

УДК 635.15:631.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.2.18>

ПОТЕНЦІАЛ БІОГАЗОВОЇ АНАЕРОБНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ ЛИСТОСТЕБЛОВОЇ МАСИ РЕДЬКИ ОЛІЙНОЇ ЗА ВЕСНЯНОГО СТРОКУ ЇЇ ВИРОЩУВАННЯ

Цицюра Я.Г. – к.с.-г.н.,

доцент кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії,

Вінницький національний аграрний університет

Сучасні тенденції до формування біорециклінгових систем енерго- та ресурсозабезпечення сільськогосподарського виробництва з огляду на забезпечення екологічної безпеки, запобігання ґрунтовій деградації та відповідності засадам кліматичної нейтральності зумовлюють формування дуальних систем використання сільськогосподарських культур за принципами багатокритерійності. Такі підходи зумовлюють застосування вирощеної агробіомаси культур на кормово-сидеральні, біоконсервуючі та біоенергетичні потреби агроландшафтів.

З огляду на такі принципи важливим є питання вивчення певних сільськогосподарських культур як джерела агробіомаси з відповідним агротехнологічним потенціалом для отримання біогазу як одного із стратегічних векторів Європейського зеленого курсу, який є одним із цілей сталого розвитку України. Враховуючи окреслену актуальність такого завдання у Вінницькому національному аграрному університеті проведено багаторічні дослідження щодо вивчення сформованої листостеблової маси редьки олійної весняного строку сівиби як сировини для анаеробної кооферментації для отримання біогазу. У дослідженнях було використано районований сорт редьки олійної Журавка за традиційної схеми конструювання агроценозу редьки олійної на кормо-сидеральні цілі (2,5 млн. шт./га схожих насінин з міжряддям 15 см на неудообреному фоні). У дослідженнях було застосовано рекомендовані, широкопробовані методики польового та лабораторного характеру як основних об'єктів рослин редьки олійної, так і з позиції проведення регламентів анаеробної кооферментації листостеблової маси у форматі модельного досліді із регульованими параметрами.

На основі проведених досліджень визначено параметричні та продуктивні показники процесу анаеробної ферментації листостеблової маси редьки олійної взятої у розрізі трьох основних феностадій її можливого агротехнологічного використання – бутонізації, цвітіння та зеленого стручка, а також проведено системний кореляційний аналіз для детермінації основних чинників, які визначають потенційну біометанову продуктивність процесу. При цьому встановлено, що оптимальною фенологічною фазою для відбору листостеблової маси для отримання біогазу з редьки олійної є фаза цвітіння (ВВСН 64–67 з потенційно можливим технологічним розширенням у межах ВВСН 59–71) із досяжним середньобагаторічним рівнем біогазової продуктивності 325,9 л_N/кг органічної сухої речовини при середній концентрації метану на рівні 54,4%, тривалості періоду напіврозпаду листостеблової маси (t_{50}) 4,8 діб за лаг періоду (λ) 1,8 доби. При цьому оптимізація процесу біогазової продуктивності буде мати місце за таких гідротермічних параметрів від фази сходів до фази цвітіння: ГТК > 1,5 при середньодобовій температурі в інтервалі 12–17 °С та сумі опадів > 200 мм.

Ключові слова: редька олійна, анаеробна ферментація, біогаз, гідротермічні показники вегетації, питомий вихід біогазу.

Tsytsiura Ya.G. Potential of biogas anaerobic fermentation of oilseed radish leaf and stem mass in spring term of its cultivation

Modern trends towards the formation of biorecycling systems for energy and resource supply of agricultural production in terms of ensuring environmental safety, preventing soil degradation and compliance with the principles of climate neutrality lead to the formation of dual systems of crop use based on the principles of multicriteria. Such approaches lead to the use of the grown agrobiomass of crops for fodder and green manure, bioconservation and bioenergy needs of agricultural landscapes.

In view of these principles, it is important to study certain crops as a source of agrobiomass with the appropriate agro-technological potential for biogas production as one of the strategic vectors of the European Green Deal, which is one of the goals of Ukraine's sustainable development. Given the outlined relevance of this task, Vinnytsia National Agrarian University has conducted long-term research on the study of formed leaf-stem mass of oil radish of spring sowing as a raw material for anaerobic cofermentation for biogas production. In the research, the zoned oil radish variety 'Zhuravka' was used according to the traditional scheme of designing the agroecosis of oil radish for fodder-sideral purposes (2.5 million pcs./ha of similar seeds with a row spacing of 15 cm on an unfertilized background). In the research, the recommended, widely tested methods of field and laboratory character were used both for the main accounting of oil radish plants and for the regulation of anaerobic cofermentation of leaf-stem mass in the format of a model experiment with adjustable parameters.

On the basis of the conducted research, the parametric and productive indicators of the process of anaerobic fermentation of oil radish leaf mass taken in the context of three main phenostages of its possible agrotechnological use – budding, flowering and green pod – were determined, and a systematic correlation analysis was carried out to determine the main factors that determine the potential biomethane productivity of the process. It was found that the optimal phenological phase for the selection of leaf-stem mass for biogas production from oil radish is the flowering phase (BBCH 64-67 with a potentially possible technological expansion within BBCH 59-71) with an achievable average long-term biogas productivity of 325,9 lN/kg of organic dry matter at an average methane concentration of 54.4%, the half-life of the leaf-stem mass (t_{50}) is 4.8 days with a lag period (λ) of 1.8 days. At the same time, the optimization of the biogas productivity process will take place under the following hydrothermal parameters from the germination to the flowering phase: $HTC > 1.5$ at an average daily temperature in the range of 12–17 °C and precipitation > 200 mm.

