



UDC 628.477, 628.47, 628.385

BIOTECHNOLOGICAL UTILIZATION OF FALLEN LEAVES

N. Bublisko¹, O. Semenova¹, O. Skydan², T. Tymoshchuk², V. Tkachuk²

Article info

Received
29.01.2020

Accepted
27.02.2020

¹ National
University
of Food
Technology
68, Volody-
myrska Str.,
Kyiv-33,
01601, Ukraine

² Zhytomyr
National
Agroecological
University
7, Staryi Blvd,
Zhytomyr,
10008, Ukraine

E-mail:
3110nb@
gmail.com;
olena.semenova07
@gmail.com;
skudanolegv@
ukr.net

**Bublisko, N., Semenova, O., Skydan, O., Tymoshchuk, T., Tkachuk, V. (2020).
Biotechnological utilization of fallen leaves. Scientific Horizons, 02 (87), 7–14.
doi: 10.33249/2663-2144-2020-87-02-07-14.**

Increase in volume of cellulose-containing waste poses a significant threat to the environment as their burning is accompanied by the emission of toxic components. It is important to find new approaches to the utilization of vegetable waste, which would have not only environmental but also economic effects. The purpose of our research was the study of methane fermentation of fallen leaves for production of high-quality and cheap biogas, as well as fermented mass for stimulation of seed germination.

The authors of the article considers the possibility of using fallen leaves as an energy source for biogas production with the production of a valuable biostimulator. The experiments were carried out at a laboratory facility (methane tank and gas holder). The qualitative composition of biogas was determined by the accelerated method: passing it through a 10 % solution of sodium hydroxide. The research showed that cellulose-containing waste (fallen leaves) is subjected to periodic methane fermentation at 45 ° C. The loading dose of the leaves was 10 % of the total volume of the culture fluid. Fermentation lasted 25 days, the efficiency of biotransformation of solids reached 82 %. The pH of the mixture in the methane tank increased from 6.3 to 8.1.

*The authors determined that biogas yield of fallen leaf as a result of methane fermentation was 350 dm³ per 1 kg of dry matter. Methane content in biogas reached 65 %, indicating that it is worth using as an alternative fuel. The effectiveness of biomass produced under conditions of anaerobic fermentation of fallen leaves for stimulation of seed germination was under research. Processing of lawn seeds, including perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and red fescue (*Festuca rubra* L.) with the biostimulator provides a 25 % increase in germination energy compared to control. Stem height and root length under the influence of biostimulator increased by 28–46 % compared to the control.*

The prospect of further research is methane fermentation of agricultural cellulose-containing wastes, due to their volume and considerable energy potential.

Key words: methane fermentation, cellulose-containing vegetable waste, biogas, biostimulator, hardwood biomass, seed treatment, germination energy.

БІОТЕХНОЛОГІЧНА УТИЛІЗАЦІЯ ОПАЛОГО ЛИСТЯ

Н. О. Бублієнко¹, О. І. Семенова¹, О. В. Скидан², Т. М. Тимошук², В. П. Ткачук²

¹Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601, Україна

²Житомирський національний агроєкологічний університет
бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

Зростання обсягів целюлозовмісних відходів становить значну загрозу для навколишнього середовища, оскільки їх спалювання супроводжується викидами токсичних компонентів. Актуальним

є пошук нових підходів до утилізації відходів рослинного походження, що мало б не лише екологічний, але і економічний ефект. Метою наших досліджень було вивчення метанової ферментації опалого листя для отримання якісного та дешевого біогазу, а також збродженої маси для стимулювання проростання насіння.

У статті розглянуто можливість використання опалого листя як енергетичного джерела для виробництва біогазу з отриманням цінного біостимулятора. Досліди проводили на лабораторній установці (метантенк та газгольдер). Якісний склад біогазу визначали прискореним методом: пропусканням його через 10 %-ий розчин натрію гідроксиду. У результаті досліджень виявлено, що целюлозовмісні відходи (опале листя) піддаються метановій ферментації у періодичному режимі за температури 45 °С. Доза завантаження листя становила 10 % від загального об'єму культуральної рідини. Бродіння тривало 25 діб, ефективність біотрансформації сухих речовин досягла 82 %. Показник рН суміші у метантенку зріс від 6,3 до 8,1.

