

Еспада, 2002. – 572с.

3. Механізація технологічних процесів у тваринництві: навчальний посібник / Скляр О.Г., Болтянська Н.І. - Мелітополь: Колор Принт, 2012. - 720с.

4. Машина, обладнання та їх використання в тваринництві: підручник для здобувачів ступеня вищої освіти закладів вищої освіти / Скляр Р.В., Скляр О.Г., Болтянська Н.І., Мілько Д.О., Болтянський Б.В. - Київ: Видавничий дім «Кондор», 2019. - 608 с.

УДК 66.098

БІОВОДЕНЬ (bioH₂), ОТРИМАНИЙ ТЕМНОЮ ФЕРМЕНТАЦІЄЮ

О.А. Півоваров

доктор технічних наук, професор кафедри харчових технологій, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна, e-mail: apivo@ua.fm

Анотація. У роботі розглядаються можливості отримання біоводню шляхом використання темного бродіння (темної ферментації). Наведені перспективи і останні наукові здобутки, що присвячені збереженню навколишнього середовища, його екологічності, зменшенню долі викопної сировини і переходу до альтернативних джерел енергії за рахунок видобування різноманітними методами «зеленого» водню.

Ключові слова: джерела енергії, біоводень, темне бродіння, темна ферментація.

BIOHYDROGEN (bioH₂) OBTAINED BY DARK FERMENTATION

Alexander Pivovarov

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technologies, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, e-mail: apivo@ua.fm

Abstract. The paper examines the possibilities of obtaining biohydrogen by using dark fermentation. The perspectives and latest scientific achievements are presented, which are dedicated to preserving the environment, its environmental friendliness, reducing the share of fossil fuels and transitioning to alternative energy sources by extracting "green" hydrogen by various methods.

Keywords: energy sources, biohydrogen, dark fermentation, dark fermentation.

Вступ. Останнім часом біоенергетика є основним джерелом енергії, оскільки вона може бути відновлюваною та екологічно чистою. Сьогодні майже 95% світового попиту спрямовано на викопне паливо, але біоводень як біогаз є дуже ефективним, ніж інші гази. Водень є одним із найпоширеніших на Землі хімічним елементом, він не забруднює атмосферу і не є отруйною речовиною. Він вважається поновлюваним і стійким джерелом енергії, мінімізує відходи, а також долає негативний вплив викопного палива, тоді

як спалювання викопного палива виділяє CO_2 . Біоводень не викликає ефекту парникових газів, руйнування озонового шару та глобального потепління і є безпечніший у використанні, ніж природний газ [1]. Для виробництва водню біомаса та вода можуть використовуватися як відновлювані ресурси, виробництво біоводню з відновлюваних ресурсів також відоме як «зелена технологія». Виробництво водню можна здійснювати за допомогою темного бродіння, що є ефективним методом його виробництва. Існує кілька способів виробництва водню з побутових відходів, відходів сільського господарства, харчових відходів, промислових стічних вод і каналізаційних вод. Стічні води, промислові стічні води є дешевими та ефективними методами виробництва біоводню разом з їх очищенням [2].

Мета роботи полягає в аналізі особливостей і перспектив отримання біоводню.

Матеріал і результат досліджень. У 2022 році в усьому світі було викинуто приблизно 1,05 мільярда метричних тон їжі. Ці надлишки зазвичай відправляються на звалища, де вони сприяють викидам 8–10% парникових газів, таких як метан (CH_4) і вуглекислий газ (CO_2), а також викиду аміаку (NH_3) і фільтрату. Харчові відходи мають змінний склад, вони багаті вуглеводами, жирами та білками, що робить їх придатними в якості субстрату у процесах темної ферментації.

Темне бродіння – це анаеробний процес деградації органічних сполук, що здійснюється факультативними анаеробними мікроорганізмами за відсутності світла, що призводить до виробництва bioH_2 шляхом відновлення протонів для розсіювання надлишкових електронів від окислення органічної речовини в культуральному середовищі. В якості первинних побічних продуктів бродіння також отримують такі сполуки, як спирти, CO_2 і органічні кислоти. Це сприяє відновленню енергії та пом'якшує проблеми, пов'язані з їх утилізацією на звалищах. Щоб отримати переваги для навколишнього середовища від виробництва bioH_2 , процес з використанням харчових відходів, не повинен призводити до нових негативних екологічних впливів, таких як забруднення ґрунту або утворення шкідливих стоків.