Key words: oilseed radish, anaerobic fermentation, biogas, hydrothermal parameters of vegetation, specific methane yield.

Постановка проблеми. Виклики для України щодо змін клімату, доступності технологій та енергоресурсів, посилення темпів деградації ґрунтового покриву, погіршення екологічної ситуації внаслідок російської агресії – негативно впливають на АПК. Це реальна загроза продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки [1, с. 7]. У цьому плані перспективними є технології поліцільового вирощування основних сільськогосподарських культур як на реалізацію основного цільового призначення відповідної сільськогосподарської культури, так і на реалізацію супутніх цілей можливого їх застосування у різних галузях [2, с. 2]. Основним завданням таких технологій має бути вирощування і застосування основної та побічної продукції традиційних та нетрадиційних біоенергетичних культур для одночасного застосування при виробництві повного спектру біопалив (біогаз, біоетанол, біодизель) та супутнього їх використання у технологіях сидерації, фітореMediaції та різноваріантних систем органічного удобрення [3, с. 63–64]. Для реалізації цих завдань важливим є добір культур із високим потенціалом багатоцільового використання з придатністю до застосування у комбінованих біоенергетичних та біоорганічних технологіях, що відповідає загальним засадам Європейського зеленого курсу [4, с. 3]. Особливе місце у таких біоорганічних варіантах технологій для реалій України, з огляду на дослідження [5, с. 479–480; 6, с. 161–162], має належати вторинним продуктам біогазової переробки вирощеної агробіомаси, що дозволяє формувати замкнуті біорециклінгові структури як з альтернативного енергоспоживання, так із огляду на потенційні можливості альтернативного біоорганічного удобрення. Такий підхід вимагає культивування в основному строковому або ж проміжному сільськогосподарських культур з відповідним ґрунторєабілітаційним потенціалом з однієї сторони та біоенергетичним потенціалом з іншої [7, с. 1686]. Це в свою чергу ставить реальні завдання щодо оцінки оптимальної ідіотипної моделі агробіомаси біоенергетичних культур

та факторів що її визначають, моделювання біоенергетичного потенціалу культур залежно від варіантів технологій та визначення головних компонент його формування [7, с. 1687; 8, с. 2–3].

З огляду на ці висновки важливим і актуальним буде оцінка культур із вираженим сидераційним та біофумігаційним потенціалом, оскільки це дозволить сформувати комбіновані технологічні рішення як з позиції поступового заміщення частки мінеральних добрив на біоорганічні (сидераційні) варіанти, так і сформує передумови для формування біоенергетичної бази з кінцевою метою гарантування енергетичної безпеки сільських територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання біогазової продуктивності хрестоцвітих культур є питанням на сьогодні дискусійним. Відмічається [8, с. 7–9], що біомаса хрестоцвітих культур має високий потенціал біогазової продуктивності, проте базові елементи її ефективного використання потребують деталізації та вивчення у різних ґрунтово-кліматичних зонах.

Встановлено і досить варіативний інтервал виходу біогазу із біомаси ряду хрестоцвітих культур [9, с. 392–394; 10, с. 249–250], що вказує на складний характер процесу анаеробної дигестації агробіомаси хрестоцвітих культур та поліфакторний характер формування даного показника.

Визначено також, що для хрестоцвітих культур рівень біогазової продуктивності коливається у широких межах і відповідно до систематизації та узагальнення даних за різні роки та періоди досліджень [7, с. 1691; 11, с. 26–30; 12, с. 287–288] знаходиться на рівні від 204 до 474 літрів біометану (CH₄) на кг органічної сухої речовини (ОСР).

Відмічається також, що біогазова продуктивність біомаси хрестоцвітих потребує додаткового вивчення, враховуючи виявлені впливи на цей процес за такими чинниками як гідротермічні умови вегетації культур, строки вирощування маси, біохімічний склад її сформований за період росту і розвитку та власне характеру анаеробної ферментації з огляду на застосовані способи, інструментарій та режими [13, с. 3–5; 14, с. 419–420; 15, с. 195–197].

Повідомляється також, що незважаючи до визначеного статусу хрестоцвітих видів рослин як таких, що володіють потенційно високим рівнем біогазової продуктивності, продовження подальших досліджень у плані деталізації територіальних особливостей використання окремих видів хрестоцвітих рослин з позиції їх біоенергетичної ефективності, зокрема за використання свіжої листостеблової маси без попередньої силосної ферментації [16, с. 302–303; 17, с. 2–3].

У цьому плані типового представника хрестоцвітої групи рослин – редьку олійну (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) – віднесено до культур саме багатопільового використання [18, с. 3–5; 19] (корми, насіння, сидерація, біопаливо, біогаз, системи консервуючого біоорганічного землеробства) та внесено до переліку перспективних у питаннях однокомпонентного та полікомпонентного використання для процесів отримання біогазу зі свіжої біомаси рослин [11, с. 25–27; 20, с. 2–3].