Встановлено, що вихід біогазу в результаті метанової ферментації опалого листя становив 350 дм³ із 1 кг сухих речовин. Вміст метану у біогазі досягав 65 %, що свідчить про повноцінність використання його як альтернативного палива. Досліджено ефективність біомаси, що утворюється в умовах анаеробного збродження опалого листя для стимулювання проростання насіння. Обробка насіння газонних трав, зокрема пажитниці багаторічної (*Lolium perenne* L.) та костриці червоної (*Festuca rubra* L.) біостимулятором забезпечує підвищення на 25 % енергії проростання порівняно з контролем. Висота сходів та довжина корінців під впливом біостимулятора збільшувалася на 28–46 % порівняно з контролем.

Перспективним у подальшому є дослідження метанової ферментації сільськогосподарських целюлозовмісних відходів, зважаючи на їх обсяг та значний енергетичний потенціал.

Ключові слова: метанова ферментація, целюлозовмісні рослинні відходи, біогаз, біостимулятор, листяна біомаса, обробка насіння, енергія проростання.

Вступ

Потужним джерелом утворення відходів рослинного походження є зелені насадження міст та інших населених пунктів, садів, сільськогосподарських угідь. Щорічно восени відбувається локальне накопичення біомаси, що досягає занадто великих обсягів для їх природної біодеградації в місцях утворення (Hrubnyk et al., 2017). Найчастіше в Україні їх намагаються утилізувати найдешевшим способом, а саме спалюють, компостують або вивозять на сміттєзвалище. Спалювання опалого листя і сухої трави призводить до забруднення атмосфери, створює небезпеку для здоров'я людини та виникнення пожеж (Sonko et al., 2017; Hrubnyk, 2019). Під час згоряння однієї тони рослинних відходів вивільняється у повітря близько 9 кг мікрочастинок диму, що складаються із пилу, окисів азоту, чадного газу, важких металів і низки канцерогенних сполук. Окрім того, з тліючого без доступу кисню опалого листя може виділятися бензопірен, що має здатність спричиняти ракові захворювання у людини. Відомо, що у повітря з димом вивільняються діоксини як одні з найбільш отруйних речовин для людини (Razanov & Tkachuk, 2015; Hrubnyk et al., 2019). Спалювати листя на території житлової забудови, у скверах і

парках згідно з чинним законодавством заборонено (*Derzhavni sanitarni ...*, 2011). Проте це не вирішує проблеми, оскільки спалювання в інших місцях залишається джерелом викидів цих же токсичних компонентів.

Розкладання біомаси опалого листя природним способом залежить від вологості середовища і становить більше двох років, а утилізація його на сміттєнакопичувачах вимагає значних витрат та збільшує їх площу (Dyakonov et al., 2016). Компостування рослинних відходів є досить тривалим процесом і відбувається протягом декількох місяців. Крім того, виникає проблема виділення значних територій населених пунктів для розташування компостних куп.

Рослинні відходи урбанізованих територій наразі доцільно розглядати у якості енергетичної сировини, що дасть можливість вирішувати екологічні, соціальні та економічні проблеми (Popuk, 2014; Resuieva, 2015; Dyakonov et al., 2016). Відновлювані джерела енергії з біомаси є важливою складовою в енергобалансі країн світу (Hengeveld, 2016; Grando et al., 2017). У країнах Європейського Союзу щорічно з біомаси отримують близько 14 % енергії від загальної потреби (Hrytsai & Masliukova, 2019).

Проблемам та перспективам виробництва біогазу як альтернативного джерела енергії приділяли значну увагу у своїх наукових доробках вітчизняні та зарубіжні дослідники (Börjesson & Ahlgren, 2012; Sereda, 2013; Henning, 2014; Binkovska & Shanina, 2015; Kozak, 2018; Hrytsai & Masliukova, 2019).

У якості сировини для виробництва біогазу доцільно використовувати рослинні відходи та побічні продукти агропромислового сектору (Popuk, 2014; Bubliienko et al., 2016; Tkachenko, 2018; Zapalowska & Bashutska, 2019).

У результаті анаеробного бродіння органічної речовини метаногенними асоціаціями мікроорганізмів утворюється зброджена біомаса, яка може використовуватися як цінне органічне добриво з високим вмістом поживних речовин для покращення родючості ґрунтів, у тому числі і на території міст (у лісопарках, парках, скверах) (Sereda, 2013; Binkovska & Shanina, 2015). Використання збалансованих біодобрив після метанової ферментації забезпечує поліпшення фізико-механічних властивостей ґрунту та підвищення на 30–50 % урожайності культур (Stepanenko, 2012). Досліджено, що використання біодобрив не лише позитивно впливає на продуктивність сільськогосподарських рослин, але й не виявляє негативного впливу на агроєкосистему (Makarenko, 2014). В Україні значні запаси сировини, що забезпечують можливість виробляти високоякісні біологічні добрива для органічного виробництва рослинницької продукції (Drukovanuy & Dushkant, 2013).

