

ЛИСТОСТЕБЛОВА МАСА РЕДЬКИ ОЛІЙНОГО ПРОМІЖНОГО (ЛІТНЬОГО) СТРОКУ СІВБИ ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ

ЦИЦЮРА Я.Г. – кандидат сільськогосподарських наук
orcid.org/0000-0002-9167-833X
Вінницький національний аграрний університет

Постановка проблеми. Екологічні проблеми значною мірою пов'язані зі зростаючим попитом на енергетичні викопні ресурси, що спричиняє як пряму деградацію ґрунтового покриву внаслідок їх видобутку, так і подальше забруднення викидами від їх переробки та споживання [1]. Такі процеси стають дедалі динамічнішими і створюють реальні виклики для екологічної та соціальної стійкості територій [2]. Як наслідок, з'явилися напрями альтернативного енергоспоживання, що базуються на використанні природних відновлюваних ресурсів та їх переробці з метою отримання біогазу та біопалива [3]. Одним із таких напрямів, який вже сьогодні домінує в біоенергетиці, є анаеробна біоферментація з виробництвом двох основних компонентів – біогазу та дигестату (супутнього субстрату) [4]. Ці продукти мають доведену ефективність у застосуванні. Перший з них використовується для альтернативного енергозабезпечення, особливо в сільській місцевості [5], а другий – у системі різних агротехнологій як компонент органічного добрива [6]. Цей підхід визнаний основним у Європейському Союзі, програма якого має назву «Європейський зелений курс» [7]. Цей напрям передбачає вивчення місцевих рослинних біоресурсів для використання в біоорганічних та біоенергетичних технологіях у реалізації енергетичної безпеки територій та гармонійного екологічного розвитку екосоціоландшафтів, забезпечення принципів ґрунтозбереження та кліматичної нейтральності застосованих агротехнологій [8]. З цієї метою проводяться дослідження для оцінки реальних кандидатів серед місцевих, адаптованих та акліматизованих видів рослин для використання в біоенергетиці, біосинтезі, збереженні та відновленні ґрунтів [9]. Цей відбір ґрунтується на багатокритеріальному підході інноваційної парадигми багатofункціональних покривних культур (MSCC) [10]. Водночас багато видів рослин потребують відповідного наукового узагальнення з огляду на сучасні виклики, спричинені змінами в технологіях, кліматичною диверсифікацією територій та зростанням вартості ресурсів [11]. З цих причин редька олійна є одним із потенційних кандидатів у різних регіонах Євразійського континенту [12] і має низку цінних властивостей для використання в різних галузях біоорганічних та органічних технологій [13]. Однак існує також потреба в його додатковому вивченні з точки зору використання біогазу в біоенергетиці [14]. Це особливо актуально з огляду на те, що гідротермічні режими зон нестійкого зволоження (до яких відноситься регіон даного дослідження) не є сприятливими для технологій вирощування сидератів [15], що вимагає альтернативного використання вирощеної біомаси. Однією з таких

альтернатив може бути анаеробне зброджування для виробництва біогазу [16].

Виходячи з цього, метою наших досліджень було визначити можливість використання надземної біомаси редьки олійної для виробництва біометану у варіантах її проміжного (літнього) вирощування.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проводились у 2020–2024 рр. на дослідному полі Вінницького національного аграрного університету (N 49°11'31", E 28°22'16"). Ґрунтовий покрив дослідних ділянок – сірі лісові ґрунти з такими агрохімічними показниками: гумусу 2,68% легкогідролізованого азоту 81.5 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору 176.1 мг/кг ґрунту, обмінного калію 110.8 мг/кг ґрунту, pH_{ккл} 5.8.

Об'єкт досліджень сорт редьки олійної Журавка за приписовного конструювання його агроценосу за агротехнологічних параметрів сидерального типу літньої сівби – норма висіву 2,5 млн схожих насінин/га звичайним рядковим способом на неудобреному фоні. Строки сівби літній проміжний (друга декада липня). Попередник горох.

Для контролю хрестоцвітних блішок (*Phyllotreta atra* F., *Phyllotreta nemorum* L., *Phyllotreta undulata* Kutsch, *Phyllotreta nigripes* F.) застосовано Блискавку, к.е. (альфаціперметрин 100 г/л) 0,2 л/га у фазу сім'ядолей.

Схема досліду передбачала 4-х разову повторність з повною їх рендомізацією. Загальна площа ділянки 35 м² облікова площа ділянки 25 м².

Фенологічну періодизацію розвитку рослин проводили за шкалою ВВСН [17].

Облік надземної біомаси рослин проводили на фази: бутонізації (ВВСН 50–53), цвітіння (ВВСН 64–67) та зеленого стручка (ВВСН 73–75) за методом відбору і послідовного зважування на пробних майданчиках [18]

Визначення вмісту сухих речовин загальний та органічний виміри проводили відповідно до загальноприйнятих методик [19] шляхом висушування в сушильній шафі за температури 105 °С, а потім озолення висушеного зразка за температури 550 °С.