Вказані узагальнення попереднього періоду досліджень підкреслюють актуальність наших вивчень з позиції перспектив біорециклінгово застосування редьки олійної у системі сидераційно-біогазового її застосування як поліфункціональної покривної культури для умов стійкого та нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України.

Метою дослідження було дослідити біогазову продуктивність листостеблової маси редьки олійної та оцінити вплив на цей показник системи чинників

гідротермічного та агротехнологічного характеру для формування загальної оцінки та потенціалу редьки олійної у системі біорециклінгових технологій біоенергетичного та біоорганічного спрямувань.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводились впродовж 2020–2024 рр. на дослідному полі Вінницького національного аграрного університету (N 49°11'31", E 28°22'16"). Грунтовий покрив дослідних ділянок був представлений сірими лісовими ґрунтами із середньозваженим вмістом гумусу 2,68% легкогідролізованого азоту 81.5 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору 176.1 мг/кг ґрунту та обмінного калію 110.8 мг/кг ґрунту при рівневі рН_{кел} 5.8.

Для досліджень було використано сорт редьки олійної Журавка. Для можливості оцінки застосування вирощеної біомаси одночасно на сидераційні та біоенергетичні потреби припосівне конструювання агроценозу культури було проведено за вимогами формування сидеральних посівів редьки олійної за норми висіву 2,5 млн схожих насінин/га звичайним рядковим способом на неудобреному фоні з міжряддям 15 см. Строки сівби ранньовесняні (перша–друга декада квітня). Попередник горох.

Для контролю бур'янів у фазу розетки (ВВСН 20–22) було використано суміш гербіцидів Галера 334, в.р. (клопіралід, 267 г/л + пиклорам, 67 г/л), 0,3 л/га та Селект, к.е. (клетодим, 120 г/л), 0,7 л/га. Для контролю хрестоцвітих блішок (*Phyllotreta atra* F., *Phyllotreta nemorum* L., *Phyllotreta undulata* Kutsch, *Phyllotreta nigripes* F.) у фазу сім'ядолей–перших справжніх листків (ВВСН 10–12) застосовано Блискавку, к.е. (альфациперметрин 100 г/л) 0,2 л/га.

Комбінування дослідних ділянок було проведено у чотирьохразовій повторності способом дрібноділянкової рендомізації (загальна площа ділянки 35 м² облікова площа ділянки 25 м²). Базові спостереження та обліки проводились відповідно до базових рекомендацій для хрестоцвітих культур [21, с. 10–31]. Фенологічну періодизацію розвитку рослин проводили відповідно до шкали ВВСН [22, с. 15–16].

Облік надземної біомаси рослин проводили на фази: бутонізації (ВВСН 50–53), цвітіння (ВВСН 64–67) та зеленого стручка (ВВСН 73–75) у 4 рендомізованих ділянках методом пробних майданчиків площею 1 м² у кожному повторенні (16 ділянок у підсумку) з наступним зважуванням. Перед зважуванням та наступними польовими і лабораторними маніпуляціями із пробних снопів видалялись будь-які іншovidові домішки рослин.

Вміст сухої речовини та органічної сухої речовини у сформованій надземній масі визначали шляхом висушування в сушильній шафі за температури 105 °С, а потім озолення висушеного зразка за температури 550 °С [24, с. 103].

У лабораторних процедурах аналізу враховувались базові рекомендації щодо біохімічного аналізу кормів з врахуванням європейських стандартів відповідно до [23, с. 15–30; 24, с. 101–130]. Зокрема визначались наступні показники:

- вмісту загального азоту (ЗА) за методом К'ельдаля (на аналізаторі KjeLROC Kd-310 (ISO 17025));

- вміст загального органічного вуглецю (ЗОВ) із використанням аналізатора загального органічного вуглецю ТОС-LСРН (за стандартним протоколом);

- співвідношення С/Н розраховувалося як відношення вмісту загального органічного вуглецю до вмісту загального азоту.

Оцінка гідротермічних умов періоду вегетації редьки олійної проводилась на основі калькуляції суми опадів, середньодобової температури, середньої відносної вологості повітря, гідротермічного коефіцієнту (ГТК), та коефіцієнту зволоження

(K_3) (рівняння 1–3) на основі щодобових показників у інтервалі від повних сходів до фіксації визначених фенологічних фаз бутонізації, цвітіння та зеленого стручка.

$$ГТК = \frac{\sum R}{0.1 \times \sum t_{>10}} \quad (1)$$

де: $\sum R$ – сума опадів (мм) за період з температурою вище 10 °С, $\sum t_{>10}$ – сума ефективних температур за той же період.

$$K_3 = \frac{P}{E}, \quad (2)$$

де: K_3 – коефіцієнт зволоження; P – сума опадів за аналізований період, мм; E – випаровуваність за аналізований період (яку розраховували відповідно до рівняння 4), мм.

$$E = 0,0018 \times (25 + t)^2 \times (100 - a), \quad (3)$$

де: E – випаровуваність рослин для певного періоду, мм; t – середня температура повітря за період °С; a – середня вологість повітря за період, %.

Технологія анаеробної ферментації була використана в дослідженні на основі методичних рекомендацій [11, с. 24–25].

Для анаеробного зброджування біогазу використовували скляні посудини об'ємом 1 л. Як субстрат використовували масу рослин редьки олійної, подрібнену та підготовлену згідно з рекомендаціями [25, с. 45] для імітації механічного збирання листостеблової частини рослин при підготовці сидерату під оранку.