Виробництво bioH_2 на одиницю субстрату та часу має бути максимально збільшено, а також має бути економічно життєздатним, включаючи витрати, пов'язані зі збором, транспортуванням, попередньою обробкою та переробкою харчових відходів. Було досягнуто виходу $1,12 \pm 0,02$ моль bioH_2 /моль глюкози, використовуючи харчові відходи, що складаються з подрібненого та попередньо обробленого рису, картоплі, цибулі, апельсина, свинини, капусти та редьки з H_2SO_4 та переважно інокулятом, до складу якого входять грам-позитивні бактерії – *Clostridium*. Було також повідом-

лено про вихід $157,25 \pm 7,62$ мл $\text{bioH}_2/\text{г}$ летких твердих речовин з використанням харчових відходів, що складаються з капусти, рису та свинини, з інокулятом, відібраному з осаду і обробленого лугом у анаеробному реакторі [3].

Досліджено вплив різних видів попередньої обробки на харчові відходи для виробництва bioH_2 . Було проведено чотири окремі попередні інноваційні обробки (обробка ультразвуком, нагрівання, обробка кислотою та лугом) і три комбіновані попередні обробки (обробка ультразвуком нагріванням, обробка ультразвуком і кислотою та обробка ультразвуком і лугом). Після попередньої обробки проводили ферментацію у біореакторі при рН 5,5, інкубували при 37°C і 180 об/хв без додавання інокулята. Комбінована попередня обробка ультразвуком і кислотою призвела до максимального збільшення розчинних вуглеводів приблизно на 31%, отже, до найвищого виробництва bioH_2 , приблизно 118 мл $\text{bioH}_2/\text{г}$ початкової сировини, тоді як контрольний експеримент без попередньої обробки призвів до виробництва 42 мл $\text{bioH}_2/\text{г}$ за аналогічних умов.

Виснаження викопних ресурсів, які становлять приблизно 80% поточної енергетичної матриці, а також зростання ринкових цін і проблеми навколишнього середовища, пов'язані з викидом забруднюючих газів під час їх спалювання, спонукали дослідження до виробництва відновлюваної енергії та її впровадження в промислових масштабах, таких як сонячна, вітрова, геотермальна та біопаливо. У цьому контексті водень (H_2) вважається енергетичним вектором майбутнього через його високий енергетичний вміст ($122 \text{ кДж} \cdot \text{г}^{-1}$, щонайменше в 2,75 рази вище, ніж у викопного палива) і виділення H_2O як єдиного побічного продукту його спалювання [4].

Незважаючи на те, що H_2 можна використовувати як джерело енергії через його пряме застосування в двигунах внутрішнього згорання чи реактивних двигунах або також перетворювати в електричну енергію в паливних елементах, його поточні застосування зосереджені в хімічній і нафтохімічній промисловості з метою переробки палива, синтезу аміаку, синтезу метанолу та гідрування харчових олій, створюючи глобальну потребу в 95 мільйонів тон H_2 в 2022 [5]. Нажаль H_2 отримують за використанням таких енергоємних процесів, як електроліз води (приблизно 4%) і термохімічні методи (приблизно 96%) з невідновлюваних джерел, таких як природний газ, сира нафта та вугілля [4], які спричиняють викиди в атмосферу великої кількості вуглецю, сірки, оксидів азоту, золи, радіоактивних речовин, і важкі метали.

Водень (H_2) є високоефективним і чистим джерелом енергії з потенціалом відновлюваної енергії. Виробництво H_2 біологічними шляхами, такими як біофотоліз, фотоферментація, темне бродіння та біоелектрохімічне виробництво, характеризується як відновлювана альтернатива поточному ви-

бництва, яке в основному базується на енергоємних електрохімічних і термохімічних процесах і відповідає за викид великої кількості шкідливих для навколишнього середовища сполук. Як показує практика темне бродіння є найбільш ефективним і рентабельним методом виробництва біоводню, що робить його ключовим напрямком досліджень.

Одним із найскладніших завдань у виробництві bioH_2 є його подальше відновлення. Через низький кінетичний діаметр (приблизно $2,9\text{\AA}$) H_2 [6] відділення цієї молекули газу від інших молекул газу (включаючи CH_4 , CO_2 , N_2) вимагає високоселективних методів розділення. На сьогоднішній день було зроблено спроби очищення біоводню за допомогою адсорбції при зміні тиску, фракційної або кріогенної дистиляції, мембранного газорозділення та їх можливого по'єднання. Технології адсорбції зі змінним тиском і фракційної дистиляції використовуються в комерційних цілях, але зазвичай вони не є рентабельними, оскільки передбачають високе споживання енергії для відділення та очищення H_2 . Крім того, жоден із цих процесів не забезпечує достатньої чистоти для цільових застосувань в економіці H_2 . Що стосується технології мембранного газорозділення, то вона є багатообіцяючою методологією в галузі завдяки своїм численним перевагам, таким як низьке енергоспоживання, висока селективність і ефективність, можливість безперервної та тривалої роботи (залежно від типу мембрани та кислотогенного складу вихідного газу), нижчі інвестиційні витрати порівняно з двома іншими процесами, простота експлуатації та економічна ефективність. При роботі з відділенням H_2 з використанням чистих полімерних мембран можна застосовувати декілька полімерних матеріалів, включаючи сульфований поліімід, полііміди, *Nuflon*, *Teflon*, полі(триметилсилілпропін), полідиметилсилоксан. Серед цих матеріалів деякі полімери, як правило, забезпечують високу проникність H_2 , але низьку ефективність поділу (з точки зору селективності) щодо поділу специфічних молекул газу (наприклад, H_2/CH_4 , H_2/N_2 , H_2/CO_2), і навпаки, високоселективні полімери не демонструють високі проникні властивості [6].