Незважаючи на величезний потенціал відходів рослинного походження, питанням їх утилізації приділяється недостатньо уваги. У зв'язку з цим, дослідження процесів утилізації відходів рослинного походження, зокрема опалого листя, методом анаеробного збродження з отриманням ліквідних продуктів є актуальним питанням та потребує подальшого вивчення.

Матеріали та методи

Для досягнення поставленої мети досліджень передбачали вирішити наступні завдання: проаналізувати стан питання щодо утилізації рослинних відходів; дослідити можливість збродження опалого листя; визначити енергетичний потенціал сировини та стимулюючу дію збродженої біомаси на ріст рослин. Метанову ферментацію листя

здійснювали протягом 2016–2019 рр. у лабораторній установці (метантенк і газгольдер). Метантенк був розміщений у термостаті. Температура збродження становила 45 °С, що, з одного боку, забезпечує достатню інтенсивність біотрансформації складових листя та генерації біогазу, а з іншого, є більш економічно вигідним, ніж крайні значення термофільного режиму бродіння. Біогаз, що утворювався при бродінні, спрямовували через газовідвідну трубку у водяний газгольдер. Кількість біогазу реєстрували за кількістю води, витісненої з газгольдера у приймальну ємність. Якісний склад біогазу визначали прискореним методом: пропусканням його через 10 %-ий розчин натрію гідроксиду.

Показник *pH* контролювали портативним *pH*-метром лабораторним *pH*-305. Для визначення основних показників процесу використані стандартні методики (Muravev, 2010).

Результати досліджень та обговорення

Пошукові дослідження щодо утилізації целюлозовмісних відходів (опалого листя) із застосуванням метанової ферментації здійснювали на кафедрі екологічної безпеки та охорони праці Національного університету харчових технологій.

На попередньому етапі листя подрібнювали до часток розміром 1...1,5 см, а потім замочували у воді кімнатної температури протягом 3 діб (співвідношення листя і води 1 : 3). Замочування полегшує подальший процес біорозкладання органічних речовин листя.

Оброблене таким чином листя завантажували у лабораторний метантенк, де відбувалася метанова ферментація. Бродіння здійснювалось у періодичному режимі. Був використаний активний мул із Юзефо-Миколаївської біогазової станції. Доза завантаження листя становила 10 % від загального об'єму культуральної рідини.

Температура бродіння відповідала початковому значенню термофільного режиму, а саме 45 °С. Це є достатнім для забезпечення необхідної інтенсивності метанового збродження листя та генерації біогазу, водночас, не є настільки енергозатратним, порівняно із максимальними значеннями температур термофільного режиму (60...65 °С).

Метанова ферментація – це складний біохімічний процес розкладання різноманітних

органічних сполук під впливом анаеробних мікроорганізмів.

Інтенсивність процесу трансформації та газогенерації різняться залежно від складових субстрату. Найбільша швидкість розкладання характерна для білків, амінокислот, крохмалю,

моносахаридів. Високий вміст целюлози у субстраті зумовлює зменшення швидкості ферментації.

Хід процесу контролювали за такими показниками: уміст сухих речовин, *pH*, вихід біогазу, вміст метану в біогазі (рис. 1).