Як інокулят використовували дигестат з такими середніми хімічними показниками: рН $8,2 \pm 0,3$; сухої речовини $2,5 \pm 0,7\%$; N $2,9 \pm 1,2$ г/кг; NH_4-N $2,3 \pm 0,7$ г/кг; органічні кислоти $1,7 \pm 0,5$ г/кг; загальний органічний вуглець $32,8 \pm 2,7\%$ від сухої речовини; загальний азот $1,64 \pm 0,39\%$ від сухої речовини; співвідношення C/N $20 \pm 2,5$. Співвідношення субстрату до інокуляту підтримували на рівні 5 (за вмістом сухої речовини) в усі роки досліджень відповідно до рекомендацій та методичних підходів до анаеробного зброджування хрестоцвітих рослин та інокуляту [26, с. 2–3].

Підтримували постійну температуру інкубації на рівні $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5$ з інкубаційним періодом 60 діб. Активне струшування посудин проводили один раз на добу в один і той самий час. Біогаз, що утворювався протягом інкубаційного періоду, збирали у газові лічильники та реєстрували за стандартною процедурою витіснення підкисленого насиченого бар'єрного розчину $NaCl$ [27, с. 70–72]. Об'єм біогазу визначали щодня, коригували з урахуванням контрольного варіанту та нормалізували до стандартних умов (сухий газ, 0 °С, 1013 гПа) [28, с. 195–196].

Склад біогазу на вміст метану вимірювали за допомогою портативного газоаналізатора, оснащеного інфрачервоними датчиками (Mobile Biogas analyser H_2S , CH_4 , CO_2 , O_2 , Multi Instruments Analytical, Нідерланди) в комбінації з реєстрацією емісії газу (датчик газу метану MQ-4 з платою Arduino AVR Pic). У системі детермінації базових показників біометанової емісії (за міжнародною протокольною аббревіатурою) було застосовано стандартні показники оцінки інтенсивності процесу відповідно до [11, с. 24–25]:

– питомий вихід метану (SMY) визначали шляхом ділення об'єму газу на масу доданого субстрату (в органічній сухій речовині) [29, с. 2–3];

– лаг період (λ) визначався як період від початку тесту анаеробного зброджування до початку виділення метану, зафіксований у годинах і згодом перерахований у дні з перерахунком на добу тривалістю 24 години [29, с. 2–3];

– період напіврозпаду (t_{50}) визначався на основі інтерпретації модифікованих рівнянь Гомперца як час, коли досягається 50% максимального питомого виходу метану (діб) [29, с. 2–3].

Ступінь інтегрального зв'язку з основними показниками базових факторів системи дослідження оцінювали застосуванням загальної схеми парного кореляційного аналізу із формуванням відповідної кореляційної матриці та за значенням коефіцієнта детермінації зв'язку (рівняння 3):

$$d_{yx} = r_{ij}^2 \times 100, \quad (3)$$

де r_{ij} – коефіцієнт кореляції між i -м та j -м показником.

Статистичну обробку отриманих даних проводили за загальноприйнятими методами варіаційної статистики та застосування принципів статистичної різниці за результатами порівняння при допомозі тесту Тьюкі з поправкою Бонферроні [25, с. 12–32] у середовищі статистичної програми Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, США).

Виклад основного матеріалу дослідження. Результати оцінки загальної біопродуктивності редьки олійної засвідчили істотну відмінність основних її складових залежно від гідротермічних умов періоду вегетації у розрізі облікових фенологічних фаз (табл. 1).

При цьому загальна урожайність листостеблової маси мала сталу тенденцію до зростання від фази бутонізації до фази зеленого стручка в силу загальних закономірностей росту біопродуктивності рослин в ході стадійного органогенезу. Слід відмітити різні рівні варіативності цього показника для різних фенологічних фаз. Так на фазу бутонізації міжрічне варіювання (у значенні коефіцієнта варіації) було на рівні 23,1%, на фазу цвітіння – 20,8% а на фазу зеленого стручка 27,3%.

Такий характер мінливості позитивно узгоджується із аналогічним рівнем мінливості за основними гідротермічними параметрами періоду вегетації у досліджуваній період. Так для середньодобової температури повітря міжрічна варіативність на фазу бутонізації становила 10,1%, а для суми опадів 42,6%. На фазу цвітіння вказані показники були на рівні 8,7% та 20,3%, а на фазу зеленого стручка – 4,9 та 24,7% відповідно. З огляду на показники температури та суми опадів туж тенденцію мали похідні від них показники ГТК та коефіцієнту зволоження (K_3).

На підставі такого характеру розподілу гідротермічних ресурсів основна детермінанта реалізації біопродуктивності редьки олійної була сформована вже на стадії міжфазного періоду сходи–бутонізації.