Супутні біохімічні показники листостеблової маси визначали відповідно до протоколів лабораторного біохімічного визначення листостеблової маси [19] за таким переліком:

- вмісту загального азоту (ЗА) (метод К'ельдаля на аналізаторі KjelROC Kd-310);
- вмісту загального органічного вуглецю (ЗОВ) (аналізатором TOC-LCPH);
- співвідношення C/N розраховувалося як відношення вмісту загального органічного вуглецю до вмісту загального азоту.

В оцінці гідротермічних умов росту і розвитку редьки олійної було застосовано базові показники такі як сума опадів, середньодобова температура, середня відносна вологість повітря та похідні розраховані за рівняннями 1 та 2 – гідротермічний коефіцієнт (ГТК), та коефіцієнту зволоження (K_3).

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

де: $\sum R$ – сума опадів (мм) за період з температурою вище 10 °C, $\sum t_{>10}$ – 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 3), 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 °C; a – середня вологість повітря за період, %.

У дослідженні було застосовано рекомендації щодо лабораторної оцінки біогазової продуктивності за рахунок сумісної ферментації із дигестатним інокулюмом [20, 21]. Для анаеробного зброджування використовували скляні посудини об'ємом 1 л із подрібненою масою редьки олійної. Як інокулянт 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; $\text{NH}_4\text{-N}$ $2,3 \pm 0,7$ 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 5 (за вмістом сухої речовини).

Температура інкубації $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5$, період інкубації 60 діб при активному струшуванні один раз на добу у фіксований час. Біогаз, що утворювався збирали у газові лічильники та реєстрували за стандартною процедурою витіснення підкисленого насиченого бар'єрного розчину NaCl [22]. Об'єм біогазу визначали щоденно для калькуляції загальної його акумуляції із нормалізацією до стандартних умов (сухий газ, 0 °C, 1013 гПа) [23].

Склад біогазу на вміст метану вимірювали за допомогою портативного газоаналізатора, (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). Супутні обліки динамізму біогазової ферментації, відповідно до стандартного протоколу [20] передбачали облік таких показників:

– питомий вихід метану (SMY) визначали шляхом ділення об'єму газу на масу доданого субстрату (в органічній сухій речовині) [24];

– лаг період (λ) визначався як період від початку тесту анаеробного зброджування до початку виділення метану, зафіксований у годинах та перерахований у добу тривалість [24];

– період напіврозпаду маси ферментації (t_{50}) визначався на основі інтерпретації модифікованих рівнянь

Гомперца як час, коли досягається 50% максимального питомого виходу метану (діб) [24].

Для встановлення зв'язків між досліджуваними показниками чинникової системи досліду було застосовано методологію парного кореляційного аналізу [25] та показник коефіцієнту детермінації (рівняння 4):

$$d_{yx} = r_{ij}^2 \times 100 \quad (4)$$

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 при допомозі тесту Тьюкі з поправкою Бонферроні [25] у середовищі статистичної програми Statistica 10 (StatSoft – Dell Software Company, США).

Результати досліджень. Отримані результати п'ятирічного циклу вивчення редьки олійної за літнього (проміжного) її використання у форматі кормово-сидерального використання засвідчило істотну мінливість її біопродуктивності пов'язану перш за все з гідротермічними режимами періоду вегетації до облікової фази цвітіння. Особливо це стосується суми опадів за період досліджень. Зокрема міжрічна мінливість середньодобової температури повітря за період 2020–2024 рр. у виразі коефіцієнту варіації становила 6,9%, а мінливість за показником суми опадів 57,1%. У підсумку це зумовило істотно відмінні рівні показників ГТК та коефіцієнту зволоження (K_3) на рівні 38–54% мінливості міжрічного співставлення. Такі зміни відобразились на величині тривалості міжфазного періоду сходи–цвітіння із загальною тенденцією редуції за мінімальних значень суми опадів на фоні високих середньодобових температур (до прикладу умови 2020 року вегетації). В свою чергу така система чинників зумовила істотність варіювання сформованої надземної біомаси рослин редьки олійної у значенні міжрічного варіювання 36,5% за показником сирової листостеблової маси та 33% у виразі сухої речовини. При цьому урожайний потенціал в окремі роки опускався до рівня мінімального біопотенціалу можливості як ефективного сидерального, так і ефективного біогазового застосування (з огляду на дослідження [10, 13, 15]).

