

БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.45.2024.23

УДК 661.746.2

Корнієнко І.М.¹, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-3872-0957,

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

Гуляєв В.М.², д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4991-6250, e-mail: vgulyaev@dnepro.net

Анацький А.С.², к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-5689-7660, e-mail: asanatsky@ukr.net

Коваленко А.Л.², к.х.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1496-6634,

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

Філімоненко О.Ю.², старший викладач, ORCID: 0000-0001-9343-960X,

e-mail: olga.filimonenko82@gmail.com

Корнієнко Ю.М.², здобувач третього (доктор філософії) рівня,

e-mail: kornijenko0327@gmail.com

¹Національний авіаційний університет, м. Київ

²Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Korniienko Iryna, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of Biotechnology Department

Gulyaev Vitalii, Doctor of engineering sciences, Professor of the Department of Chemical

and Biological Technologies, rector

Anatskyi Andrii, Candidate of engineering sciences, Associate Professor of the Department of

Chemical and Biological Technologies

Kovalenko Alla, Candidate of chemical sciences, Associate Professor of the Department of Chemical and Biological Technologies

Filimonenko Olga, Senior lecturer of the Department of Chemical and Biological Technologies

Korniienko Yurii, postgraduate student

¹National Aviation University, Kyiv

²Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ХЕМОКАТАЛІТИЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНОЇ СИРОВИНИ В МОЛОЧНУ КИСЛОТУ

Пряме перетворення целюлози, яка є основним компонентом лігноцелюлозної біомаси, на складові хімічні речовини є ключем до створення стійких хімічних процесів, зокрема, синтезу молочної кислоти. Досліджено хемокаталітичне перетворення целюлози у воді в присутності іонів плюмбуму (II) в молочну кислоту, яка є цінною хімічною речовиною, що використовується для виробництва біорозкладних пластмас. Вихід молочної кислоти з мікрокристалічної целюлози та деяких видів лігноцелюлозної біомаси становить понад 60 % при температурі 463 К. Теоретичні та експериментальні дослідження свідчать, що плюмбум (II) у поєднанні з водою каталізує низку каскадних етапів утворення молочної кислоти, включаючи ізомеризацію глюкози, що утворюється при гідролізі целюлози, у фруктозу, селективне розщеплення зв'язку C₃-C₄ фруктози до тріози та селективне перетворення тріози в молочну кислоту.

Ключові слова: молочна кислота; каталіз; селективність; хемосинтез; целюлоза.

The direct conversion of cellulose, which is the main component of lignocellulosic biomass, into constituent chemicals is the key to creating sustainable chemical processes, in particular, the synthesis of lactic acid. The chemocatalytic conversion of cellulose in water in the presence of lead (II) ions into lactic acid, which is a valuable chemical substance used for the production of biodegradable plastics, was studied. The yield of lactic acid from microcrystalline cellulose and some types of lignocellulosic biomass is more than 60 % at a temperature of 463 K. Theoretical and experimental studies show that

lead (II) in combination with water catalyzes a number of cascade stages of lactic acid formation, including the isomerization of glucose formed at hydrolysis of cellulose into fructose, selective cleavage of the C₃-C₄ bond of fructose to triose and selective conversion of triose into lactic acid.

Keywords: lactic acid; catalysis; selectivity; chemosynthesis; cellulose.

Постановка проблеми

У країнах Західної Європи, Північної Америки, Японії значна увага приділяється проблемі створення композицій і технології отримання біорозкладальних полімерів, які активно починають завойовувати споживчі ринки. Збільшення потреби в біорозкладальній тарі та упаковці в першу чергу пов'язане з невідновлюваним використанням світових запасів нафтопродуктів, які є основною сировиною для синтетичних полімерів, а також з щорічним зростанням обсягів твердих побутових відходів. Одним з найбільш перспективних біодеградабельних пластиків є полілактиди — полімери молочної кислоти, які в умовах природної біодеструкції мають термін розкладу кілька місяців.