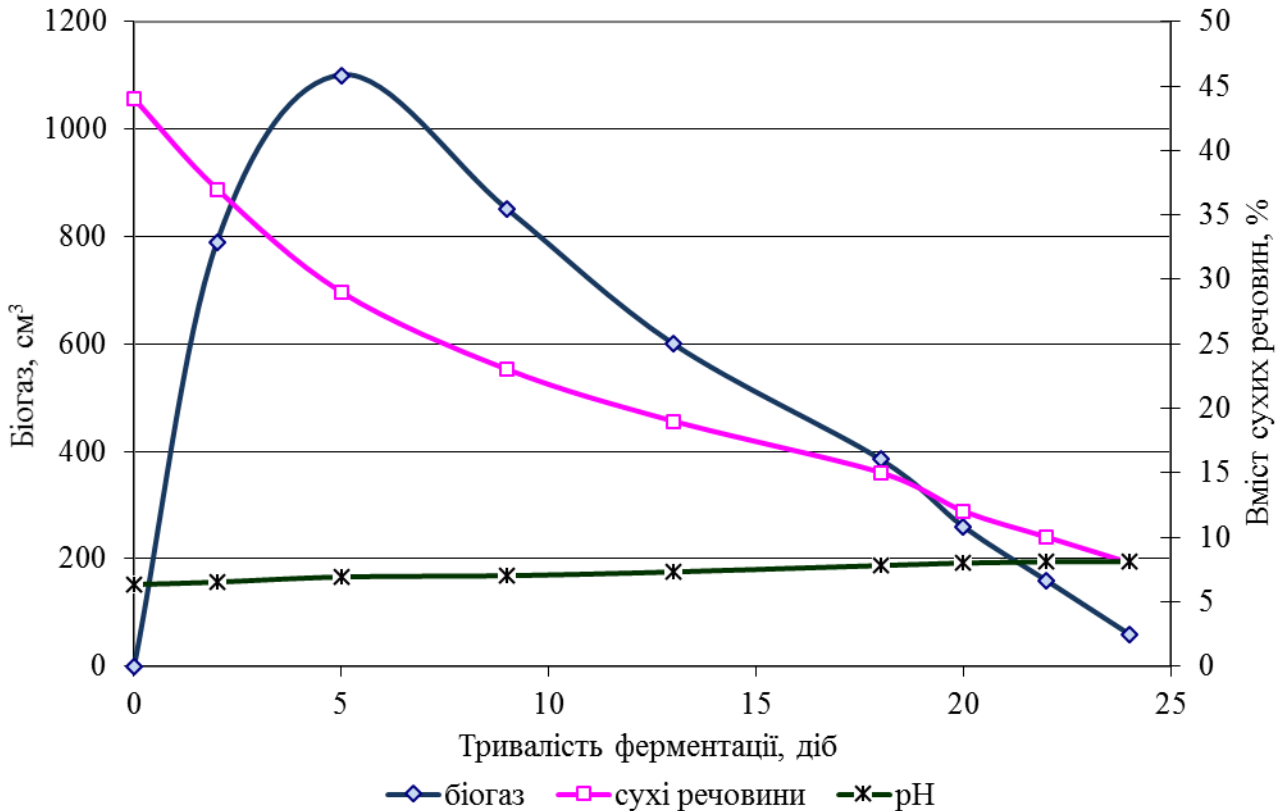


Рис. 1. Вихід біогазу, вміст сухих речовин та *pH* за метанового збродження опалого листа (середнє за 2016–2019 рр.)

Загальна тривалість збродження листа – 25 днів. Такий тривалий період бродіння пояснюється особливостями хімічного складу субстрату, наявністю складних для біорозкладання компонентів (целюлоза, геміцелюлоза).

Ефективність біотрансформації сухих речовин листа на завершення процесу бродіння досягла 82 %. Показник *pH* культуральної рідини зростає від 6,3 до 8,1, що свідчить про нормальний перебіг метанової ферментації. «Закидання» середовища, тобто зниження показника *pH* нижче 7, що часто є проблемою за метанового бродіння стічних вод та відходів, не спостерігали.

Кількість біогазу, що утворилася протягом всього процесу бродіння, становила 350 дм³ із

1 кг сухих речовин завантаженого листа. Дослідження якісного складу біогазу свідчать про значний вміст у ньому метану (60...65 %). Тобто утворена біогазова суміш придатна для використання як альтернативне джерело енергії.

На 18–19 добу інтенсивність газогенерації значно зменшувалася, що пояснюється біотрансформацією переважної частини сухих речовин листа за цей період. Зважаючи на незначний подальший вихід біогазу, продовжувати бродіння є не економічно виправданим.

Зброджена маса характеризується значним вмістом біологічно активних компонентів, особливо цінними з яких є вітаміни групи В, а саме вітаміни кобаламінової групи (Bublienko et al., 2016). Так, виявлено, що уміст вітаміну В₁₂ досягав 16...18 мкг/г сухих речовин субстрату.

Також зброджена у термофільних умовах маса містить такі цінні для рослин компоненти як нітроген, фосфор та калій. Дослідженнями встановлено, що за анаеробного збродження відбувається дезодорація – звільнення від неприємного запаху, дегельмінтизація – знешкодження паразитів, а також незначне зниження схожості насіння бур'янів.

Це дає можливість використовувати зброжену масу у сільськогосподарському виробництві у якості добрива та стимулятора росту рослин. Тому впродовж 2016–2019 рр. нами були проведені дослідження із застосуванням анаеробної зброженої маси як біостимулятора росту рослин шляхом обробки насіння суміші газонних трав, зокрема пажитниці багаторічної (*Lolium perenne L.*) та костриці червоної (*Festuca rubra L.*). Для обробки насіння пажитниці багаторічної та костриці червоної використовували біологічно активний розчин, що отримали при розведенні анаеробної зброженої маси водопровідною водою (10 см³ води на 2 см³ зброженої маси).