Широкомасштабне використання харчових відходів як субстрату для темної ферментації створює кілька практичних наслідків і значних логістичних проблем. З точки зору збору, основна проблема полягає в необхідності надійної інфраструктури для ефективного розділення та транспортування харчових відходів від місць утворення до об'єктів переробки. Це часто передбачає координацію з різними джерелами відходів, такими як супермаркети, ресторани та домогосподарства, щоб забезпечити безперервне та адекватне постачання. Попередня обробка харчових відходів має вирішальне значення для підвищення ефективності темного бродіння. Гетерогенність відходів вимагає ефективних методів попередньої обробки, щоб збільшити

доступність ферментованих субстратів, таких як целюлоза та геміцелюлоза, і зменшити присутність небажаних забруднень, які можуть перешкоджати процесу бродіння. Ще однією важливою проблемою є інтеграція з існуючими очисними спорудами. Установки очищення твердих відходів або рідких стоків повинні бути адаптовані для ефективного прийому та обробки харчових відходів, призначених для темної ферментації. Це може включати інвестиції в інфраструктуру для обробки біогазу, розділення твердих і рідких речовин і контролю запахів. Крім того, необхідно враховувати економічні наслідки, такі як вартість впровадження та експлуатації цих адаптованих інфраструктур, а також економічну життєздатність великомасштабного виробництва біоН₂ порівняно з іншими відновлюваними джерелами енергії. Таким чином, хоча харчові відходи мають значний потенціал як субстрат для темної ферментації, їх широкомасштабна утилізація вимагає комплексного підходу, який враховує як технічні, так і логістичні аспекти, спрямовані на максимізацію енергетичної та екологічної ефективності процесу. Але використання харчових відходів як субстрату для темного бродіння для виробництва біоводню є актуальною темою досліджень [7]. Різноманіття сировинного складу призводить до пошуку специфічних технологічних рішень отримання біоводню. Оригінальним прикладом такого пошуку можуть слугувати технологічні заходи отримання водню шляхом темної ферментації органічної фракції відходів пелюшок [8], стічних побутових та промислових вод та інших сировинних джерел органічного походження (гною дійних корів, мікробродоростей та багато іншого) [9–11].

Висновки. Тема застосування темного бродіння з промислових та побутових твердих та рідких, у тому числі харчових, відходів займає у науковому світі потужну долю, про що свідчать численні науково-дослідні та промислові результати, опубліковані останнім часом у науковій літературі. І майже у кожній з таких публікацій стають гострими питання збереження навколишнього середовища, його екологічність, зменшення долі викопної сировини і перехід до альтернативних джерел енергії за рахунок видобування різноманітними методами зеленого водню. Очікується, що глобальний попит на енергію продовжить свою висхідну траєкторію в найближчі десятиліття, тим самим посилюючи тиск на енергопостачання та екологічну стійкість. Водневій енергії приділяється все більшої уваги в анаеробному зброджуванні через її унікальну чистоту. Тому, не зважаючи на те, що сьогодні має місце війна в Україні, пошук технологій видобування біоводню з безмежної кількості харчових відходів може бути увінчаний успіхом саме за рахунок створення відповідних науково-дослідних лабораторій з конкретною направленістю і цілями, використовуючи потужний потенціал науковців і