Сам рівень біопродуктивності рослин редьки олійної з огляду на досяжний її потенціал на території зони досліджень [18, с. 19–20] відповідав градації середнього рівня (19–34 т/га листостеблової маси при 2,7–4,7 т/га даного показника у сухій речовині) та з огляду на окреслену варіативність гідротермічних умов залежав від них. За цим параметром у багаторічній оцінці редьку олійну можна віднести до культур з високою біопродуктивністю що з огляду на обсяги сформованої листостеблової маси дозволяє віднести її до культур хрестоцвітої групи із теоретично високим потенціалом для анаеробної ферментації, що підтверджує висновки інших дослідників [7, с. 1690; 9, с. 391; 11, с. 31–33]. Слід також зауважити, що було підтверджено закономірну тенденцію до зростання вмісту сухої речовини із рівня 10–12% на фазу бутонізації до 14–15% на фазу зеленого стручка за адекватного зниження вмісту сухої органічної речовини на 2,5–5% з огляду на процеси фізіологічного старіння рослин, що відобразилось на величинах

трансформації сирої та сухої маси рослин на різних стадіях їх фенологічного розвитку та з огляду на дослідження [12, с. 287; 13, с. 2–3] потребуватиме вивчення оптимального феностадійного періоду для реалізації вимог ефективною біометанової продуктивності.

Таблиця 1

Основні параметри аналізу біопродуктивності редьки олійної на різні фенофази розвитку, 2020–2024 рр.

Рік	За період від сходів до даної феностадії					Сформована листостеблова маса, т/га	Сформована маса у сухій речовині т/га	ЗА, % на абсолютно суху речовину	ЗОВ, % на абсолютно суху речовину	Співвідношення С/Н
	Середньодобова температура повітря, °С	Сума опадів, мм	ГТК	Коефіцієнт зволоження (К _з)	Тривалість, дів					
фаза бутонізації (ВВСН 50–53)										
2020	11,5	166,9	4,02	1,93	40	21,55	2,26	2,35	37,47	15,94
2021	11,8	129	3,04	1,61	38	16,21 ^a	1,91 ^a	2,48 ^d	38,44 ^b	15,50
2022	13,9	72,3	1,17	0,85	35	14,52 ^a	1,87 ^a	2,89 ^b	39,15 ^a	13,55
2023	12,8	87,2	1,38	1,75	36	15,89 ^a	1,92 ^a	3,01 ^a	38,91 ^a	12,93
2024	14,5	60,7	0,95	0,67	32	11,39 ^a	1,53 ^a	2,61 ^c	40,14 ^a	15,38
фаза цвітіння (ВВСН 64–67)										
2020	13,5	256,8	3,34	3,01	57	30,88	3,93	2,27	40,09	17,75
2021	13,2	216,3	2,87	2,79	55	24,12 ^a	2,85 ^a	2,04 ^c	37,95 ^a	18,67
2022	15,2	176,9	2,04	2,09	51	21,18 ^a	2,81 ^a	2,33 ^d	38,44 ^a	16,59
2023	14,8	152,6	1,55	1,09	50	24,48 ^a	3,20 ^b	2,72 ^b	38,89 ^b	14,34
2024	16,3	186,5	2,01	1,86	56	16,26 ^a	2,58 ^a	2,19 ^d	39,22 ^c	17,91
фаза зеленого стручка (ВВСН 73–75)										
2020	16,0	354,0	2,77	3,84	82	34,25	4,73	1,39	41,03	29,52
2021	16,6	259,3	1,95	2,84	78	30,19 ^a	4,08 ^b	1,27 ^b	40,56 ^c	31,94
2022	17,3	251,9	1,84	2,74	76	26,28 ^a	3,84 ^a	1,31 ^d	40,77 ^d	31,12
2023	17,5	174,4	1,49	1,63	73	27,37 ^a	4,24 ^c	1,23 ^a	41,32 ^d	33,59
2024	18,9	251,7	1,66	2,21	77	19,15 ^a	2,74 ^a	1,27 ^b	40,38 ^c	31,80

***Рівні значущості для кожної феностадії порівняно з 2020 роком для наступних рівнів статистичної значущості (за тестом Тьюкі з поправкою Бонферроні): a – 0,1%; b – 1%; c – 5%; d – немає різниці.*

Разом із тим результати біохімічної оцінки отриманої листостеблової маси підтверджують належність культури до високопротеїнової групи (середній вміст загального азоту більше 2% на абсолютно суху речовину) із чіткою динамікою зниження показника у ході дозрівання рослин. Це створює передумови для сталого зростання показника співвідношення С/Н із 12–15 до 29–33 із міжрічним варіюванням на рівні 8,5–11,2%. Із врахуванням того, що оптимум співвідношення С/Н для різних варіантів біогазової анаеробної ферментації сирої листостеблової маси у кооферментації з інокулюмом знаходиться на рівні 18–22 одиниць [17, с. 3–4;

20, с. 4–5] слід прогнозовано очікувати максимальну біогазову продуктивність редьки олійної у міжфазний період початку цвітіння (ВВСН 58–61) – початку фази зеленого стручка (ВВСН 68–71).

При цьому встановлене зростання загального вмісту органічного вуглецю (ЗОВ) у середньому на 2,0% (із 38,8% до 40,8%) у співставленні фази бутонізації та фази зеленого стручка підтверджує наявність біохімічних змін викликаних стадійним дозріванням рослин та підвищенням вмісту целюлозопохідних тканинних структур рослини.

Зроблені вище узагальнення було підтверджено результативними показниками біогазової продуктивності анаеробної біоферментації листостеблової маси редьки олійної на різних феностадіях розвитку (табл. 2).

За аналогією із біопродуктивністю визначена біогазова продуктивність залежала від фенологічної бази відбору листостеблової маси рослин та відповідно від гідротермічних умов вегетації у період від сходів рослин до відбору зразків.

Таблиця 2

Характеристики виробництва біометану з маси редьки олійної залежно від строку сівби (у міжнародній аббревіатурі показників), 2020–2024 рр.