Перспектива використання матеріалів на основі молочної кислоти визначається можливістю її отримання біоконверсією рослинної біомаси, тобто на основі відновлюваних джерел сировини. Подібні технології дозволяють зменшити антропогенне навантаження на навколишнє середовище за рахунок зниження енергоємності технологічного процесу, утилізації вторинних ресурсів переробки сировини, використання біорозкладальних матеріалів на основі молочної кислоти. На сьогодні чисельні дослідження вітчизняних і закордонних вчених спрямовані на вдосконалення методів синтезу молочної кислоти з метою покращення техніко-економічних показників її виробництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Молочна кислота є промислово важливим продуктом з великим і швидко зростаючим ринком споживання. Світовий попит на молочну кислоту оцінюється в 130—150 тис. тон на рік [1]. На сьогодні її використовують в хімічному синтезі низки промислово важливих сполук: гідруванням з неї можна отримати пропіленоксид, відновленням — пропанову кислоту, шляхом самоестерифікації—ділактид, декарбоксилуванням — ацетальдегід, дегідруванням — акрилову кислоту, конденсацією — 2,3-пентандіон [2].

Молочна кислота знаходить чисельні застосування в промисловості, а саме [3—5]: в харчовій галузі — при виробництві кондитерських виробів, безалкогольних напоїв, пива, хліба і борошняних виробів, продуктів переробки плодів та овочів; в хімічній — для виробництва нейтралізаторів, хіральнихінтермедіатів, засобів проти окаліни, регуляторів кислотності, розчинників, засобів чищення, комплексоутворювальних агентів, біопластиків; в косметичній — як складовий компонент зволожувачів, засобів для омолодження та освітлення шкіри, засобів проти акне і зубного каменю; в фармацевтичній — при отриманні діалізних розчинів, мінеральних препаратів, розчинів для парентерального живлення, хірургічних нитей, систем контрольованої доставки лікарських препаратів. Молочну кислоту використовують в сільському господарстві для зниження захворюваності і підвищення продуктивності тварин і птахів.

Починаючи з 1981 р. молочну кислоту в промисловості виробляють двома способами — хімічним і мікробіологічним. Хімічний спосіб заснований на каталітичному синтезі з ацетальдегіду, чадного газу і води на силікагелі при нагріванні і високому тиску (200°C, 20 МПа) [6] або з використанням лактонітрилу, який є побічним продуктом у виробництві акрилонітрилу і утворюється при додаванні синильної кислоти до ацетальдегіду в присутності каталізатора [7]. Молочну кислоту також отримують окисленням пропену нітроген оксидами при 15—20°C з наступною обробкою сульфатною кислотою[8].

Близько половини світового обсягу виробництва молочної кислоти здійснюється мікробіологічним способом, заснованим на зброджуванні цукровмісних субстратів — кристалічна сахароза, меляса, рафінадна патока, цукровий сироп та ін. Продукт, отримуваний шляхом бродіння, містить до 99,5 % L-ізомеру і 0,5 % D-ізомеру. Відносно висока вартість цукровмісної сировини, необхідність її попередньої обробки та оцукрювання фізико-хімічними і ферментативними методами є основними перешкодами для організації рентабельного виробництва молочної кислоти. В зв'язку з цим актуальною задачею є пошук і розробка дешевих джерел сиро-

вини для отримання молочної кислоти, якими можуть слугувати, зокрема, відходи переробної промисловості.

Лігноцелюлозна біомаса є перспективною сировиною не тільки для енергетики і паливної промисловості, але й для виробництва затребуваних хімічних речовин, зокрема, молочної кислоти. Основним компонентом лігноцелюлозної біомаси є целюлоза, вміст якої може досягати 60 %. На сьогодні запропоновані різні підходи отримання органічних речовин з целюлози в присутності різних типів каталізаторів (хімічних і біологічних) [9]. Кислотний гідроліз у водному середовищі є найбільш поширеним в промисловості завдяки низькій вартості розчинника, а також високій швидкості процесу гідролізу [10]. Однак використання розчинів кислот для гідролізу призводить до зменшення терміну експлуатації технологічного обладнання внаслідок корозії, призводить до утворення значної кількості екологічно небезпечних відходів і викликає труднощі у відділенні каталізатору від реакційної маси. В зв'язку з цим потрібний пошук нових та ефективних каталізаторів, які не мають недоліків, властивих розчинам кислот.