Позитивним у плані літніх строків використання редьки олійної є протеїновий потенціал сформованої листостеблової маси культури в усі роки вивчення із середньобагаторічним показником 3,27% на абсолютно суху речовину при показникові міжрічного варіювання 9,2%. Такий рівень вмісту загального азоту пояснюється відповідним температурним режимом, що у зоні нестійкого зволоження сприяє формуванню у рослин стресової системи білків та, відповідно, забезпечує загальне зростання азоту та його похідних в основних тканинах рослин, особливо в асимілюючій їх частині [12, 26]. Відмічається [24, 27, 28], що такі процеси гідротерміки періоду формування надземної маси рослин сприяють формуванню рослин із меншої часткою стеблової частини та тканин інтенсивною механічною частиною, що зумовлює зменшення частки органічного вуглецю із класичних 42–43% до 37–39%. Такі особливості підтверджено і результатами наших досліджень за середньо-

Таблиця 1

Основні параметри аналізу біопродуктивності редьки олійної на фазу цвітіння (ВВСН 64–67) за літньої (проміжної сівби), 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 (K_z)	Тривалість, дів					
2020	19,8	55,8	0,63	0,40	48	11,29	1,82	3,27	38,44	11,76
2021	17,9	121,1	1,57	1,24	55	16,22 ^a	2,73 ^a	3,09 ^d	41,29 ^c	13,36
2022	18,3	254,0	2,48	2,61	57	24,77 ^a	3,33 ^a	3,67 ^c	38,98 ^d	10,62
2023	18,9	150,9	1,48	1,39	53	21,39 ^a	3,37 ^a	3,43 ^c	39,15 ^c	11,41
2024	21,2	86,3	0,80	0,69	51	10,77 ^c	1,55 ^c	2,89 ^b	41,96 ^b	14,52

^aРівні значущості для кожної феностадії порівняно з 2020 роком для наступних рівнів статистичної значущості (за тестом Тьюкі з поправкою Бонферроні): а – 0,1%; б – 1%; с – 5%; d – немає різниці.

багаторічного вмісту органічного вуглецю 39,12%. У підсумку, з огляду на високий вміст азоту та знижений вміст органічного вуглецю сформована надземна листостеблова маса мала показник співвідношення С/Н на рівні 12,33. Враховуючи визначений факт, що оптимальне співвідношення С/Н для анаеробної ферментації рослинної біомаси є варіюючим показником, який залежить від формату ферментації, температурного режиму, виду рослинної маси та характеру біогазового обладнання, а за твердженням [23, 24, 29–30] його оптимум з врахуванням вказаних додаткових чинників знаходиться в інтервалі 15–25 – рогнозовано сформована листостеблова маса редьки олійної буде мати потенційну біогазову продуктивність нижче 300 л_N/кг органічної сухої речовини. Таке твердження узгоджується з останніми оцінками специфічної біогазової продуктивності целюлозо- та білкововмісної рослинної сировини при її анаеробній ферментації [29, 30].

Такі висновки позитивно корелюють із результатами базових показників біогазової продуктивності редьки олійної за анаеробної ферментації сформованої біомаси літнього строку сівби представлену у табл. 2. Зокрема, середній багаторічний показник питомого виходу метану склав 270,7 л_N/кг органічної сухої речовини, тобто 90% від нормативної нижньої межі оптимального біогазового потенціалу. Тобто для редьки олійної, у плані літнього її культивування важливим з позиції біогазового застосування є індикаційний вплив на показники які формуватимуть близьке до оптимуму співвідношення С/Н.

Слід відмітити і ряд особливостей процесу біогазової екстракції із листостеблової маси редьки олійної з огляду на визначені супутні константи анаеробної ферментації. Так, вміст біометану у загальному об'ємі біогазу у різні роки досліджень мав близькі значення до середньобагаторічного показника в 53,73%. Це з огляду на дослідження [28] вказує на відносну інертність корисної частки біометану з позиції його акумуляції за весь період інкубації у випадку редьки олійної. З іншого боку, досить тривалий період напіврозпаду маси при ферментації, з огляду на властиве для хрестоцвітних

значення показника на рівні 2,9–4,2 дів [20] потенційно вказує на досить тривалий період інкубаційної ферментації, а з огляду на досить тривалий лаг період даного процесу (λ) слід очікувати інтенифікацію процесу екстракції біогазу в інтервалі до 10–18 днів інкубації, на що вказується у ряді досліджень [21, 23, 26]. Відмічена специфіка підтверджена результатами оцінки динаміки газоекстракції у процесі її лабораторної анаеробної ферментації у розрізі років досліджень (рис. 1).

Зокрема, встановлено інтенсивний період інкубації із виділенням до 55–70% загального об'єму біогазу у період 5–19 дня інкубації залежно від року досліджень, тобто від конкретного біохімічного портфоліо листостеблової маси під впливом відміченої раніше специфіки впливу гідротермічних умов. Ця специфічність визначається характером представлених кривих виділення біогазу у різні роки досліджень із однопікових характером та послідовним динамічним зниженням (роки 2020, 2022–2024) та двопіковим коливальним характером біогазової емісії (умови 2021 року).

