у випадку 10 % Al_2O_3 при тій же тривалості перетворення вихід кислоти становить 16,5 %, при застосуванні Fe_3O_4 аналогічний показник мав значення 13,1 %.

Ключові слова: біомаса; органічні відходи; целюлоза; циркулярна економіка; молочна кислота; сталий розвиток; навколишнє середовище.

Optimization of the chemical-catalytic conversion of lignocellulosic waste into lactic acid was carried out, a comparison of chemical and enzymatic catalysis was made taking into account the prin-

ciples of circular economy, which are important when designing any production in the EU countries. It was proposed to grind lignocellulosic waste in a ball mill to improve the catalysis process and reduce the conversion time. Metal oxides — Al_2O_3 , Fe_3O_4 , ZrO_2 were investigated as catalysts. The temperature of the chemical-catalytic process was 463 K.

It was found that the use of a catalyst containing 10 % ZrO_2 allows obtaining a yield of lactic acid of 21,5 % with a process duration of 7 hours, in the case of 10 % Al_2O_3 with the same duration of the conversion, the acid yield is 16,5 %, when using Fe_3O_4 , the similar indicator was 13,1 %.

Keywords: biomass; organic waste; cellulose; circular economy; lactic acid; sustainable development; environment.

Постановка проблеми

Біомаса — це поновлюваний органічний ресурс, який містить компоненти, необхідні для виробництва багатьох промислово важливих речовин і палива. Лігноцелюлозні відходи — це рослинна біомаса, яка в основному складається з целюлози, геміцелюлози і лігніну. В сучасному світі целюлоза є найбільш перспективною сировиною не лише для хімічної промисловості, але й для біотехнологій, оскільки виступає основним компонентом лігноцелюлозної біомаси, яка може бути перетворена в органічні кислоти, зокрема, в молочну кислоту, біогаз тощо. Використання принципів циркулярної економіки в хімічній промисловості і біотехнологіях, як виробництва замкнутого циклу, має першорядне значення для сталого розвитку країн ЄС та України, оскільки наша країна перебуває на шляху євроінтеграції. Технології переробки/рециклінгу органічних відходів, в тому числі целюлози, в молочну кислоту потребують удосконалення з урахуванням сучасних тенденцій і вимог. Економіка замкнутого циклу зосереджена на безперервному використанні та переробці матеріалів, що мінімізують кількість відходів і вплив на навколишнє середовище. Виробництво молочної кислоти шляхом каталітичного перетворення целюлози передбачає переробку органічних відходів в готовий продукт, що знижує витрати первинних ресурсів та енергії і зменшує негативний вплив виробництва на стан довкілля. В Україні, на жаль, лігноцелюлозні відходи частіше піддаються спалюванню, що становить небезпеку для людей та природи.

На сьогодні молочна кислота користується широким попитом, оскільки застосовується в харчовій, косметичній, фармацевтичній і хімічній галузях промисловості. Також вона є важливим проміжним продуктом у виробництві пропіленгліколю, акрилової кислоти, полілактидів. Зазвичай молочну кислоту одержують шляхом ферментації вуглеводної сировини, однак через невисоку швидкість цього процесу він має значну тривалість. Крім того, існує необхідність постійного підтримання рН культуральної рідини в діапазоні 5—7 для оптимального розвитку молочнокислих бактерій, що ускладнює технологічний процес. Таким чином, хіміко-каталітична конверсія целюлози є привабливою альтернативою в практиці виробництва молочної кислоти. Актуальною задачею є вибір каталізатору для забезпечення максимального виходу кінцевого продукту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Провідним європейським інститутом відкритих інновацій у переробній промисловості вважається Institute for Sustainable Process Technology (ISPT). Його діяльність спрямована на перехід до CO_2 —нейтральної, циклічної економіки, реалізація якої має бути забезпечена до 2050 р. Згідно з даними ISPT, щороку велика кількість відходів целюлози спалюється. Це призводить до зайвих викидів CO_2 і втрати цінної речовини. Проєкт Advanced Carbohydrate Biorefinery (ACB) даного інституту передбачає розробку технологій та альтернативного шляху щодо перетворення відходів на нові продукти, в тому числі і на молочну кислоту з целюлозних відходів. Запропоновані проєктом ACB технології переробки целюлози дозволяють скоротити викиди CO_2 на 245 кілотонн на рік і до 2 мегатонн CO_2 на рік у разі масштабування розроблених технологій на національному рівні. Проєкт ACB об'єднує промисловість, науку і технології для перетворення відходів з високим вмістом целюлози на полімолочну кислоту (PLA) — стійкий біопластик з широким спектром застосування. Замість спалювання проєкт ACB забезпечує циклічне повторне використання і, як наслідок, скорочення викидів CO_2 , нові технології зі зниженою собівартістю продукту і масштабовані інновації в біоекономіці [1].