Насіння замочували у біостимуляторі протягом 40 хвилин (співвідношення кількості розчину і насіння 1:100). У контрольному варіанті насіння замочували у звичайній водопровідній воді кімнатної температури у такому ж співвідношенні. Оброблене таким чином насіння, поміщували у прокип'ячені протягом 40 хвилин і продезінфіковані спиртом чашки Петрі, на дні яких рівномірно розподіляли тонкий шар піску. Перед цим пісок кілька разів промивали дистильованою водою, підсушували у сушильній шафі і просіювали. У кожену чашку Петрі поміщали по 25 насінин. Пророщування здійснювали за температури 20 °С із щоденним зволоженням зерен.

Через 72 години від початку пророщування було підраховано кількість пророслих насінин і визначено енергію проростання (рис. 2). Встановлено, що енергія проростання насіння, обробленого водопровідною водою (контроль), становить 72 %. Обробка насіння біостимулятором забезпечує підвищення енергії проростання насіння на 25 % порівняно з контролем.

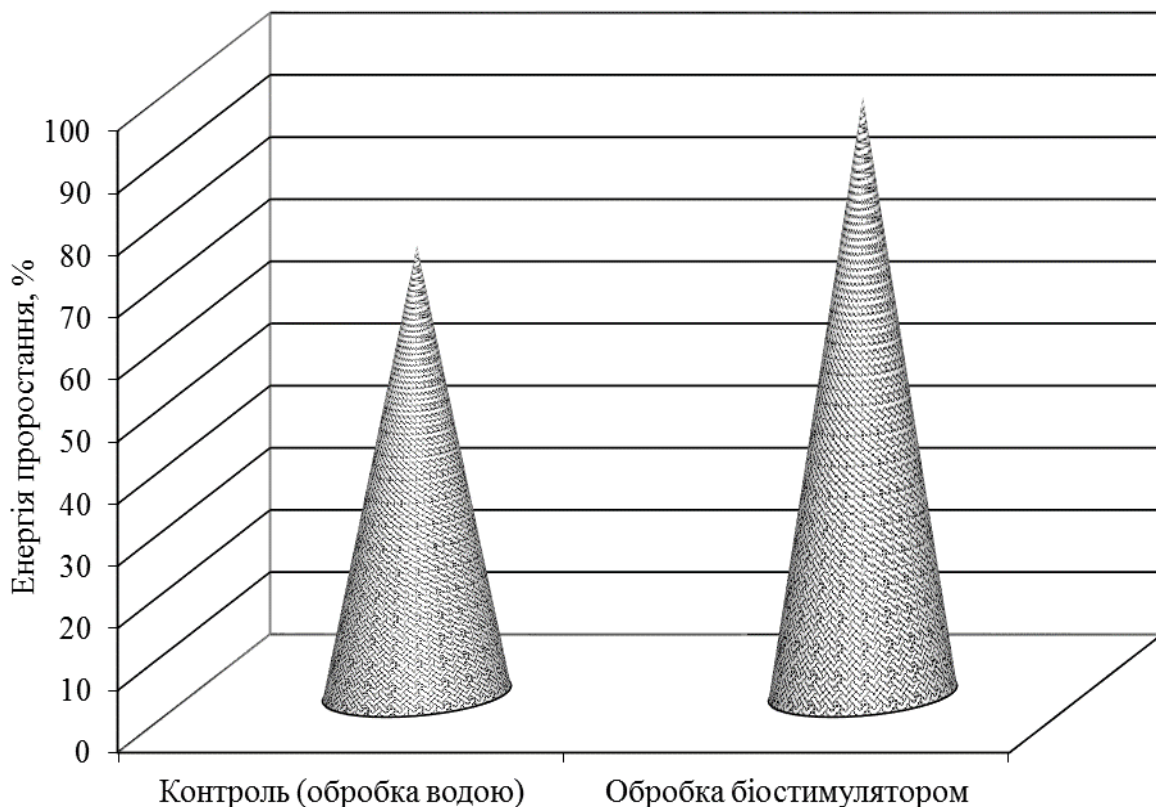


Рис. 2. Енергія проростання насіння залежно від обробки насіння біостимулятором росту рослин (середнє за 2016–2019 рр.)

У період проведення лабораторного дослідження постійно проводили спостереження за ростом і розвитком проростків, вимірюючи довжину корінців та висоту сходів (рис. 3–4).