З огляду на ці особливості за літній варіантів культивування ефективний інкубаційний період анаеробної ферментації за режиму інкубації при температурі 35 °С та при сумісному застосуванні дигестаційного інокулянту буде становити період у 19–25 дів максимального терміну, що слід враховувати операційних системах циклу біогазового виробництва та системах дозавантаження біогазового обладнання.

Результатами проведеного кореляційного аналізу (табл. 3) підтверджено попередні узагальнення щодо впливу як гідротермічних умов, так і визначених біохімічних складових листостеблової маси (загальний азот та органічний вуглець) на характер питомої біометанової продуктивності.

З позиції ролі гідротермічних умов у реалізації рівнів біопродуктивності редьки олійної встановлений на підставі парних коефіцієнтів кореляції показник детермінації впливу середньодобової температури у значенні 51,3–66,2% з оберненим характером на формування як загальної листостеблової маси, так і на її трансфер-

Таблиця 2

Основні показники біометанової продуктивності листостеблової маси редьки олійної за літнього (проміжного) вирощування на фазу цвітіння (ВВСН 64–67) (міжнародна аббревіатура показників), 2020–2024 рр.

Рік	Вміст метану (%)		Питомий вихід метану (SMY) ($^{***}L_N/\text{кг}$ органічної сухої речовини (ОСР))		t_{50} (діб)		Лег період (λ) (діб)	
	\bar{x}	SD*	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
2020	54.48	6.61	276.83	12.24	6.25	0.41	2.75	0.11
2021	54.98 ^c	8.38	289.67 ^c	12.97	6.09 ^c	0.39	1.79 ^a	0.18
2022	54.20 ^{d**}	6.77	235.85 ^a	15.91	5.12 ^b	0.55	1.86 ^a	0.14
2023	51.29 ^b	6.93	249.51 ^a	14.22	6.31 ^d	0.39	1.97 ^a	0.07
2024	53.69 ^c	7,44	301.52 ^a	12.55	5.75 ^c	0.42	2.14 ^b	0.12

*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).