Формування мети дослідження

Метою роботи є дослідження процесу хемокаталітичного гідролізу целюлози та лігноцелюлозних матеріалів в молочну кислоту з використанням в якості каталізатору плюмбум (II) нітрату.

Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень використовували мікрочисту целюлозу, D-глюкозу, D-фруктозу та плюмбум (II) нітрат. Ступінь чистоти реагентів становив 99,0—99,5 %. Целюлозу розмелювали на настільному планетарному кульовому млині SFM-1 при 60 об/хв.

Хемокаталітичне перетворення целюлози, гексозних і тріозних проміжних продуктів здійснювали в лабораторному реакторі періодичної дії, виготовленому з нержавіючої сталі і з тефлоновим покриттям. Реактор попередньо заповнювали водою, потім додавали порошкоподібну целюлозу і плюмбум (II) нітрат в якості каталізатору. Після введення N_2 під тиском 3 МПа, реактор нагрівали до досягнення температури в системі 463 К та ініціювали реакцію за рахунок перемішування реакційної суміші при 100 об/хв. Через певний час реакцію припиняли шляхом швидкого охолодження реактора до кімнатної температури холодною водою. Аналіз реакційної суміші здійснювали методом високоефективної рідинної хроматографії.

Виявлено, що целюлозу можна безпосередньо перетворити на молочну кислоту в гарячій воді в присутності $Pb(NO_3)_2$. Вихід молочної кислоти 68% досягнутий при концентрації каталізатору 7 ммоль/дм³ через 4 години при 463 К. Також підтверджено утворення глюкози, фруктози, гліколевої і левулінової кислот з виходами на рівні 38—43 %.

За відсутності іонів Pb^{2+} целюлоза також може бути гідролізована водою при 463 К з утворенням глюкози і гідроксиметилфурфуролу (ГМФ) як основних продуктів. Молочна кислота в таких умовах не утворюється. Можна припустити, що іони H_3O^+ , які обернено генеруються в гарячій воді завдяки збільшенню константи її іонізації при вищих температурах, здатні каталізувати гідроліз целюлози до глюкози. ГМФ може утворюватися при дегідратації фруктози, яка є ізомером глюкози.

Запропонована каталітична система може бути використана для перетворення інших рослинних субстратів, таких як крохмаль та інулін — природні полісахариди, що містять глюкозу і фруктозу, а також лігноцелюлозних матеріалів (меляса, пирій, висівки). Зокрема, встановлено, що вихід молочної кислоти з крохмалю та інуліну становив відповідно 68 і 73% після двох годин реакції при 463 К, з меляси — 66%. Крім того, нами проведено виділення та відновлення іонів Pb^{2+} з реакційної системи з використанням катіонообмінної смоли AmberliteIR-120, що дозволяє регенерувати каталітичну систему і використовувати її багаторазово.

Для того, щоб мати уявлення про механізм реакції хемокаталітичного перетворення целюлози, ми провели перетворення глюкози та фруктози, які є двома моносахаридними проміжними продуктами в даній реакції. За відсутності $Pb(II)$ основним продуктом в обох випадках був ГМФ (рис. 1, а). Присутність $Pb(II)$ збільшувала конверсію глюкози і фруктози, особливо за нижчих температур ($T \leq 433$ К), і змінювала основний продукт з ГМФ на молочну кислоту (рис. 1, б, г). Вихід молочної кислоти становив 71 % і 74 % для перетворень глюкози і фруктози при 443 і 463 К відповідно. $Pb(II)$ також посилював перетворення глюкози на фруктозу при

$T \leq 433$ K (рис. 1, б). Детальний аналіз перебігу перетворення глюкози при 423 K в присутності Pb(II) показав, що фруктоза є проміжним продуктом для перетворення глюкози на молочну кислоту. Отримані результати свідчать, що реакція відбувається за шляхами, наведеними на рис. 2. Pb(II) каталізує як ізомеризацію глюкози до фруктози, так і перетворення фруктози до молочної кислоти.