Рік	Вміст метану (%)		Питомий вихід метану (SMY) (** t_{N} /кг органічної сухої речовини (ОСР))		t_{50} (діб)		Лег період (λ) (діб)	
	\bar{x}	SD*	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
фаза бутонізації (ВВСН 50–53)								
2020	55,95	3,54	309,94	11,55	3,57	0,32	1,08	0,17
2021	52,24 ^c	2,89	301,28 ^d	12,24	3,74 ^d	0,35	1,29 ^b	0,15
2022	51,09 ^b	3,11	291,85 ^b	11,88	3,96 ^c	0,38	1,36 ^b	0,19
2023	50,31 ^a	4,25	278,59 ^a	13,24	4,22 ^b	0,41	1,55 ^a	0,18
2024	52,67 ^b	5,11	306,98 ^d	12,97	3,67 ^d	0,32	1,34 ^b	0,19
фаза цвітіння (ВВСН 64–67)								
2020	54,78	7,24	330,28	10,06	5,15	0,42	1,58	0,19
2021	55,84 ^{b**}	9,39	359,25 ^c	11,24	4,12 ^b	0,34	1,74 ^c	0,17
2022	53,82 ^c	8,02	302,29 ^a	12,52	4,38 ^c	0,47	1,82 ^b	0,15
2023	53,46 ^c	7,08	288,44 ^a	13,47	5,11 ^d	0,52	1,85 ^b	0,11
2024	54,19 ^c	8,09	349,27 ^b	11,88	5,07 ^d	0,43	1,77 ^c	0,18
фаза зеленого стручка (ВВСН 73–75)								
2020	55,81	4,18	258,07	9,17	4,77	0,42	2,81	0,24
2021	51,91 ^b	5,22	239,48 ^b	10,21	4,93 ^b	0,39	3,02 ^b	0,28
2022	54,17 ^d	5,59	244,39 ^b	11,22	4,86 ^d	0,45	2,79 ^d	0,32
2023	50,22 ^c	5,63	211,39 ^a	12,51	5,19 ^a	0,44	3,08 ^b	0,39
2024	52,18 ^c	5,63	241,77 ^b	10,69	4,89 ^d	0,35	2,91 ^c	0,25

*SD – стандартне відхилення для порівняння масивів варіантів; ** – рівні значущості для кожної феностадії порівняно з 2020 роком для наступних рівнів статистичної значущості (за тестом Тьюкі з поправкою Бонферроні): a – 0,1%; b – 1%; c – 5%; d – немає різниці; *** – індекс N нормалізований об'єм газу на стандартні умови (сухий газ, 0 °C, 1013 гПа).

Це підтверджується як міжрічними варіюваннями показника у розрізі відповідних фенофаз на рівні 7,1–15,8% так і середнім багаторічним показником питомого виходу метану (SMY). Зокрема, для фенофази бутонізації (ВВСН 50–53) середнє значення показника було на рівні 297,7 л_N/кг_{оср}, для фази цвітіння (ВВСН 64–67) 325,9 л_N/кг_{оср}, а для фази зеленого стручка (ВВСН 73–75) – 239 л_N/кг_{оср}. Отриманий рівень позитивно співвідноситься з цифрами оцінки біогазової продуктивності з біомаси редьки олійної за рядом європейських оцінок [7, с. 1688; 11, с. 27–29; 12, с. 289–290; 28, с. 198–200] у зонах достатнього зволоження із ГТК на рівні 1,5–2,5 та суми опадів за період від сходів до фази зеленого стручка на рівні 315–380 мм. Якщо оцінювати даний показник з позиції загального рейтингу серед інших культур [11, с. 30–31] то потенціал редьки олійної за питомим виходом метану слід оцінити як високий ыз входженням даної культури у двадцятку культур перспективних для багатоцільового використання як з позиції сидерального застосування у системі біоорганічних технологій, так і з позиції біоенергетичного застосування для анаеробної ферментації. Дискусійним питанням з огляду на дослідження [11, с. 32–33; 26, с. 3–4; 29, с. 3–4] о формування регламентів самого процесу такої ферментації саме для редьки олійної, що є предметом подальших досліджень та наукових узагальнень.

З цієї позиції важливим є відмітити певні особливості процесу анаеробної ферментації литостеблової маси на підставі визначених супутніх параметрів цього процесу. Так концентрація метану коливалась у середньобагаторічному вимірі від мінімального значення у 52,5% для фази бутонізації до максимального значення 54,4% на фазу цвітіння. Для інших хрестоцвітих культур таких як ріпак ярий та озимий, різні види гірчиць (на підставі [11, с. 31] цей показник був у межах від 57,6–62,8%. Такий характер свідчить про середні темпи розкладу біомаси редьки олійної та наявність певних інгібіторів такого процесу, що створює передумови до подовження загального продуктивного періоду анаеробної ферментації у співставленні до більш інтенсивного варіанту для таких культур як ріпак та гірчиця біла. Це підтверджується отриманими значеннями періоду напіврозпаду біомаси (t_{50}) та тривалістю лаг-періоду ферментації (λ).

У співставленні до значень даних показників для інших хрестоцвітих культур [11, с. 31–32] цей показник має вище значення із усередненим коефіцієнтом росту 1,08–1,12. Це вказує в свою чергу на повільні темпи ініціації анаеробної ферментації у 1–2 добу такого процесу з огляду на сумісний варіант кооферментації застосований у даних дослідженнях.