За результатами досліджень встановлено, що у контрольному варіанті на 10 добу довжина корінців у середньому становила 2,4 см. За обробки насіння газонних трав біостимулятором довжина корінців збільшувалася

у 1,5 раза порівняно з контролем (рис. 3). Висота сходів у контролі на 10 добу становила у середньому 6,2 см. Обробка насіння газонних трав біостимулятором сприяє збільшенню висоти сходів на 28 % порівняно з контролем (рис. 4). Отже, можна зробити висновок, що застосування розчинів зброженої анаеробної біомаси забезпечує стимулювання проростання насіння.

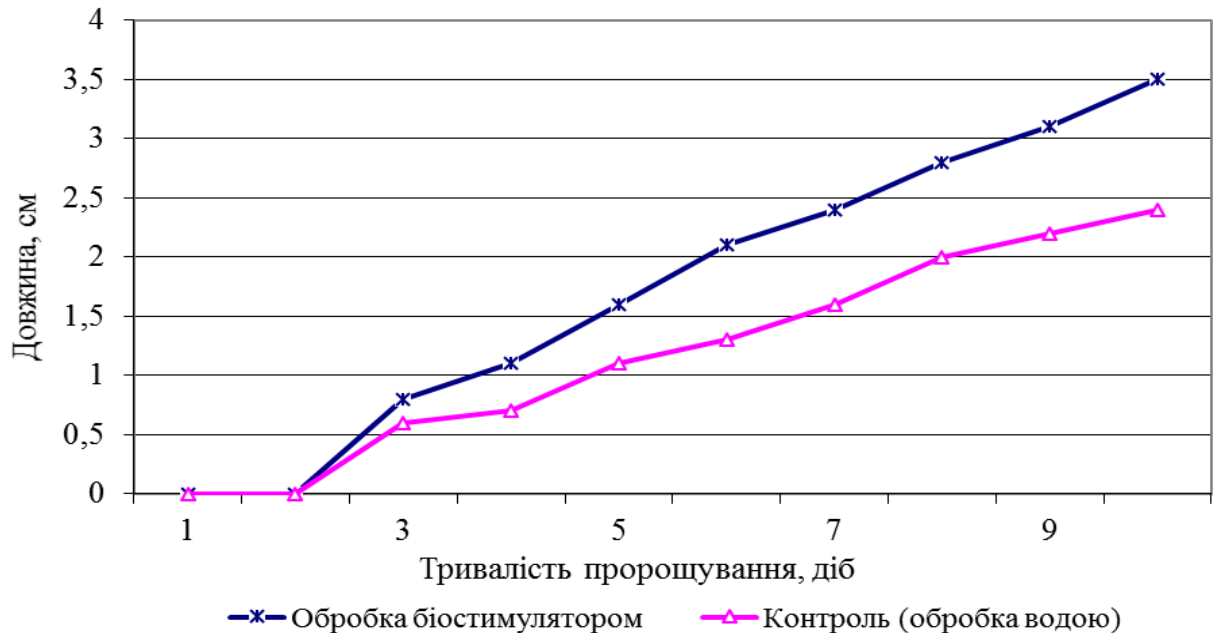


Рис. 3. Довжина корінців залежно від обробки насіння біостимулятором росту рослин (середнє за 2016–2019 рр.)