Приймаючи основи циклічності біоекономіки, целюлозні відходи і технологічні прийоми її переробки сприяють більш ефективному використанню ресурсів, знижуючи свій карбоновий слід, що відповідає глобальним цілям сталого розвитку країн ЄС, сприяє більш стійкій та екологічній моделі виробництва [2].

Розробка нових технологій для перетворення сполук на основі біомаси в джерела енергії та промислово важливі хімічні речовини актуальна для біоекономіки. У роботі [3] авторами розроблено унікальну систему каталізу на основі сонячної енергії для перетворення целюлози на молочну кислоту з використанням модифікованого мідного каталізатору. Оскільки масове співвідношення Cu перевищує 6 % за вагою, додаткові квантові точки Cu_2O збираються на поверхні та утворюють гетероструктуру $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}-\text{Pal}$, що ефективно сприяє перенесенню заряду та оголює рясні центри кислот Льюїса для синергетичної адсорбції і перетворення проміжних продуктів. Зокрема, колоїдний характер субстрату $\text{Cu}-\text{Pal}$ забезпечує активну адсорбцію катенольованої целюлози. Наноккомпозит 10 % за вагою $\text{Cu}_2\text{O QDs}/\text{Cu}-\text{Pal}$ демонструє високу фотокаталітичну селективність молочної кислоти у видимому діапазоні світла.

Через зростаючі екологічні проблеми, пов'язані з управлінням відходами у роботі [4] автори зосереджені на використанні моделі економіки замкненого циклу для виробництва композитів на основі наноцелюлози. Модель економіки замкненого циклу пропонує стійке розв'язання проблеми завдяки оптимізації ефективності використання ресурсів і управління відходами завдяки скороченню їх кількості, підтримці цінності з плином часу, мінімізації використання первинних ресурсів і створенню замкнених циклів для компонентів матеріалів і товарів. При використанні моделі економіки замкненого циклу відходи (промислові, сільськогосподарські, текстильні) повторно використовуються для виробництва нових продуктів. Зокрема, у роботі [4] окреслено застосування ідеї економіки замкненого циклу з акцентом на композити, виготовлені на основі наноцелюлози.

Авторами [5] оптимізовано виробництво молочної кислоти з целюлозних відходів — кукурудзяної соломи з використанням каталізаторів на основі кислот Льюїса. Спочатку в якості каталітичної системи використовували еквімолярну суміш $\text{Al(III)}/\text{Sn(II)}$ при $190\text{ }^\circ\text{C}$ з 5 % мас. біомаси. Збільшення концентрації каталізатору до 16 мМ призвело до збільшення виходу молочної кислоти. При менших концентраціях каталізатору утворювався переважно фурфурол та інші продукти дегідратації вуглеводів кукурудзяної соломи. Підвищення концентрації каталізатору понад 16 мМ спричинювало деградацію продуктів дегідратації глюкози на левулінову і мурашину кислоти, знижуючи селективність процесу по молочній кислоті. При цьому встановлено, що Al(III) необхідний для утворення молочної кислоти, тоді як Sn(II) виявився менш ефективним через його нижчу розчинність, що показано присутністю Sn(II) у твердому залишку після обробок. В цілому, при концентрації 16 мМ Al(III) і температурі $190\text{ }^\circ\text{C}$ досягнуто концентрацію молочної кислоти 7,4 г/л і вихід 20,7 %. Підвищення температури до $210\text{ }^\circ\text{C}$ прискорило утворення молочної кислоти, дозволило скоротити споживання енергії, яке становило 0,47 кВт-год/г молочної кислотив в точці її найвищого виходу. Разом з тим, більш тривала обробка при цій температурі викликала деградацію молочної кислоти. Авторами дослідження визнано AlCl_3 як кращий каталізатор для перетворення целюлозної біомаси на молочну кислоту, в тому числі через його невисоку вартість і відсутність токсичності.