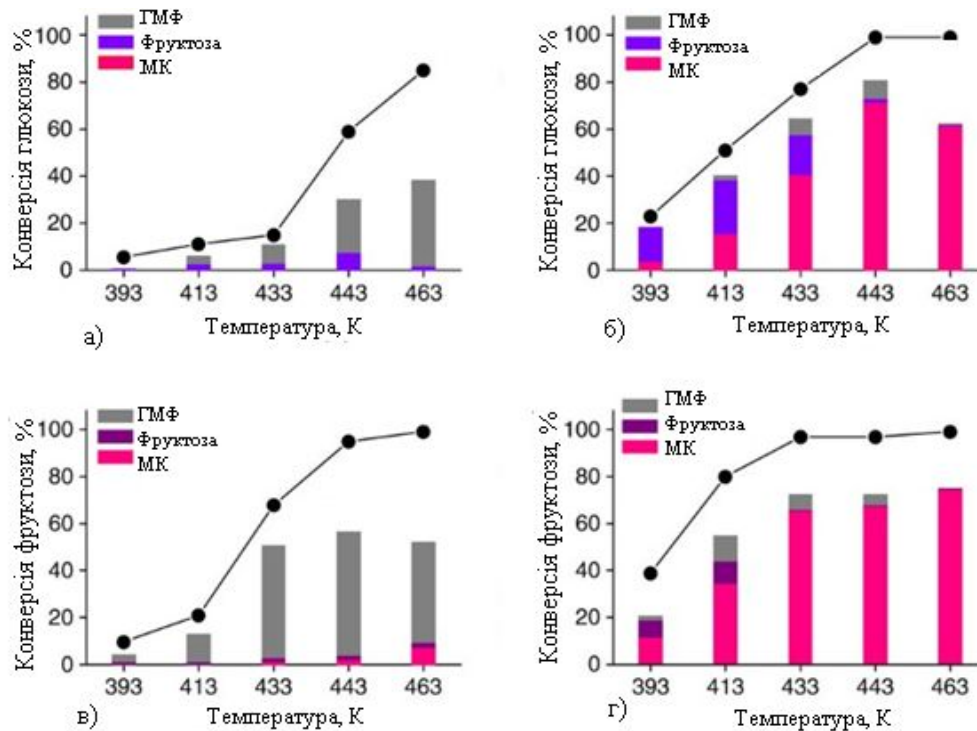


Рис. 1. Перетворення глюкози та фруктози: а — перетворення глюкози за відсутності Pb(II); б — перетворення глюкози в присутності Pb(II); в — перетворення фруктози за відсутності Pb(II); г — перетворення фруктози в присутності Pb(II). Умови реакції: Pb(II) — 0,14 ммоль; глюкоза — 0,51 ммоль; фруктоза — 0,56 ммоль; H₂O — 20 мл; N₂, 3 МПа; час реакції — 2 год