При цьому загальне подовження паг-періоду із середньобагаторічного значення в 1,3 доби для фенологічної фази бутонізації до 2,9 діб на фазу зеленого стручка (співставний коефіцієнт зростання 2,23) підтверджує наші висновки про оптимальну придатність листостеблової маси редьки олійної за весняного строку сівби для біогазової ферментації на фенологічній стадії цвітіння – початок зеленого стручка. У системі дуального використання вирощеної маси на сидерат та біогазову переробку перевагу слід віддавати періоду початку – середина цвітіння з врахуванням оптимальності її використання і для сидерації, яка для редьки олійної відмічена на стадії цвітіння, яке у редьки олійної є досить тривалим [18, с. 15–18].

Зроблені вище узагальнення щодо окремих залежностей та чинників, які визначають загальну продуктивність процесу анаеробної ферментації підтверджено результатами кореляційної матриці чинників досліджу (табл. 3).

Таблиця 3

Кореляційна матриця залежностей показників біогазової продуктивності із гідротермічними та продуктивно-урожайними властивостями для редьки олійної (для зведеної системи роки–повторення – фенофази, N = 60)*

Пари ознак	2	3	4	5**	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,473	-0,500	0,228	-0,694	0,314	0,558	-0,754	0,776	0,804	-0,200	-0,621	0,724	0,875
2		0,425	0,923	0,776	0,843	0,837	-0,777	0,445	0,694	0,527	-0,243	0,585	0,668
3			0,529	0,534	0,396	0,180	-0,074	-0,405	-0,086	0,705	0,489	-0,178	-0,256
4				0,618	0,799	0,734	-0,626	0,296	0,537	0,542	0,301	0,395	0,499
5					0,758	0,869	-0,939	0,700	0,927	0,146	-0,578	0,741	0,937
6						0,952	-0,636	0,444	0,598	0,385	-0,482	0,610	0,609
7							-0,751	0,643	0,739	0,239	-0,468	0,760	0,771
8								-0,677	-0,975	-0,108	0,604	-0,547	-0,902
9									0,775	-0,288	-0,703	0,620	0,788
10										-0,076	-0,749	0,571	0,953
11											0,525	-0,046	-0,165
12												-0,427	-0,775
13													0,701

Сірим виділено коефіцієнти кореляції значущі на 5% рівні. * – розшифровка пар ознак: 1. Середньодобова температура повітря, оС; 2. Сума опадів, мм; 3. ГТК; 4. Коефіцієнт зволоження (КЗ); 5. Тривалість міжфазного періоду, діб; 6. Сформована листостеблова маса, т/га; 7. Сформована маса у сухій речовині, т/га; 8. ЗА, % на абсолютно суху речовину; 9. ЗОВ, % на абсолютно суху речовину; 10. Співвідношення C/N; 11. Вміст метану (%); 12. Питомий вихід метану (SMY, лN/кг органічної сухої речовини); 13. t50 (діб); 14. Лаг період (λ) (діб); ** – для значення масиву тривалості періодів сходи – бутонізація, бутонізація – цвітіння, цвітіння – зелений стручок.

Так встановлено, за похідним показником кореляційного аналізу – коефіцієнтом детермінації (d_{xy}), що показник питомого виходу метану (SMY) має обернений характер залежностей при такій частці детермінування: 38,6% середньодобова температура повітря, 49,4% загальний вміст органічного вуглецю, 56,10% величина співвідношення C/N та 60,1% тривалість лаг-періоду. Прямий характер залежностей визначено з такими показниками при такій частці детермінації: ГТК 23,9%, K_3 9,1%, 36,5% загальний вміст азоту та 27,6% вміст метану.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Таким чином, листостеблова маса редьки олійної за весняного строку сівби має потенційно високий рівень біогазової продуктивності з максимальним її значенням отримання на фазу цвітіння за умови кооферментації із дигестатним інокулюмом з досяжним середньобогаторічним рівнем 325,9 л_N/кг_{оср}. Оптимізація процесу буде мати високу ймовірність за формування листостеблової маси при ГТК вище 1,5 із рівнем середньодобової температури в інтервалі 12–17 °С та суми опадів вище 200 мм за період від сходів культи до фази цвітіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Проект Плану відновлення України. Національна рада з відновлення України від наслідків війни. 2022. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/environmental-safety-assembly.pdf> (Дата звернення 12.10.2024)