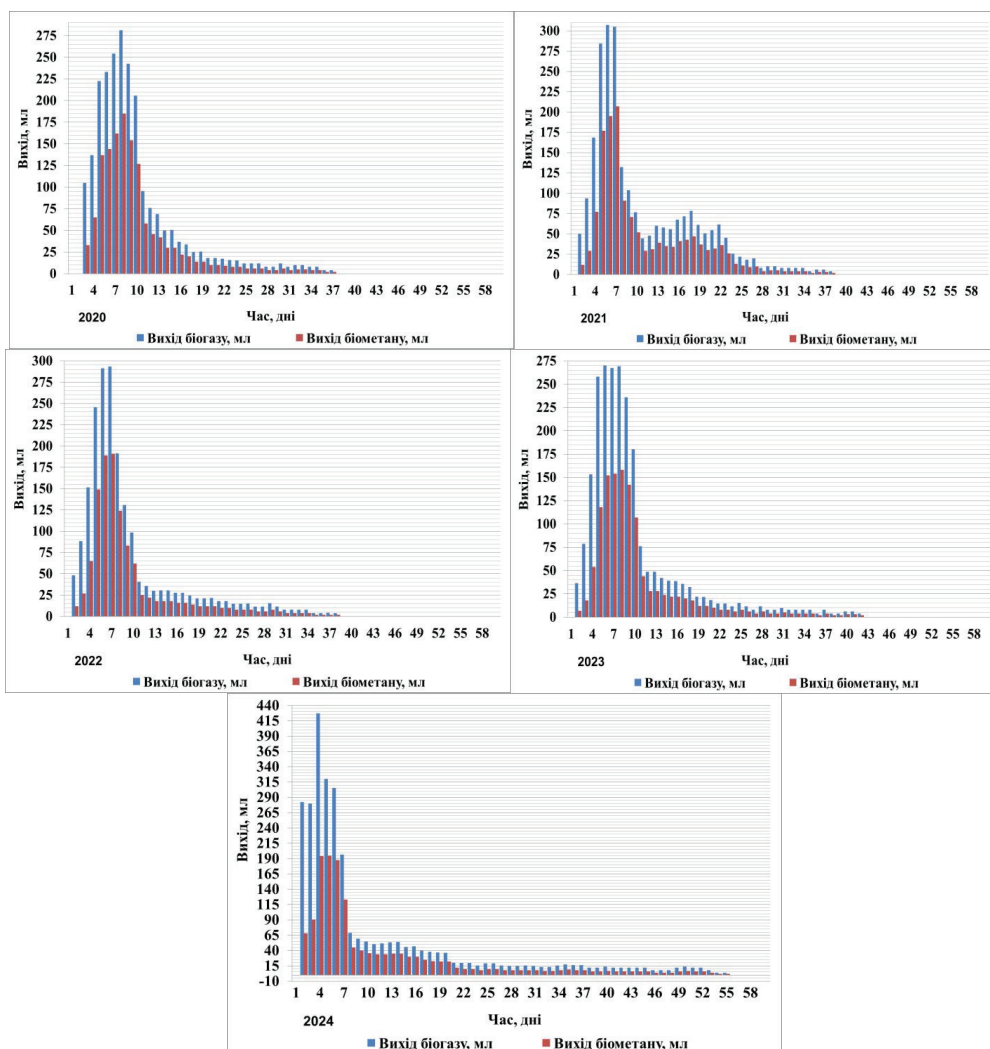


Рис. 1. Сумарна продуктивність біогазу та біометану при анаеробному зброджуванні біомаси редьки олійної літнього (проміжного) строку сіви з урахуванням продуктивності біогазу, отриманого в контрольному варіанті без додавання редьки олійної та динаміки концентрації біометану ($CH_4\%$) в отриманому об’ємі біогазу від анаеробного зброджування (за 55-денний період інкубації), 2020–2024 рр. (для всіх варіантів коефіцієнт перерахунку продуктивності біогазу з мл у $L_N/\text{кг}$ органічної сухої речовини = 5⁻¹).

Таблиця 3

Кореляційна матриця залежностей вивчаємих показників у єдиному масиві даних для редьки олійної на фазу цвітіння (ВВСН 64–67) (для зведеної системи роки–повторення, $N = 20$)

Пари ознак	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	-0,594	-0,744	-0,642	-0,716	-0,714	-0,814	-0,589	0,303	0,543	-0,125	0,542	0,094	0,555
2		0,972	0,997	0,883	0,938	0,816	0,775	-0,263	-0,611	-0,131	-0,805	-0,733	-0,678
3			0,987	0,946	0,926	0,849	0,727	-0,203	-0,566	-0,007	-0,737	-0,666	-0,748
4				0,908	0,931	0,819	0,761	-0,243	-0,597	-0,067	-0,781	-0,731	-0,697
5					0,819	0,776	0,476	0,108	-0,286	0,035	-0,506	-0,612	-0,911
6						0,959	0,852	-0,417	-0,734	-0,340	-0,896	-0,454	-0,648
7							0,779	-0,396	-0,691	-0,394	-0,826	-0,208	-0,664
8								-0,811	-0,973	-0,238	-0,983	-0,380	-0,164
9									0,920	0,218	0,754	-0,048	-0,408
10										0,244	0,939	0,202	-0,030
11											0,395	-0,305	0,136
12												0,365	0,247
13													0,393

Сірим виділено коефіцієнти кореляції значущі на 5% рівні. *Розшифровка пар ознак: 1. Середньодобова температура повітря, °С; 2. Сума опадів, мм; 3. ГТК; 4. Коефіцієнт зволоження (K_z); 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 С/Н; 11. Вміст метану (%); 12. Питомий вихід метану (СМУ, л_N/кг органічної сухої речовини); 13. t_{50} (діб); 14. Лаг період (λ) (діб).

ний вираз у сухій речовині. При цьому кількість опадів та супутні їм показники ГТК та індексу зволоження (K_z) мали прямий характер детермінації на вказані величини у значенні 62–89%.

Щодо основного результуючого показника – питомого виходу біометану (СМУ) то зростання режиму аридизації на фоні високих середньодобових температур за рахунок підвищення вмісту азоту, зниження вмісту органічного вуглецю – закономірно формує низьке значення С/Н. З огляду на встановлені величини кореляційних залежностей (тісна обернена із показником загального вмісту азоту та тісна пряма із вмістом органічного вуглецю та показником співвідношення С/Н) – це зумовлює загальне зниження біогазової продуктивності листостеблової маси редьки олійної за літніх строків її вирощування. Підтверджено і тенденційний вплив критеріїв t_{50} та лаг-періоду (λ) з прямим характером середньої тісноти зв'язку.