Науковцями [6] рекомендовано до використання сульфований каталізатор KIT-6, легований Sn, приготований методом гідротермального самоспікання, і досліджено його ефективність щодо виробництва молочної кислоти при конверсії поновлюваної целюлози. Фізико-хімічні властивості приготованих каталізаторів детально охарактеризовані різними методами, в тому числі XRD, BET, SEM, FT-IR, XPS, UV-vis та TGA-DSC. Результати підтвердили високу площу поверхні каталізатору з надвисокою зшитою структурою і багатообіцяючу кислотну силу (співіснування кислот Бренстеда і Льюїса). Крім того, визначено вплив умов проведення реакції (тип каталізатору, температура, час) на конверсію целюлози і вихід цільової молочної кислоти. Розроблений каталізатор продемонстрував високу активність і стабільність в оптимальних умовах реакції. Його можна використовувати не менше чотирьох разів без будь-якої очевидної дезактивації. Це дає уявлення про створення ефективних каталітичних систем для перетворення відновлюваної біомаси на хімічні речовини з доданою вартістю.

Також досліджено кілька гомогенних каталізаторів (PbCl_2 і ErCl_3) на предмет їхньої придатності для перетворення целюлози на молочну кислоту [7–8]. Ці каталізатори забезпечують високий вихід молочної кислоти, однак їхнє використання в промисловості залишається нереалізованим через складне відокремлення продуктів від каталізатора, а також низькі стабільність і придатність до вторинної переробки. Саме тому більш доцільними є гетерогенні каталізатори для перетворення целюлози на молочну кислоту, оскільки продукти можна легко відокремити від цього типу каталізаторів. Виявлено, що такі гетерогенні каталізатори як LaCoO_3 , $\text{NbF}_5\text{--AlF}_3$, забезпечили вихід молочної кислоти 24 % та 28 % відповідно [8–10]. Основним недоліком цих каталізаторів є вилуговування в розчин під час проведення реакції конверсії. Крім того, вони відносно дорогі, що ускладнює їхнє промислове використання. Раніше повідомлено про каталізатор ZrO_2 для перетворення целюлози на молочну кислоту (вихід 21,2 %), який не вилуговував іони металу в реакційний розчин [11–12].

У роботі [13] наведено опис селективного гідротермального перетворення целюлози і простих вуглеводів в молочну кислоту в м'яких умовах реакції в присутності ErCl_3 , іммобілізованого на поверхню мезопористого кремнезему (МСМ-41). Високий вихід і селективність отримані під впливом мікрохвильового (МВ) випромінювання при температурі 200 °С та короткій тривалості реакції (10 хв). Також досліджено попередню обробку ультразвуком (УЗ) для зниження кристалічності целюлози перед перетворенням за допомогою МВ, що забезпечило вихід молочної кислоти 64 % упродовж 90 хв при температурі на 220 °С нижче умов субкритичної води з підвищеною експлуатаційною безпекою.