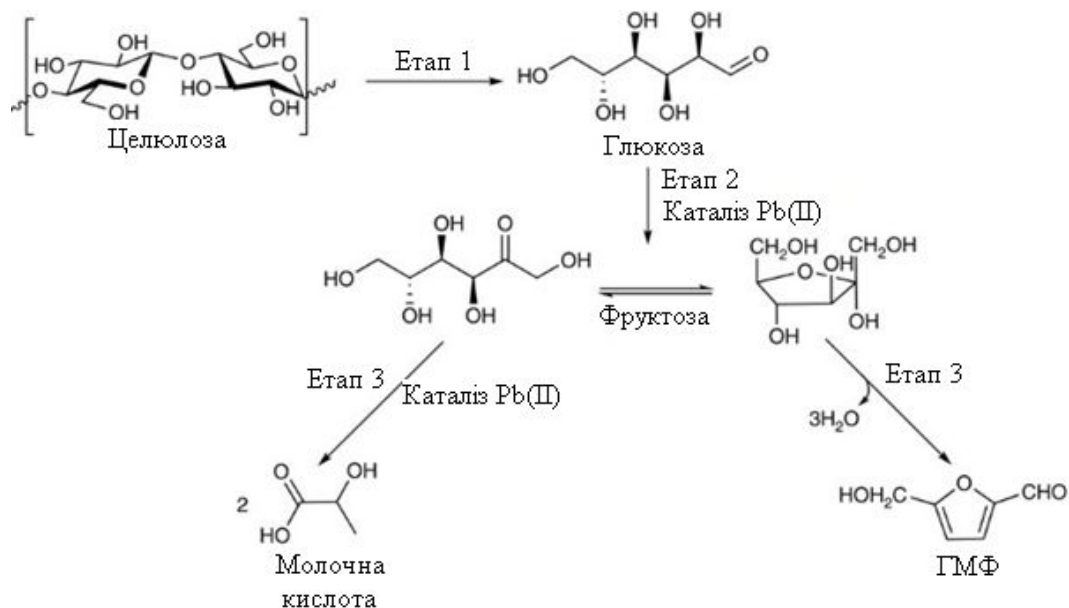


Рис. 2. Шляхи перетворення целюлози в молочну кислоту та ГМФ в присутності та за відсутності Pb(II) у воді

Нами проведено теоретичні розрахунки перетворення глюкози в молочну кислоту з використанням кластерно-континуальної моделі для з'ясування механізму реакції та каталітичної функції Pb(II). Обчислювальний підхід, застосований у цьому дослідженні, перевірено на практиці для хімічних реакцій у водних розчинах. Запропоновані механізми реакції наведено на рис. 3.