Висновки. Таким чином, результати тривалих досліджень підтверджено ефективний потенціал редьки олійної за літнього (проміжного) її вирощування із досяжним біогазовим потенціалом на рівні 250–300 л_N/кг органічної сухої речовини. Оптимальні умови прогнозованого виходу біометану із листостеблової маси редьки олійної у варіанті літнього її використання як проміжної післяжнивної чи післяукісної культури, з огляду на встановлені тенденції та кореляційні залежності є рівень середньодобових температур в інтервалі 17–18 °С при сумі опадів за період сходи–цвітіння на рівні не нижче 120 мм та значенні ГТК в інтервалі не нижче 1,2–1,5.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Waithaka S. Effects of Agriculture on the Environment. *International Journal of Agriculture*. 2023. Vol. 8. P. 10–20.
2. Zhang Q., Hu Y., Jiao J., Wang S. The impact of Russia–Ukraine war on crude oil prices: an EMC framework. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2024. Vol. 11. 8.
3. Olesen J.E., Møller H.B., Petersen Sa.O., Sørensen P., Nyord T., Sommer S. G. Sustainable biogas – climate and environmental effects of biogas production Aarhus Universitet, DCA – Danish Centre for Food and Agriculture. 85 p. DCA report nr. 181. 2021. URL: <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport181.pdf> (date of application 23 October 2024).
4. Birman J., Burdloff J., De Peuffeilhoux H., Erbs G., Feniou M., Lucille P.-L. Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050. 2021. URL: https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2021-07/ENGIE_20210618_Biogas_potential_and_costs_in_2050_report_1.pdf (date of application 25 October 2024).
5. Tokarchuk D.M., Pryshliak N.V., Tokarchuk O.A., Mazur K.V. Technical and economic aspects of biogas production at a small agricultural enterprise with modeling of the optimal distribution of energy resources for profits. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 61. № 2. P. 339–349.
6. Toda M., Walder F., van der Heijden M.G. Organic management and soil health promote nutrient use efficiency. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment* 2023. Vol. 2. P. 215–224.
7. Steininger K.W., Williges K., Meyer L.H., Maczek F., Riahi K. Sharing the effort of the European Green Deal among countries. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. 3673.
8. Gregory C., Simone T., Georg Z. How to make the European Green Deal work, Bruegel Policy Contribution, No. 2019/13, Bruegel, Brussels. 2019. 82 p.

9. Słomka A, Pawłowska M. Catch and Cover Crops' Use in the Energy Sector via Conversion into Biogas–Potential Benefits and Disadvantages. *Energies*, 2024. Vol. 17. №3. 600.
10. Chapagain T., Lee E.A., Raizada M.N. The Potential of Multi-Species Mixtures to Diversify Cover Crop Benefits. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. №5. 2058.
11. Nichols G.A., MacKenzie C.A. Identifying research priorities through decision analysis: A case study for cover crops. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023. Vol. 7. e1040927.
12. Quintarelli V., Radicetti E., Allevalo E., Stazi S.R., Haider G., Abideen Z., Bibi S., Jamal A., Mancinelli R. Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. 2076.
13. Bhogal A., White C., Morris N. Project Report №. 620 Maxi Cover Crop: Maximising the benefits from cover crops through species selection and crop management. AHDB Cereals & Oilseeds is a part of the Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB). 2018. 84 p.
14. Ugrenović V., Filipović V., Jevremović S., Marjanović J.A., Popović V., Buntić A., Delić D. Effect of Brassicaceae as cover crops. *Selekcija i semenarstvo*. 2019. Vol. 25. № 2. P. 1–8.
15. Wang X., Ma H., Guan C., Guan M. Decomposition of Rapeseed Green Manure and Its Effect on Soil under Two Residue Return Levels. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. 11102.
16. Beausang C., McDonnell K., Murphy F. Assessing the environmental sustainability of grass silage and cattle slurry for biogas production. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 298. e126838.
17. 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.
18. Duff J., van Sprang C., O'Halloran J., Hall Z. Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068 Optimising cover cropping for the Australian vegetable industry. State of Queensland. Department of Agriculture and Fisheries. 2020. 40 p.
19. AOAC. Official Method of Analysis: Association of Analytical Chemists. 19th Edition, Washington DC. 2012. P. 101–130.
20. 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.
21. 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.
22. 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. 2006. 132 p.
23. 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.
24. 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.
25. Snecdecor G.W., Cochran W.G. Statistical Methods, 8th Edition. Wiley-Blackwell, 1991. 524 p.
26. Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F., Marsac S. Constantin J. Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2022. Vol. 42. 57.
27. Li Y, Zhu J, Tang Y, Shi X, Anwar S, Wang J, Gao L, Zhang J. Impact of Varying Mass Concentrations of Ammonia Nitrogen on Biogas Production and System Stability of Anaerobic Fermentation. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. №8. 1645.
28. Manyi-Loh C.E., Lues R. Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Substrate Characteristics (Challenge) and Innovation. *Fermentation*. 2023. Vol. 9. №8. 755.
29. Mittweg G., Oechsner H., Hahn V., Lemmer A., Reinhardt-Hanisch A. Repeatability of a laboratory batch method to determine the specific biogas and methane yields. *Engineering in Life Sciences*. 2012. Vol. 12. P. 270–278.
30. Molinuevo-Salces B., Fernández-Varela R., Uellendahl H. Key factors influencing the potential of catch crops for methane production. *Environmental Science & Technology*. 2014. Vol. 35. P. 1685–1694.