Таким чином, хіміко-каталітичне перетворення целюлози активно досліджується як стійка альтернатива для виробництва молочної кислоти, хоча її селективне перетворення залишається поки що складною проблемою. Целюлоза має міцну структуру, що вимагає жорстких робочих умов процесу конверсії з точки зору температур і тисків для її активації, солюбілізації і розкладання у воді. Гідротермальний розклад з використанням мікрохвильового нагрівання може бути застосований також для лігноцелюлозних матеріалів. Якщо гідротермальний розклад целюлози за допомогою МВ виконується без будь-якого каталізатору, необхідні температури вище 240 °С для активації декристалізації, деполімеризації і гідролізу целюлози, в той час як аморфна частина целюлози реагує при нижчих температурах [14].

Враховуючи наявність невирішених питань, пов'язаних з розробкою технологій рециклінгу целюлозних відходів у молочну кислоту для умов України з урахуванням принципів циркулярної економіки, в даній статті представлено результати досліджень щодо використання економічно обґрунтованих каталізаторів — Al_2O_3 , Fe_3O_4 і ZrO_2 в технології хіміко-каталітичного перетворення целюлози в молочну кислоту.

Формування мети дослідження

Мета роботи — удосконалення технології каталітичної обробки лігноцелюлозних відходів в молочну кислоту.

Об'єкт дослідження — процес каталітичної обробки целюлози з використанням гетерогенних каталізаторів.

Предмет дослідження — вплив природи каталізатору на вихід молочної кислоти.

Методи дослідження — фізико-хімічні, аналітичні.

Завдання дослідження — визначити вид і кількість каталізатору, який забезпечує найбільший вихід молочної кислоти в реакції конверсії целюлози.

Виклад основного матеріалу

Дане дослідження проведено 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)).

З метою збільшення ступеню конверсії целюлози запропоновано здійснювати попередню обробку лігноцелюлозних відходів на кульовому млині зі швидкістю обертання 45 об/хв. Попередні дослідження свідчать, що відсутність етапу попереднього подрібнення відходів целюлози значно знижує вихід молочної кислоти (до 7 %), а також відбувається уповільнення процесу каталізу до 9 годин.

В якості досліджуваних каталізаторів обрано економічно доцільні оксиди алюмінію, феруму і цирконію — Al_2O_3 , Fe_3O_4 , ZrO_2 . Каталізатори не піддавалися попередній обробці. Перетворення целюлози на молочну кислоту проводили в реакторі періодичної дії з неіржавої сталі з внутрішнім об'ємом $50,0 \text{ см}^3$. В реактор, оснащений шнековою мішалкою, завантажували подрібнену в кульовому млині целюлозу (25 г), каталізатори — окремо кожен в залежності від кількості лігноцелюлозного відходу (3, 5, 10 і 20 %), і воду (25 мл); суміш продували газоподібним азотом (тиск 0,1 МПа). Реакційну масу нагрівали до температури 465 К, тривалість гідролізу становила 7 год. По закінченню процесу каталітичної обробки отриману суміш фільтрували для відділення рідини від твердої фракції. Кількісний аналіз молочної кислоти, левулінової кислоти, 5-гідроксиметилфурфуролу і фурфуролу в рідинній фракції проводили за допомогою газового хроматографа, оснащеного полум'яно-іонізаційним детектором і капілярною колонкою.

Контрольним зразком слугувала наважка лігноцелюлозних відходів, попередньо подрібнена у кульовому млині, яку обробляли в реакторі без додавання каталізатору.

Результати досліджень щодо виходу молочної кислоти за умови додавання каталізаторів Al_2O_3 , Fe_3O_4 , ZrO_2 у кількості 3, 5, 10 і 20 % представлено на рис. 1.