студентства від бакалаврів до аспірантів. Початок вже є [12]. А відповідні фінансові організації та спонсори мають виявити готовність до ефективного фінансування таких робіт, які вже в недалекому майбутньому можуть принести велику користь країні за рахунок видобування «зеленого» біоводню як альтернативного палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. IEA, I. Global Hydrogen Review 2023 – Analysis – IEA [online]. 2022. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
2. Taggar, M. S., Kaur, A., Jain, C., Kalia, A., & Sooch, S. S. (2024). Hydrogen production via dark fermentation: a review of influential factors. *Cellulose Chemistry & Technology*, 58.. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol>
3. Albuquerque, M. M., Sartor, G. D. B., Martinez-Burgos, W. J., Scapini, T., Edwiges, T., Soccol, C. R., & Medeiros, A. B. P. (2024). Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review. *Methane*, 3(3), 500-532. <https://doi.org/10.3390/methane3030029>
4. Xue, S., Chen, H., Wang, F., Lv, G., Tan, L., & Liu, G. (2024). The effect of substrate acidification on the biohydrogen production by dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.183>
5. Tuluhong, A., Chang, Q., Xie, L., Xu, Z., & Song, T. (2024). Current Status of Green Hydrogen Production Technology: A Review. *Sustainability*, 16(20), 9070. <https://doi.org/10.3390/su16209070>
6. Hankel, M., Zhang, H., Nguyen, T. X., Bhatia, S. K., Gray, S. K., & Smith, S. C. (2011). Kinetic modelling of molecular hydrogen transport in microporous carbon materials. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(17), 7834-7844. <https://doi.org/10.1039/C0CP02235G>
7. Tapia-Venegas, E., Ramirez-Morales, J. E., Silva-Illanes, F., Toledo-Alarcón, J., Paillet, F., Escudie, R., ... & Ruiz-Filippi, G. (2015). Biohydrogen production by dark fermentation: scaling-up and technologies integration for a sustainable system. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14, 761-785. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9383-5>
8. El Bari, H., Lahboubi, N., Habchi, S., Rachidi, S., Bayssi, O., Nabil, N., ... & Villa, R. (2022). Biohydrogen production from fermentation of organic waste, storage and applications. *Cleaner Waste Systems*, 3, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100043>
9. Sotelo-Navarro, P. X., & Poggi-Varaldo, H. M. (2021). Hydrogen from Dark Fermentation of the Organic Fraction of Waste Diapers: Optimization Based on Response Surface Experiments. *Frontiers in Energy Research*, 9, 630212. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.630212>
10. Hangri, S., Derbal, K., Policastro, G., Panico, A., Contestabile, P., Pontoni, L., ... & Fabbicino, M. (2024). Combining pretreatments and co-fermentation as successful approach to improve biohydrogen production from dairy cow manure. *Environmental Research*, 246, 118118. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118118>
11. Limongi, A. R., Viviano, E., De Luca, M., Radice, R. P., Bianco, G., & Martelli, G. (2021). Biohydrogen from microalgae: production and applications. *Applied Sciences*, 11(4), 1616. <https://doi.org/10.3390/app11041616>
12. Зубченко, Л. С., & Кузьмінський, Є. В. (2015). Аналіз продуктивності біотехнологічного отримання водню за використання мікроорганізмів з різними типами метаболізму, перспективні напрямки подальших досліджень. *ScienceRise*, 10(6 (15)), 47-53.

<https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.52116>

УДК 620.92

БИОМАСА ЯК ДЖЕРЕЛО ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА: ДОСВІД ЄВРОПЕЙСЬКИХ КРАЇН ТА ПЕРСПЕКТИВИ В УКРАЇНІ

А.С. Малегіна

студент групи МгАІ-1-24, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна, e-mail: nastya.dunaenko2003@gmail.com

Анотація. Розглядається використання біомаси як відновлюваного джерела енергії в сільському господарстві, аналізується досвід європейських країн та оцінюються перспективи впровадження подібних практик в Україні. Особлива увага приділяється потенціалу аграрної біомаси, технологіям її переробки та економічним аспектам застосування. Описано технологічні процеси перетворення біомаси на біопаливо, електроенергію та тепло, включаючи спалювання, анаеробне бродіння, газифікацію та піроліз.

Окремо розглядається досвід європейських країн, таких як Німеччина, Данія та Швеція, які активно використовують біоенергетичні технології для зниження залежності від викопних палив та скорочення викидів парникових газів. Проведено порівняльний аналіз законодавчого регулювання та фінансових механізмів підтримки біоенергетики в Європі та Україні.

Ключові слова: біомаса, відновлювана енергія, сільське господарство, європейський досвід, потенціал, технології, впровадження.

BIOMASS AS A SOURCE OF RENEWABLE ENERGY FOR AGRICULTURE: EXPERIENCE OF EUROPEAN COUNTRIES AND PROSPECTS IN UKRAINE

A.S. Malehina

Student of group MgAI-1-24, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, e-mail: nastya.dunaenko2003@gmail.com

Abstract. The article examines the use of biomass as a renewable energy source in agriculture, analyzes the experience of European countries, and evaluates the prospects for implementing similar practices in Ukraine. Special attention is given to the potential of agricultural biomass, its processing technologies, and the economic aspects of its application. The technological processes for converting biomass into biofuels, electricity, and heat are described, including combustion, anaerobic digestion, gasification, and pyrolysis.

The experience of European countries such as Germany, Denmark, and Sweden, which actively utilize bioenergy technologies to reduce dependence on fossil fuels and cut greenhouse gas emissions, is separately considered. A comparative analysis of legislative regulations and financial support mechanisms for bioenergy in Europe and Ukraine is conducted.