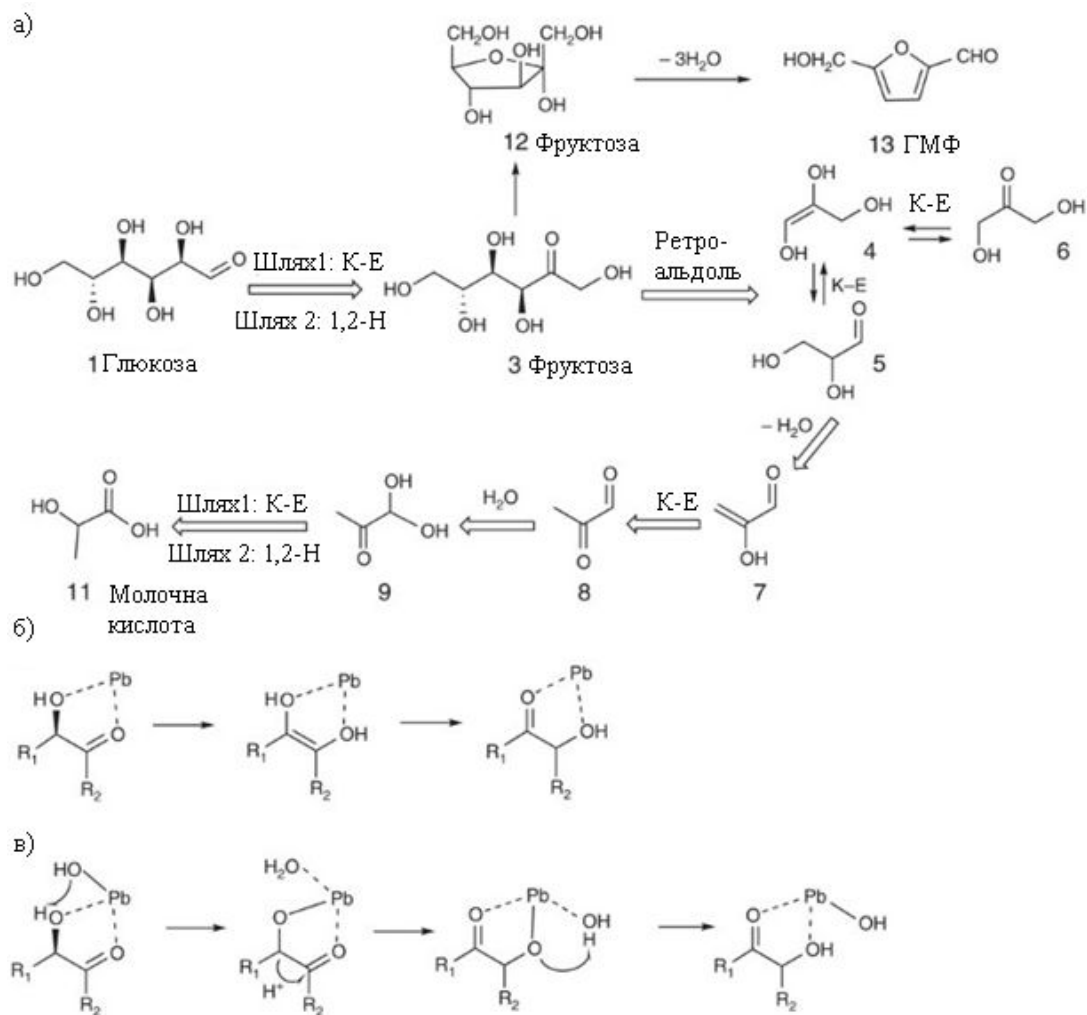


Рис. 3. Механізм реакції хемокаталітичного перетворення глюкози і фруктози: а — запропонований на основі теоретичних розрахунків механізм реакції перетворення глюкози на молочну кислоту у воді; б — шлях 1 для ізомеризації глюкози або тріози (послідовна кето-енольна таутомерія) за моделлю Pb(II); в — шлях 2 для ізомеризації глюкози або тріоди (1,2-Н - 1,2-гідридний зсув) за моделлю Pb(II)-ОН

Для ізомеризації глюкози у фруктозу ми провели розрахунки для двох можливих шляхів — послідовної кето-енольної таутомерії (К-Е) та 1,2-гідридного зсуву (1,2-Н). Енергії активації Гіббса, отримані для цих двох шляхів, становили 24,1 і 32,8 ккал/моль у водному розчині без каталізатора Pb(II). Цей результат свідчить про те, що шлях послідовної кето-енольної таутомеризації є більш сприятливим у некаталітичній реакції. Присутність Pb(II) знижує енергію активації Гіббса для цього шляху до 22,0 ккал/моль. В [8] запропоновано, що Sn(IV)-ОН є відповідальним за Sn-бета-каталізовану ізомеризацію глюкози до фруктози. Наші розрахунки показали низький енергетичний бар'єр ($\Delta G = 3,6$ ккал/моль) для перетворення Pb(II) в Pb(II)-ОН у воді. У багатьох роботах показано утворення Pb(II)-ОН у водному розчині Pb(II). Якщо припустити, що Pb(II)-ОН є активною речовиною замість Pb(II), то розрахунок вказує, що енергія активації Гіббса для шляху зсуву 1,2-гідриду ($\Delta G = 19,5$ ккал/моль) є нижчою, ніж для шляху таутомеризації кето-енулу

($\Delta G = 22,0$ ккал/моль). Нами експериментально підтверджено, що ізомеризація глюкози у фруктозу відбувається переважно за механізмом 1,2-гідридного зсуву в присутності свинцевого катализатора. Ці результати свідчать про роль Pb(II)-ОН в ізомеризації глюкози до фруктози.

Перетворення тріози, яка утворюється при розщепленні С-С зв'язку фруктози, проходить декілька стадій ізомеризації, а також дегідратацію та гідратацію з утворенням молочної кислоти (5→11). Наші розрахунки показують, що 1,2-гідридний зсув також є переважним шляхом для ізомеризації 1,1-дигідроксиацетону в молочну кислоту (9→11), що є найскладнішим етапом у перетворенні тріози в молочну кислоту. Окрім реакцій ізомеризації, важливим етапом є ретроальдольне розщеплення фруктози на тріози (тобто гліцеральдегід (5) та проміжний продукт ендіол (4)). За відсутності Pb(II) наші розрахунки показують, що енергія активації Гіббса для цього етапу становить 32,8 ккал/моль, що є дуже енергоємним етапом некаталітичного перетворення глюкози в молочну кислоту. Порівняно з ретро-альдольним розщепленням, дегідратація фруктози до ГМФ (3→13) за відсутності Pb(II) відбувається з нижчим енергетичним бар'єром (3→12: $\Delta G = 22,0$ ккал/моль, 12→13: $\Delta G = 29,1$ ккал/моль). Присутність Pb(II) суттєво знижує енергію активації Гіббса для фрагментації ретро-альдолу з 32,8 до 22,4 ккал/моль. Енергія активації Гіббса для цієї стадії дещо зростає ($\Delta G=24,4$ ккал/моль), якщо припустити, що Pb(II)-ОН є активною речовиною. Таким чином, стає цілком зрозуміло, що Pb(II) відіграє вирішальну роль у розщепленні С-С зв'язку фруктози. Без Pb(II) дегідратація фруктози до ГМФ відбуватиметься переважно через відносно нижчий енергетичний бар'єр для дегідратації порівняно з ретро-альдольним розщепленням.