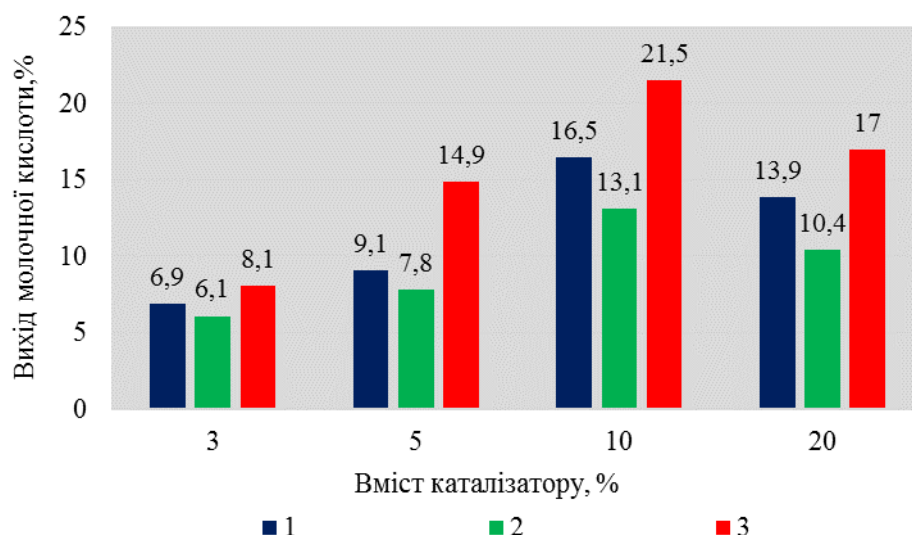


Рис. 1. Вихід молочної кислоти в умовах хіміко-каталітичної конверсії лігноцелюлозних відходів: 1 — Al_2O_3 ; 2 — Fe_3O_4 ; 3 — ZrO_2

Як видно з наведених даних, вихід молочної кислоти, одержаний з використанням каталізаторів у кількості 10 % є вищим за аналогічний показник при концентраціях 3, 5 та 20 % відповідно. Встановлено, що використання ZrO_2 у кількості 10 % в каталітичному перетворенні целюлози забезпечує вихід молочної кислоти 21,5 % при тривалості процесу 7 год, дещо менший вихід кінцевого продукту досягнуто при використанні Al_2O_3 — 16,5 %. Найнижче значення виходу молочної кислоти отримано у випадку використання в якості каталізатору Fe_3O_4 — 13,1 %.

Згідно даних хроматографічних досліджень, вміст левулінової кислоти, 5-гідроксиметилфурфуролу і фурфуролу в рідинній фазі реакційної суміші при використанні будь-якого каталізатору не залежно від його вмісту не перевищував 2,5 %, що є цілком прийнятним.

Перетворення целюлози на молочну кислоту є багатоступінчастим процесом (рис. 2). Спочатку целюлоза перетворюється на глюкозу шляхом гідролізу в присутності кислотного каталізатору. Отримана таким чином глюкоза в наступній реакції ізомеризується у фруктозу під впливом кислот Льюїса або основних каталізаторів. Ключовим етапом шляху перетворення целюлози в молочну кислоту є розклад фруктози на гліцеральдегід і дигідроксиацетон в ретроальдольній реакції, що включає розрив зв'язку C—C, який може бути посилений кислотами Льюїса. Поєднання кислотних та основних ділянок на каталізаторах посилює перетворення фруктози на зазначені продукти. Цим пояснюється, що каталізатори Al_2O_3 , Fe_3O_4 , ZrO_2 забезпечують більш високий вихід молочної кислоти порівняно з контролем (без каталізатору). Слід

зазначити, хоча кислотні центри на каталізаторах ZrO_2 та Al_2O_3 відігравали важливу роль у перетворенні, вихід отриманої молочної кислоти не був пропорційний їх кількості. Це свідчить, що дисперсність ZrO_2 і Al_2O_3 забезпечувала доступність кислотних центрів на каталізаторі і є важливим чинником перетворення целюлози на молочну кислоту у випадку використання вказаних каталізаторів.