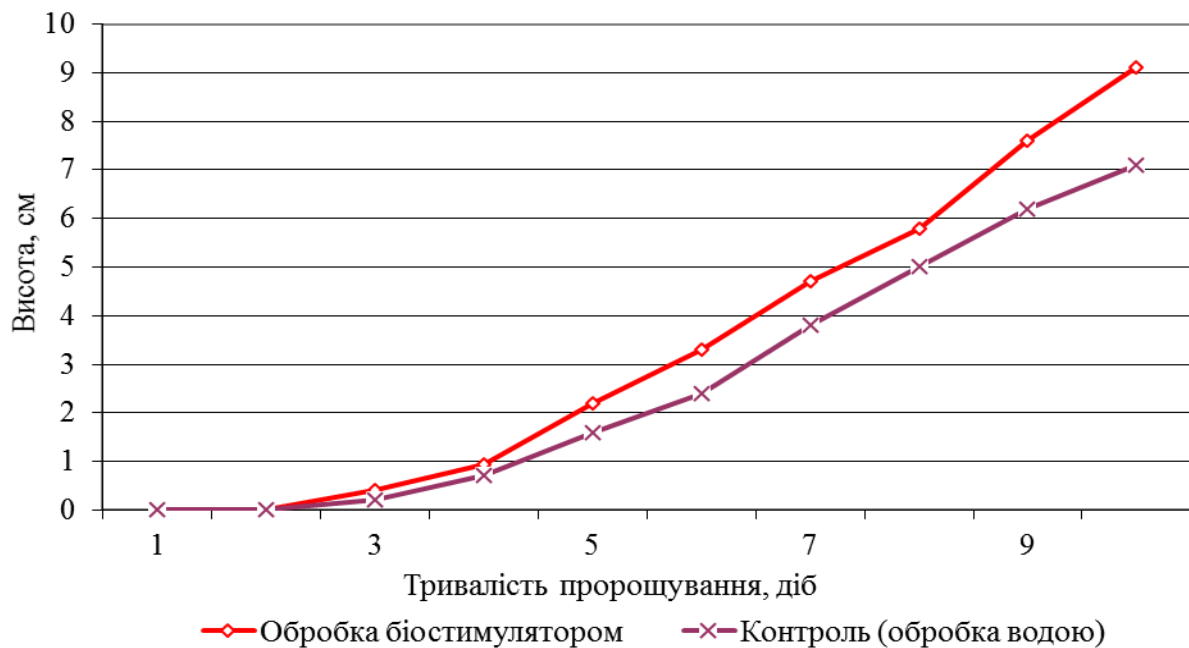


Рис. 4. Висота сходів залежно від обробки насіння біостимулятором росту рослин (середнє за 2016–2019 рр.)

Висновки

1. Метанова ферментація опалого листя забезпечує утилізацію даного виду рослинних відходів та отримання біогазу до 350 дм³ з 1 кг сухих речовин. Високий вміст метану (до 65 %) в утвореній біогазовій суміші свідчить про можливість використання останньої як альтернативного джерела енергії.

2. Зброджена біомаса, що утворюється в результаті метанової ферментації опалого листя, може використовуватися для стимулювання росту і розвитку рослин. Енергія проростання за обробки насіння біостимулятором підвищується на 25 % порівняно з контролем.

References

- Binkovska, H. V. & Shanina, T. P. (2015). Vidkhody roslynnytstva u silskomu hospodarstvi Odeskoi oblasti: perspektyvy dlia vyrobnytstva biohazu [Agricultural plant residues in the Odessa oblast: perspectives for biogas production]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal*, 16, 107–112. doi: <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.14>. [in Ukrainian].
- Bublienko, N. O., Semenova, O. I., Zhylyk, A. V., Semenova, O. A. & Tymoshchuk, T. M. (2016). Biokonversiiia roslynnykh vidkhodiv silskoho hospodarstva iz zastosuvanniam metanovoi fermentatsii [Bioconversion of vegetable waste agriculture using methane fermentation]. *Visnyk Zhytomyrskoho natsionalnoho ahroekologichnoho universytetu*, 2 (56), 1, 31–37 [in Ukrainian].
- Derzhavni sanitarni normy ta pravyla utrymattia terytorii naselenykh mist [State sanitary rules and rules for maintaining the territories of settlements]. № 145. (2011). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0457-11> [in Ukrainian].
- Drukovanyi, M. F. & Dyshkant, L. V. (2013). Tekhnologichna liniia po vyrobnytstvu biohazu ta biolohichnykh orhanichnykh dobryv dlia vyroshchuvannia ekolohichno chystoi silskohospodarskoi produktsii [Technological lines on payment of biogas and biological organic fertilizer for grown environmentally clean agricultural products]. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovyykh buriakiv*, 19, 139–143 [in Ukrainian].
- Dyakonov, V. I., Dyakonov, O. V., Skrypnyk, O. S. & Nikitchenko, O. Y. (2016). Ekoloho-ekonomichni pytannia utylizatsii opaloho lystia na terytoriiakh mista [Economic and ecological issues of utilization fallen foliage in city]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 129, 51–55 [in Ukrainian].
- Grando, R. L., Antune A. M., Fonseca F. V., Sanchez A., Batrena R. & Font X. (2017). Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 44–53. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.079>.
- Hengeveld, E. J., Bekkering, J. & van Gemert, W. J. T. (2016). Biogas infrastructures from farm to regional scale, prospects of biogas transport grids. *Biomass and Bioenergy*, 86, 43–52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.005>.
- Henning, H., Krautkremer, B. & Hartmann, K. (2014). Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 383–393. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.085>.
- Hrubnyk, A. V., Kostohryz, A. P. & Martynuk, K. S. (2017). Doslidzhennia efektyvnosti vykorystannia lystianoї biomasy zelenykh nasadzhen mist yak dzherela enerhii [Research of efficiency of the use of leafy biomass of green plantations of cities as energy source]. *Visnyk KhNTU*, 4 (63), 39–43 [in Ukrainian].
- Hrubnyk, O., Podolskyi, M. & Lilevman, I. (2019). Obgruntuvannia mozhlyvosti vykorystannia lystianoї biomasy ta roslynnykh vidkhodiv dlia enerhozabezpechennia u silskomu hospodarstvi [Background of use hardwood biomass and plant waste for energy supply in agriculture]. *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprovuvannia novoi tekhniki i tekhnologii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*, 24 (38), 360–368. doi: [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24\(38\)-37](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24(38)-37) [in Ukrainian].
- Hrytsai, A. H. & Masliukova, Z. V. (2019). Otsinka enerhetychnoho potentsialu biohazu Ukrainy [An estimation of the energy potential of biogas of Ukraine]. *Scientific horizons*, 10 (83), 63–58. doi: 10.33249/2663-2144-2019-83-10-58-63 [in Ukrainian].
- Kozak, K. V. & Okhota Yu. V. (2018). Osnovni tendentsii efektyvnoho vykorystannia biohazu v Ukraini [The main trends of efficient use of biogas in Ukraine]. *Efektivna ekonomika*, 4. Retrieved from http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2018/162.pdf [in Ukrainian].
- Makarenko, N. A., Bondar, V. I. & Borshch, H. M. (2014). Ekotoksikologichna otsinka biodobryv