Виходячи із вище вказаного, перетворення глюкози в молочну кислоту можна умовно розділити на наступні три стадії: ізомеризація глюкози у фруктозу (1→3), ретро-альдольна фрагментація фруктози з утворенням двох C_3 проміжних продуктів або тріози (3→4+5) та ізомеризація цих тріоз (4↔5→11) в молочну кислоту.

Висновки

Запропоновано простий і високоефективний гомогенний катализатор для прямого перетворення целюлози в молочну кислоту у водному розчині. Система, що містить плюмбум (II) нітрат, не тільки каталізує перетворення розмеленої целюлози, а також глюкози і фруктози в молочну кислоту з високим виходом (~70 %). Хемокаталітична система може бути застосована для перетворення лігноцелюлозних субстратів без попередньої обробки.

Встановлено, що хімізм хемокаталітичного перетворення целюлозивключає багатоступеневі каскадні реакції, в тому числі гідроліз целюлози до глюкози, ізомеризацію глюкози до фруктози, ретро-альдольне розщеплення фруктози до тріози і перетворення тріози в молочну кислоту. Хоча дегідратація фруктози до гідроксиметилфурфурулу відбувається переважно за відсутності Pb(II), присутність цього катіону зміщує основний шлях реакції в бік утворення молочної кислоти. Результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними і дають підстави для розуміння каталітичної ролі Pb(II). Зокрема, присутність Pb(II) значно знижує активаційний бар'єр для ретро-альдольного розщеплення фруктози, змінюючи основний шлях реакції з утворення гідроксиметилфурфурулу на утворення молочної кислоти. Детальний аналіз шляху реакції показує, що розщеплення С-С зв'язку фруктози запускається перенесенням протона від C_4 -ОН до $C_2=O$. Розрахунки показують, що координація Pb(II) з атомами кисню фруктози збільшує позитивні заряди на атомі Н C_4 -ОН. Це свідчить про те, що Pb(II) підвищує кислотність C_4 -ОН, тим самим полегшуючи перенесення протонів і розщеплення С-С зв'язку в ретро-альдольній реакції. Обчислювальні дослідження також вказують на те, що Pb(II)-ОН у водному розчині може в першу чергу брати участь в каталітичній ізомеризації глюкози до фруктози та тріози до молочної кислоти за механізмом 1,2-гідридного зсуву.

Список використаної літератури

1. Balciunas E. M., Salgado J. M., Converte A. Lactic acid properties, applications and production: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2013. Vol. 30, No 1. P.70–83.
2. Battula Savithra Krishna, Gantala Sarva Sai Nikhilesh, Besetty Tarun. Industrial production of lactic acid and its applications. *International Journal of Biotech Research*. 2018. Vol. 1, No 1. P. 42–54.

3. Rodrigues C., Vandenberghe L.P.S., Woiciechowski A. L. Production and Application of Lactic Acid. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. 2017. P. 543–556.
4. Aloia Romaní, Remedios Yáñez, Gil Garrote, José Luis Alonso. SSF production of lactic acid from cellulosic biosludges. *Bioresource Technology*. 2008, Vol. 99, No 10. P. 4247–4254.
5. Vijayakumar J., Aravindan R., Viruthagiri T. Recent Trends in the Production, Purification and Application of Lactic Acid. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2008. Vol. 22, No 2. P. 245–264.
6. Ochoa-Gomez Jose R., Fernandez-Santos M., Alonso-Vicario A. Synthesis of Lactic Acid by Alkaline Hydrothermal Conversion of Glycerol at High Glycerol Concentration. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010, Vol. 49, No 14. P. 6270–6278.
7. Yihong Shen, Shenghong Zhang, Hongjia Li, Yuan Ren, Haichao Liu. Efficient Synthesis of Lactic Acid by Aerobic Oxidation of Glycerol on Au–Pt/TiO₂ Catalysts. *Chemistry-A European Journal*. 2010. Vol. 16, No 25. P. 7368–7371.
8. Yumiko Matsuura, Ayumu Onda, Shuhei Ogo, Kazumichi Yanagisawa. Acrylic acid synthesis from lactic acid over hydroxyapatite catalysts with various cations and anions. *Catalysis Today*. 2014. Vol. 226. P. 192–197.
9. Abdel-Rahman M. A., Tashiro Yu., Sonomoto K. Lactic acid production from lignocellulose-derived sugars using lactic acid bacteria: Overview and limits. *Journal of Biotechnology*. 2011. Vol. 156, No 4. P. 286–301.
10. Zahid Anwar, Muhammad Gulfray, Muhammad Irshad. Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2014. Vol. 7. P. 163–173.