REFERENCES:

1. Waithaka S. (2023). Effects of Agriculture on the Environment. *International Journal of Agriculture*. Vol. 8. P. 10–20.
2. Zhang Q., Hu Y., Jiao J., Wang S. (2024). The impact of Russia–Ukraine war on crude oil prices: an EMC framework. *Humanities and Social Sciences Communications*. Vol. 11. 8.
3. Olesen J.E., Møller H.B., Petersen Sa.O., Sørensen P., Nyord T., Sommer S. G. (2021). Sustainable biogas – climate and environmental effects of biogas production Aarhus Universitet, DCA – Danish Centre for Food and Agriculture. 85 p. DCA report nr. 181. 2021. URL: <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport181.pdf> (date of application 23 October 2024).
4. Birman J., Burdloff J., De Peuffelhous H., Erbs G., Feniou M., Lucille P.-L. (2021). Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050. URL: https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2021-07/ENGIE_20210618_Biogas_potential_and_costs_in_2050_report_1.pdf (date of application 25 October 2024).
5. Tokarchuk D.M., Pryshliak N.V., Tokarchuk O.A., Mazur K.V. (2020). Technical and economic aspects of biogas production at a small agricultural enterprise with modeling of the optimal distribution of energy resources for profits. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 61. № 2. P. 339–349.
6. Toda M., Walder F., van der Heijden M.G. (2023). Organic management and soil health promote nutrient use efficiency. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*. Vol. 2. P. 215–224.

7. Steining K.W., Williges K., Meyer L.H., Maczek F., Riahi K. (2022). Sharing the effort of the European Green Deal among countries. *Nature Communications*. Vol. 13. 3673.
 8. Gregory C., Simone T., Georg Z. (2019). How to make the European Green Deal work, Bruegel Policy Contribution, No. 2019/13, Bruegel, Brussels. 82 p.
 9. Słomka A, Pawłowska M. (2024). Catch and Cover Crops' Use in the Energy Sector via Conversion into Biogas—Potential Benefits and Disadvantages. *Energies*. Vol. 17. №3. 600.
 10. Chapagain T., Lee E.A., Raizada M.N. (2020). The Potential of Multi-Species Mixtures to Diversify Cover Crop Benefits. *Sustainability*. Vol. 12. №5. 2058.
 11. Nichols G.A., MacKenzie C.A. (2023). Identifying research priorities through decision analysis: A case study for cover crops. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. Vol. 7. e1040927.
 12. Quintarelli V., Radicetti E., Allevato E., Stazi S.R., Haider G., Abideen Z., Bibi S., Jamal A., Mancinelli R. (2022). Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. *Agriculture*. Vol. 12. 2076.
 13. Bhogal A., White C., Morris N. (2018). Project Report №. 620 Maxi Cover Crop: Maximising the benefits from cover crops through species selection and crop management. AHDB Cereals & Oilseeds is a part of the Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB). 84 p.
 14. Ugrenović V., Filipović V., Jevremović S., Marjanović J.A., Popović V., Buntić A., Delić D. (2019). Effect of Brassicaceae as cover crops. *Selekcija i semenarstvo*. Vol. 25. № 2. P. 1–8.
 15. Wang X., Ma H., Guan C., Guan M. (2022). Decomposition of Rapeseed Green Manure and Its Effect on Soil under Two Residue Return Levels. *Sustainability*. Vol. 14. 11102.
 16. Beausang C., McDonnell K., Murphy F. (2021). Assessing the environmental sustainability of grass silage and cattle slurry for biogas production. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 298. e126838.
 17. 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.
 18. Duff J., van Sprang C., O'Halloran J., Hall Z. (2020). Guide to Brassica Biofumigant Cover Crops Managing soilborne diseases in vegetable production systems. Horticulture Innovation through VG16068 Optimising cover cropping for the Australian vegetable industry. State of Queensland. Department of Agriculture and Fisheries. 40 p.
 19. AOAC. (2012). Official Method of Analysis: Association of Analytical Chemists. 19th Edition, Washington DC. P. 101–130.
 20. Herrmann C., Idler C., Heiermann M. (2016). Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics. *Bioresource Technology*. Vol. 206. P. 23–35.
 21. Carvalho L., Di Berardino S., Duarte E. (2011). 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. 3e7.
 22. VDI. 2006. (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.
 23. Herrmann C., Plogsties V., Willms M., Hengelhaupt F., Eberl V., Eckner J. (2016). Methane production potential of various crop species grown in energy crop rotations. *Landtechnik*. Vol. 71. P. 194–209.
 24. Moody L.B., Burns R.T., Bishop G., Sell S.T., Spajic R. (2011). Using biochemical methane potential assays to aid in co-substrate selection for co-digestion. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 27. №3. 433e9.
 25. Snecdecor G.W., Cochran W.G. (1991). Statistical Methods, 8th Edition. Wiley-Blackwell. 524 p.
 26. Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F., Marsac S. Constantin J. (2022). Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 42. 57.
 27. Li Y, Zhu J, Tang Y, Shi X, Anwar S, Wang J, Gao L, Zhang J. (2023). Impact of Varying Mass Concentrations of Ammonia Nitrogen on Biogas Production and System Stability of Anaerobic Fermentation. *Agriculture*. Vol. 13. №8. 1645.
 28. Manyi-Loh C.E., Lues R. (2023). Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Substrate Characteristics (Challenge) and Innovation. *Fermentation*. Vol. 9. №8. 755.
 29. Mittweg G., Oechsner H., Hahn V., Lemmer A., Reinhardt-Hanisch A. (2012). Repeatability of a laboratory batch method to determine the specific biogas and methane yields. *Engineering in Life Sciences*. Vol. 12. P. 270–278.
 30. Molinuevo-Salces B., Fernández-Varela R., Uellendahl H. (2014). Key factors influencing the potential of catch crops for methane production. *Environmental Science & Technology*. Vol. 35. P. 1685–1694.
- Цицора Я.Г. Листостеблова маса редьки олійного проміжного (літнього) строку сівби як сировина для отримання біогазу**
- Метою** досліджень було дослідити доцільність та потенційну ефективність використання сировини для отримання біогазу з огляду на гідротермічні умови вегетації та сформовані відповідно їм рівні біопродуктивності та базового біохімічного складу у форматі дослідження можливості комплексного біогазово-сидераційного застосування редьки олійної.
- Методи.** Дослідження було проведено впродовж 2020–2024 років на базі дослідного поля Вінницького НАУ на сірих лісових ґрунтах з середнім потенціалом родючості. Повторність у досліді чотирьохразова. Розміщення варіантів – систематичне у два яруси. Дослід передбачав співставний аналіз показників біопродуктивності, гідротермічних умов вегетації з даними базових показників біогазової продуктивності визначених за рахунок лабораторного модельного дослідження.
- Результати.** Визначена можливість використання листостеблової маси редьки олійної вирощеною в умовах літнього строку сівби як варіант поширеного її сидерального та біоконсерваційного її використання для виробництва біогазу при застосуванні класичного процесу сумісної анаеробної ферментації із дигестатним інокулянтом за звичайного температурного режиму інкубації. Доведено можливість досягнення 90% рівня ефективної реалізації біогазового потенціалу фермен-