(produktiv fermentatsii biohazovoi ustanovky) na predmet yikh vidpovidnosti vymoham orhanichnoho vyrobnytstva [Ecotoxicological assessment of biofertilizers, fermentation products, biogas plants for their compliance with organic production]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, 4, 20–24 [in Ukrainian].

Muravev, A. G. (2010). Rukovodstvo po opredeleniyu pokazateley kachestva vodyi polevyimi metodami [Guidelines for determining water quality indicators using field methods]. Sankt-Peterburg : Krismas [in Russian].

Popyk, O. V. (2014). Ekoloho-ekonomichni aspekty povodzhennia z opalym lystiam na urbanizovanykh terytoriiakh [Ecological and economic aspects fallen leaves treatment in urban]. *Ekonomichni innovatsii*, 58, 266–272 [in Ukrainian].

Razanov, S. & Tkachuk, O. (2015). Porivnyalnyi analiz vikidiv zabrudnyuyuchih rechovin u povitrya traditsiynymi energonosiyami ta riznymi vidami biopaliva [The comparative analysis of pollutant emissions is into the air by traditional energy and different types of biofuels]. *Sil'ske gospodarstvo ta lisivnytstvo*, 1, 152–160 [in Ukrainian].

Resuieva, N. Sh. (2015). Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv roslynnytstva dlia vyroblennia bioenerhii v Ukraini [Perspectives of using plant waste for generating bioenergy in Ukraine]. *Ekonomika: realiyi chasu*, 4 (20), 179–185 [in Ukrainian].

Sereda, L. & Cherniavskyi, M. (2013). Pererobka biomasy u mobilnii mashyni z otrymanniam biohazu

ta ridkykh biodobryv [Collecting biogas and liquid bio-fertilizers during biomass processing at mobile machine]. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovykh buriakiv*, 19, 158–162 [in Ukrainian].

Sonko, S. P., Pushkarova-Bezdil, T. M., Sukhanova, I. P., Vasylenko, O. V., Hurskyi, I. M. & Bezdil, R. V. (2017). Problema utylizatsii opaloho lystia mist i vidkhodiv tvarynnytskykh ferm ta shliakhy yii vyrishennia [The problem of utilization of felling leaves of cities and wastes of animal-farming farm and ways of its solutions]. *Problemy neoekolohii*, 1–2 (27), 143–154 [in Ukrainian].

Stepanenko, D. S. & Proskurnia, T. O. (2012). Dobuvannia ta utylizatsiia biohazu z vidkhodiv [Receiving and utilization of biogas from waste]. *Pratsi TDATU*, 9, 134–143 [in Ukrainian].

Tkachenko, T. V., Yevdokymenko, V. O., Kamenskykh, D. S., Filonenko, M. M., Vakhrin, V. V. & Kashkovskyi, V. I. (2018). Pererobka roslynnykh vidkhodiv riznoho pokhodzhennia [Processing vegetable waste of different origin]. *Nauka ta innovatsii*, 2, 51–66. doi: doi.org/10.15407/scin14.02.051 [in Ukrainian].

Zapalovska, A. & Bashutska, U. (2019). Vykorystannia silskohospodarskykh vidkhodiv u vyrobnytstvi enerhii iz vidnovliuvanykh dzherel [The use of agricultural waste for the renewable energy production]. *Naukovi pratsi Lisivnychoi akademii nauk Ukrainy*, 18, 138–144. doi: https://doi.org/10.15421/411914 [in Ukrainian].