CHEMOCATALYTIC CONVERSION OF LIGNINOCELLULOSE RAW MATERIALS INTO LACTIC ACID

Abstract

The article presents the results of research on the hydrolysis of cellulose under the action of hot water in the presence of the catalyst lead (II) nitrate. It was found that lead (II) nitrate not only catalyzes the conversion of ground cellulose, but also glucose and fructose into lactic acid with a high yield (~70%). The transformation of glucose into lactic acid can be conventionally divided into the following three stages: isomerization of glucose into fructose, retro-aldol fragmentation of fructose with the formation of two C₃ intermediates or triose, and isomerization of these trioses into lactic acid. The presence of Pb(II) significantly lowers the activation barrier for retro-aldol cleavage of fructose, changing the main reaction pathway from the formation of hydroxymethylfurfural to the formation of lactic acid. Calculations show that the coordination of Pb(II) with the oxygen atoms of fructose increases the positive charges on the H atom of C₄-OH. This indicates that Pb(II) increases the acidity of C₄-OH, thereby facilitating proton transfer and C-C bond cleavage in the retro-aldol reaction.

References

- [1] Balciunas E. M., Salgado J. M., Converti A. (2013). Lactic acid properties, applications and production: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 30(1). P. 70–83.
- [2] Battula Savithra Krishna, Gantala Sarva Sai Nikhilesh, Besetty Tarun (2018). Industrial production of lactic acid and its applications. *International Journal of Biotech Research*. 1(1). P. 42–54.
- [3] Rodrigues C., Vandenberghe L.P.S., Woiciechowski A. L. (2017). Production and Application of Lactic Acid. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. P. 543–556.
- [4] Aloia Romaní, Remedios Yáñez, Gil Garrote, José Luis Alonso. (2008). SSF production of lactic acid from cellulosic biosludges. *Bioresource Technology*. 99(10). P. 4247–4254.
- [5] Vijayakumar J., Aravindan R., Viruthagiri T. Recent Trends in the Production, Purification and Application of Lactic Acid. (2008). *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 22(2). P. 245–264.

- [6] Ochoa-Gomez Jose R., Fernandez-Santos M., Alonso-Vicario A. (2010). Synthesis of Lactic Acid by Alkaline Hydrothermal Conversion of Glycerol at High Glycerol Concentration. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49(14). P. 6270–6278.
- [7] Yihong Shen, Shenghong Zhang, Hongjia Li, Yuan Ren, Haichao Liu. (2010). Efficient Synthesis of Lactic Acid by Aerobic Oxidation of Glycerol on Au–Pt/TiO₂ Catalysts. *Chemistry-A European Journal.* 16(25). P. 7368–7371.
- [8] Yumiko Matsuura, Ayumu Onda, Shuhei Ogo, Kazumichi Yanagisawa (2014). Acrylic acid synthesis from lactic acid over hydroxyapatite catalysts with various cations and anions. *Catalysis Today.* 226. P. 192–197.
- [9] Abdel-Rahman M. A., Tashiro Yu., Sonomoto K. (2011). Lactic acid production from lignocellulose-derived sugars using lactic acid bacteria: Overview and limits. *Journal of Biotechnology.* 156(4). P. 286–301.
- [10] Zahid Anwar, Muhammad Gulfraz, Muhammad Irshad (2014). Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences.* 7. P. 163–173.

Надійшла до редколегії 12.06.2024