2. Стрілець І.Ю. Концептуальні напрями вдосконалення системи охорони земель сільськогосподарського призначення та відтворення родючості ґрунтів: український та зарубіжний аспект. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: право, публічне управління та адміністрування*. 2022. № 6. URL: <https://reicst.com.ua/pmtl/article/view/2022-6-01-17> (Дата звернення 12.10.2024)
 3. Зайцев Ю., Кирильчук А., Ослопова М. Побічна продукція як елемент біологізації землеробства ґрунтів Київської області. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агронія та біологія*. 2022. Випуск 2(48). С. 63–68.
 4. Miceikienė A., Gesevičienė K., Rimkuvienė D. Assessment of the Dependence of GHG Emissions on the Support and Taxes in the EU Countries. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. 7650.
 5. Kaletnik H., Pryshliak V., Pryshliak N. Public Policy and Biofuels: Energy, Environment and Food Trilemma. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2020. 10 4 (36). P. 479–487.
 6. Lohosha R., Palamarchuk V., Krychkovskyi V. Economic efficiency of using digestate from biogas plants in Ukraine when growing agricultural crops as a way of achieving the goals of the European Green Deal. *Polityka Energetyczna* 2023. 26(2). P. 161–182.
 7. Molinuevo-Salces B, Fernández-Varela R, Uellendahl H. Key factors influencing the potential of catch crops for methane production. *Environmental Technology*. 2014. Vol. 35(13-16). P. 1685–1694.
 8. Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F. Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems. *Agronomy for Sustainable Development*. 2022. Vol. 42. № 4. 57 p.
 9. Gunaseelan N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass Bioenergy*. 2004. Vol. 26. № 4. P. 389–399.
 10. Nielsen A.M., Feilberg A. Anaerobic digestion of energy crops in batch. *Biosystems Engergy*. 2012. Vol. 112. № 3. P. 248–251.
 11. Herrmann C., Idler C., Heiermann M. Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics. *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 206. P. 23–35.
 12. Molinuevo-Salces B., Larsen S., Ahring B.K., Uellendahl H. Biogas production from catch crops: evaluation of biomass yield and methane potential of catch crops in organic crop rotations. *Biomass Bioenergy*. 2013. Vol. 59. P. 285–292.
 13. Jacob G.A., Prabhakaran S.P.S., Swaminathan G., Joseyphus R.J. Thermal kinetic analysis of mustard biomass with equiatomic iron-nickel catalyst and its predictive modeling. *Chemosphere*. 2022. Vol. 286 (Pt 3). e131901.
 14. Peu P, Picard S, Diara A, Girault R, Béline F, Bridoux G, Dabert P. Prediction of hydrogen sulphide production during anaerobic digestion of organic substrates. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 121. P. 419–424.
 15. Lallement A., Peyrelasse C., Lagnet C., Barakat A., Schraauwers B., Maunas S., Monlau F.A Detailed Database of the Chemical Properties and Methane Potential of Biomasses Covering a Large Range of Common Agricultural Biogas Plant Feedstocks. *Waste*. 2023. Vol. 1. № 1. P. 195–227.
 16. Lymperatou A., Engelsen T.K., Skiadas I.V., Gavala H.N. Prediction of methane yield and pretreatment efficiency of lignocellulosic biomass based on composition. *Waste Management*. 2023. Vol. 155. P. 302–310.
 17. Manyi-Loh C.E., Lues R. Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Substrate Characteristics (Challenge) and Innovation. *Fermentation*. 2023. Vol. 9. № 8. 755.
 18. Цицюра Я.Г., Цицюра Т.В. Редька олійна. Стратегія використання та вирощування: монографія. Вінниця: ТОВ “Нілан ЛТД”, 2015. 624 с.
-

19. Green Manure Global Market Report 2024 By Type (Leguminous, Non Leguminous), By Source (Dhaincha, Sesbania, Sunhemp, Other Sources), By Application (Grains And Cereals, Pulses And Oilseeds, Fruits And Vegetables, Other Applications) – Market Size, Trends, And Global Forecast 2024–2033. URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/green-manure-global-market-report>. (дата звернення 22.10.2024)
 20. Fajobi M.O., Lasode O.A., Adeleke A.A., Ikubanni P.P., Balogun A.O. Prediction of Biogas Yield from Codigestion of Lignocellulosic Biomass Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Model. *Journal of Engineering*. 2023. Article ID 9335814.
 21. Сайко В.Ф. Особливості проведення досліджень з хрестоцвітими олійними культурами. К.: «Інститут землеробства НААН», 2011. 76 с.
 22. Test Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability of Fodder Radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). 2017. Geneva, 23 p.
 23. Зоохімічний аналіз кормів. Хімічний та атомно-адсорбційний аналіз кормів: Навчальний практикум / О.О. Лавринюк, В.А. Бурлака; за ред. В.А. Бурлаки. Житомир, 2016 110 с.
 24. AOAC. Official Method of Analysis: Association of Analytical Chemists. 19th Edition, Washington DC, 2012. P. 101–130.
 25. Belle A.J., Lansing S., Mulbry W., Weil R.R. 2015. Methane and hydrogen sulfide production during co-digestion of forage radish and dairy manure. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 80. P. 44–51.
 26. Carvalho L., Di Berardino S., Duarte E. Biogas production from mediterranean crop silages. Proceedings Sardinia 2011. Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3–7 October 2011. 2011. 3e7.
 27. VDI. 2006. VDI Standard Procedures 4630: Fermentation of Organic Materials. Characterisation of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests Verein Deutscher Ingenieure. Beuth Verlag, Berlin. 132 p.
 28. Herrmann C., Plogsties V., Willms M., Hengelhaupt F., Eberl V., Eckner J. Methane production potential of various crop species grown in energy crop rotations. *Landtechnik*. 2016. Vol. 71. P. 194–209.
 29. Moody L.B., Burns R.T., Bishop G., Sell S.T., Spajic R. Using biochemical methane potential assays to aid in co-substrate selection for co-digestion. *Applied Engineering in Agriculture*. 2011. Vol. 27. № 3. 433e9.
 30. Snedecor G.W., Cochran W.G. Statistical Methods, 8th Edition. Wiley-Blackwell, 1991. 524 p.
-