тації целюлозовмісної агробіомаси (у значенні 300 л_N/кг органічної сухої речовини) за умов помірного рівня зволоження при ГТК в інтервалі 1,2–1,5 за температурного режиму в інтервалі 17–18 °С.

Досліджено характер біогазового продуктивності листостеблової маси редьки олійної на підставі динамічних графіків щодобової фіксації та визначено базові особливості цього процесу з огляду на їх врахування у практичних аспектах виробництва біогазу.

Висновки. Листостеблова маса редьки олійної отримана за вирощування при літньому (проміжному) строці сівби є ефективним компонентом базової сировини для біогазового виробництва у системі коферментації із дигестатними варіантами інокуляції із досяжним інтервалом біогазового потенціалу на рівні 250–300 л_N/кг органічної сухої речовини. Лімітуючими факторами такого рівня продуктивності у першу чергу є гідротермічні режими періоду вегетації до фази цвітіння. Оптимальність досягається за помірного рівня літніх середньодобових температур (17–18 °С) та зволоження (ГТК 1,2–1,5).

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

Tsytsiura Ya.G. Leaf-stem mass of oilseed radish of intermediate (summer) sowing period as a raw material for biogas production.

The aim of the research was to investigate the feasibility and potential efficiency of using raw oil radish leaf mass as a raw material for biogas production, taking into account the hydrothermal conditions of vegetation and the levels of bioproductivity and basic biochemical composition formed by them in the format of studying the possibility of integrated biogas and green manure application of oil radish.

Methods. The study was conducted during 2020–2024 on the basis of the experimental field of Vinnytsia NAU on

gray forest soils with medium fertility potential. The experiment was replicated four times. The arrangement of variants was systematic in two tiers. The experiment involved a comparative analysis of bioproductivity indicators, hydrothermal conditions of vegetation with the data of basic indicators of biogas productivity determined by laboratory modeling.

Results. The possibility of using the leaf mass of oil radish grown under summer sowing conditions as a variant of its widespread green manure and bioconservation use for biogas production using the classical process of combined anaerobic fermentation with a digestate inoculum at normal incubation temperature was determined. The possibility of achieving a 90% level of effective realization of the biogas potential of cellulose-containing agrobiomass fermentation (in the value of 300 l_N/kg of organic dry matter) under conditions of moderate moisture content at a HTC in the range of 1.2–1.5 at a temperature in the range of 17–18 °C was proved. The nature of the biogas productivity of oilseed radish leaf mass was studied on the basis of dynamic graphs of daily fixation and the basic features of this process were determined in view of their consideration in practical aspects of biogas production.

Conclusions. The leaf mass of oil radish obtained during cultivation at the summer (intermediate) sowing period is an effective component of the basic raw material for biogas production in the cofermentation system with digestate inoculation options with an achievable biogas potential interval of 250–300 l_N/kg of organic dry matter. The limiting factors of this level of productivity are primarily hydrothermal regimes of the vegetation period to the flowering phase. Optimality is achieved at a moderate level of summer average daily temperatures (17–18 °C) and humidity (HTC 1.2–1.5).

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