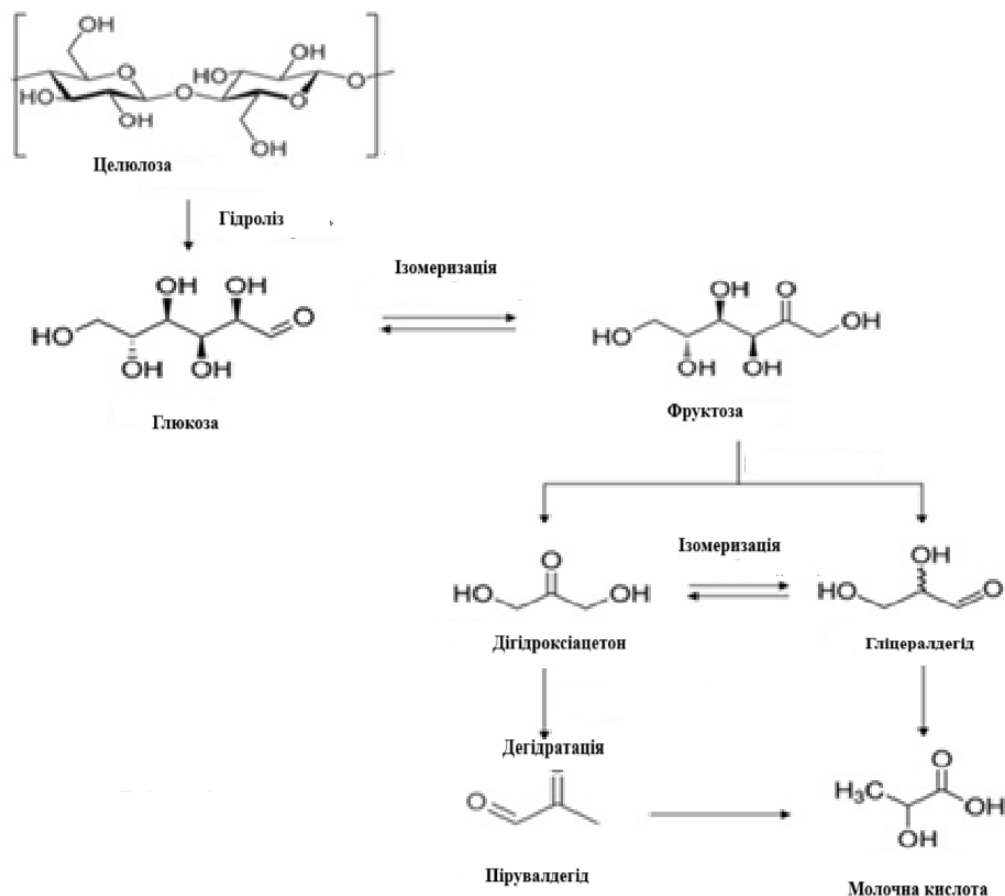


Рис. 2. Реакційний шлях перетворення целюлози на молочну кислоту

На останньому етапі хіміко-каталітичного процесу гліцеральдегід і дигідроксиацетон перетворюються на молочну кислоту при температурі 463 К.

Висновки

Враховуючи шлях України до євроінтеграції і принципи циркулярної економіки, які діють в країнах ЄС відносно будь-яких виробництв, важливо скорочувати викиди парникових газів через спалювання целюлозних органічних відходів. Для декарбонізації економіки запропоновано технологію переробки органічних відходів у молочну кислоту. Хіміко-каталітичне перетворення целюлози можна вважати стійкою альтернативою, хоча існують проблеми щодо оптимізації температурного режиму процесу. Целюлоза має непіддатливу природу, вимагаючи жорстких робочих умов з точки зору температур і тисків для активації процесу її розкладу. Перетворення целюлози в молочну кислоту краще відбувається за умови додавання каталізатору ZrO_2 в кількості 10 %, при цьому вихід молочної кислоти становить 21,5 % при 7 годинах каталізу за умови підтримки температури, що відповідає 463 К.

Список використаної літератури

1. Institute for Sustainable Process Technology. Advanced Carbohydrates Biorefinery: From Waste to Value. URL: <https://ispt.eu/projects/advanced-carbohydrates-biorefinery-from-waste-to-value/> (дата звернення: 06.05.2025).
2. Khaksar Y. Modeling the Circular Economy in Cellulose Synthesis from Recycled Materials: A Novel Construction Management Approach. *Environmental Industry Letters*. 2024. Vol. 2, No 1. P. 30–43.
3. Zhong M., Li X. Solar driven catalytic conversion of cellulose biomass into lactic acid over copper reconstructed natural mineral. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2022. Vol. 317. P. 1217–1218.
4. Azka M., Adam A., Ridzuan S.M. A review on the enhancement of circular economy aspects focusing on nanocellulose composites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 269, No 1. P. 1320–1352.
5. Candela H., Illera A., Barea P. The Study and Optimization of the $\text{AlCl}_3/\text{SnCl}_2$ Catalyst System in the Subcritical Water Production of Lactic Acid from Corn Stover. *Catalysts*. 2025. Vol. 15, No 6. P. 539.
6. Wang G., Tan X., Ly H. Highly Selective Conversion of Cellobiose and Cellulose to Hexitols by Ru-Based Homogeneous Catalyst under Acidic Condition. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016. Vol. 55, No 18. P. 5263–5270.
7. Lei X., Wang F.-F., Liu C.-L., Yang R.-Z. One-pot catalytic conversion of carbohydrate biomass to lactic acid using an ErCl_3 catalyst. *Appl. Catal. A*. 2014. Vol. 482. P.78–83.
8. Yang X., Yang L., Fan W., Lin H. Effect of redox properties of LaCoO_3 perovskite catalyst on production of lactic acid from cellulosic biomass. *Catal. Today*. 2016. Vol. 269. P.56–64.
9. Coman S.M., Verziu M., Tirsoaga A. $\text{NbF}_5\text{--AlF}_3$ Catalysts: Design, Synthesis, and Application in Lactic Acid Synthesis from Cellulose. *ACS Catal.* 2015. Vol.5. P. 3013–3026.
10. Chambon F., Rataboul F., Pinel C., Cabiac A. Cellulose hydrothermal conversion promoted by heterogeneous Brønsted and Lewis acids: Remarkable efficiency of solid Lewis acids to produce lactic acid. *Appl. Catal. B*. 2011, Vol. 105. P. 171–181.
11. Wattanapaphawong P., Reubroycharoen P., Yamaguchi A. Conversion of cellulose into lactic acid using zirconium oxide catalysts. *RSC Adv*. 2017. Vol. 7. P. 18561–18568.
12. Teramoto Y., Tanaka N., Lee S.-H., Endo T. Pretreatment of eucalyptus wood chips for enzymatic saccharification using combined sulfuric acid-free ethanol cooking and ball milling. *Biotechnol. Bioeng.* 2008. Vol. 99. P. 75–85.
13. Wang S., Cheng A., Liu F., Zeng X. Catalytic conversion network for lignocellulosic biomass valorization: a panoramic view, *Industrial Chemistry & Materials*. 2023. Vol. 1, No 2. P. 188–206.
14. Guo M., Chengfeng Zh. Sustainable Production of Lactic Acid from Cellulose Using Au/W-ZnO Catalysts. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No 21. P. 4235.

TECHNOLOGY FOR OBTAINING LACTIC ACID BY CATALYTIC CONVERSION OF LIGNOCELLULOUS WASTE TAKING INTO ACCOUNT THE PRINCIPLES OF CIRCULAR ECONOMY

Abstract

Considering Ukraine's path to European integration and the principles of the circular economy that apply in EU countries to any production, it is important to reduce greenhouse gas emissions through the combustion of cellulosic organic waste. To decarbonize the economy, a technology for processing organic waste into lactic acid has been proposed.

The purpose of the work is to improve the technology of catalytic processing of lignocellulosic waste into lactic acid. The object of the study is the process of catalytic processing of cellulose using heterogeneous catalysts. The subject of the study is the influence of the nature of the catalyst on the yield of lactic acid. The research methods are physicochemical, analytical. The task of the study is to

determine the type and amount of catalyst that provides the highest yield of lactic acid in the cellulose conversion reaction.

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)).

It was found that the use of a catalyst containing 10% ZrO_2 allows obtaining a yield of lactic acid of 21,5 % with a process duration of 7 hours, in the case of 10 % Al_2O_3 with the same duration of the conversion, the acid yield is 16,5 %, when using Fe_3O_4 , the similar indicator was 13,1 %.

References

- [1] Institute for Sustainable Process Technology. Advanced Carbohydrates Biorefinery: From Waste to Value. URL: <https://ispt.eu/projects/advanced-carbohydrates-biorefinery-from-waste-to-value/>.
- [2] Khaksar Y. (2024). Modeling the Circular Economy in Cellulose Synthesis from Recycled Materials: A Novel Construction Management Approach. *Environmental Industry Letters*. 2(1). P. 30–43.
- [3] Zhong M., Li X. (2022). Solar driven catalytic conversion of cellulose biomass into lactic acid over copper reconstructed natural mineral. *Applied Catalysis B: Environmental*. 317. P. 1217–1218.
- [4] Azka M., Adam A., Ridzuan S.M. (2024). A review on the enhancement of circular economy aspects focusing on nanocellulose composites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 269(1). P. 1320–1352.
- [5] Candela H., Illera A., Barea P. (2025). The Study and Optimization of the $\text{AlCl}_3/\text{SnCl}_2$ Catalyst System in the Subcritical Water Production of Lactic Acid from Corn Stover. *Catalysts*. 15(6). P. 539.
- [6] Wang G., Tan X., Ly H. (2016). Highly Selective Conversion of Cellobiose and Cellulose to Hexitols by Ru-Based Homogeneous Catalyst under Acidic Condition. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 55(18). P. 5263–5270.
- [7] Lei X., Wang F.-F., Liu C.-L., Yang R.-Z. (2014). One-pot catalytic conversion of carbohydrate biomass to lactic acid using an ErCl_3 catalyst. *Appl. Catal. A*. 482. P. 78–83.
- [8] Yang X., Yang L., Fan W., Lin H. (2016). Effect of redox properties of LaCoO_3 perovskite catalyst on production of lactic acid from cellulosic biomass. *Catal. Today*. 269. P.56–64.
- [9] Coman S.M., Verziu M., Tirsoaga A. (2015). $\text{NbF}_5\text{--AlF}_3$ Catalysts: Design, Synthesis, and Application in Lactic Acid Synthesis from Cellulose. *ACS Catal.* 5. P. 3013–3026.
- [10] Chambon F., Rataboul F., Pinel C., Cabioc A. (2011). Cellulose hydrothermal conversion promoted by heterogeneous Brønsted and Lewis acids: Remarkable efficiency of solid Lewis acids to produce lactic acid. *Appl. Catal. B*. 105. P. 171–181.
- [11] Wattanapaphawong P., Reubroycharoen P., Yamaguchi A. (2017). Conversion of cellulose into lactic acid using zirconium oxide catalysts. *RSC Adv.* 7. P. 18561–18568.
- [12] Teramoto Y., Tanaka N., Lee S.-H., Endo T. (2008). Pretreatment of eucalyptus wood chips for enzymatic saccharification using combined sulfuric acid-free ethanol cooking and ball milling. *Biotechnol. Bioeng.* 99. P. 75–85.
- [13] Wang S., Cheng A., Liu F., Zeng X. (2023). Catalytic conversion network for lignocellulosic biomass valorization: a panoramic view, *Industrial Chemistry & Materials*. 1(2). P. 188–206.
- [14] Guo M., Chengfeng Zh. (2023). Sustainable Production of Lactic Acid from Cellulose Using Au/W-ZnO Catalysts. *Polymers*. 15(21). P. 4235.

Надійшла до редколегії 19.08.2025

Прийнята після рецензування 14.10.2025

Опублікована 23.10.2025