

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХОДУ БІОГАЗУ З ГІБРИДІВ ЖИТА ОЗИМОГО ТА ТРИТИКАЛЕ ОЗИМОГО

Отримано 09 груд. 2024 р.; рекомендовано до публікації 27 черв. 2025 р.
Доступно онлайн 30 черв. 2025 р.

Кучерук П. П.¹, Козюпа Т. К.²

Автор для кореспонденції: Кучерук Петро,
e-mail: kucheruk@secbiomass.com

¹ канд. техн. наук

<https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>

² магістр

<https://orcid.org/0000-0002-8061-9430>

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

У процесі роботи було проведено серію експериментальних досліджень потенціалу виходу біогазу з двох проміжних культур (жита озимого та тритикале озимого), вирощених в умовах України. Визначено масову частку сухих речовин та сухої органічної сировини обох культур, зіставлено з силосом кукурудзи за аналогічними показниками. Експериментально встановлено вихід метану в 98 нл $\text{CH}_4/\text{кг}$ та 68 нл $\text{CH}_4/\text{кг}$ свіжої маси для жита озимого та тритикале озимого, відповідно. У перерахунку на абсолютно суху беззолну масу вихід метану становив 333 нл $\text{CH}_4/\text{кг}$ СОР та 365 нл $\text{CH}_4/\text{кг}$ СОР для жита озимого та тритикале озимого, відповідно. Проведено порівняння потенціалу виходу метану для досліджених зразків сировини та силосу кукурудзи. Показано, що жито озиме, за досягнутої врожайності, має вищий питомий вихід метану, аніж тритикале озиме, як на одиницю площі ріллі ($5400 \text{ нм}^3 \text{CH}_4/\text{га}$ для жита проти $4600 \text{ нм}^3 \text{CH}_4/\text{га}$ для тритикале), так і на одиницю свіжої маси ($120 \text{ нм}^3 \text{CH}_4/\text{т}$ для жита проти $65 \text{ нм}^3 \text{CH}_4/\text{т}$ для тритикале). Встановлено, що за показником середнього виходу метану на одиницю посівної площі вирощування досліджених гібридів жита та тритикале озимих є зіставним з вирощуванням силосу кукурудзи, а тому можуть бути рекомендовані для виробництва біогазу як альтернативна силосу кукурудзи сировина.

Ключові слова: біогаз, проміжні культури, жито озиме, тритикале озиме, передовий біометан.

EXPERIMENTAL STUDY OF BIOGAS PRODUCTION OF WINTER RYE AND WINTER TRITICALE HYBRIDS

Received Dec. 09, 2025; accepted Jun. 27, 2025
Available online Jun. 30, 2025

Kucheruk P. P.¹, Kozupa T. K.²

Author for correspondence: Kucheruk Petro,
e-mail: kucheruk@secbiomass.com

A series of experimental studies of the biogas production potential of two intermediate crops (winter rye and winter triticale) grown in Ukraine were carried out. The dry matter and organic dry matter contents of both crops were determined and compared with corn silage in terms of similar indicators. The methane yield of 98 NiCH_4/kg and 68 NiCH_4/kg of fresh weight for winter rye and winter triticale, respectively, was experimentally determined. In terms of absolutely dry ash-free weight, the methane yield was 333 $\text{NiCH}_4/\text{kgDM}$ and 365 $\text{NiCH}_4/\text{kgDM}$ for winter rye and winter triticale, respectively. The methane potential of the analysed samples and corn silage was compared. It is shown that winter rye, at the achieved yield, has a higher specific methane yield than winter triticale, both per unit area of arable land ($5400 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ha}$ for rye versus $4600 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ha}$ for triticale) and per unit fresh weight ($120 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t}$ for rye versus $65 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t}$ for triticale). It was found that in terms of average methane yield per unit area, the cultivation of the studied hybrids of winter rye and triticale is comparable to the cultivation of corn silage, and therefore can be recommended for biogas production as a substrate alternative to corn silage.

Keywords: biogas, intermediate crops, winter rye, winter triticale, advanced biomethane.

¹ Cand. of Science (Tech.)

<https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>

² Master of Science

<https://orcid.org/0000-0002-8061-9430>

¹ Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

Перелік використаних скорочень та позначень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

СР – суха речовина

COP – суха органічна речовина

Проміжні або покривні культури сьогодні розглядаються як альтернатива та/або доповнення до широко використовуваного силосу кукурудзи. Залучення проміжних культур дозволяє значно збільшити загальний потенціал виробництва біогазу без використання додаткових ресурсів землі і негативного впливу на урожайність ріллі. Застосування проміжних культур для виробництва біогазу рекомендується Європейською біогазовою асоціацією, а перспективний потенціал виробництва біогазу та біометану на рівні ЄС уже передбачає використання таких культур. На практиці це є раціональним рішенням, оскільки на відміну від силосу кукурудзи, біогаз з проміжних культур належить до передових біопалив згідно з Директивою ЄС REDIII, а самі проміжні культури внесені до Додатку 9 (частина А) цієї директиви, що дозволяє отримувати подвійне зарахування енергії в частині зобов'язань щодо частки використання ВДЕ. Отже, біогаз та біометан, отриманий з проміжних культур, матиме також ринкові переваги, оскільки біопалива з сировини з Додатку 9 (частина А) є пріоритетними при заміщенні викопних палив в Європейському Союзі. Для України, з огляду на те, що в нас ще не впроваджено в дію Директиву ЄС REDIII, перевага використання проміжних культур на біогаз буде при виробництві та наступному експорті біометану на ринок біопалив в ЄС. Практично всі ринкові передумови в Україні для експорту біометану вже створено, і практичний інтерес до використання сталої біомаси для виробництва передового біометану зростатиме.

Постановка завдання

За оцінкою Біоенергетичної асоціації України, при використанні 20 % площ ріллі в Україні під вирощування проміжних / покривних культур у міжсезонний період потенціал виробництва метану з них може досягати 9,8 млрд м³ CH₄/рік, що становить 45 % загального потенціалу виробництва CH₄ в Україні. З погляду ефективності використання землі перевага у використанні проміжної культури буде для тієї культури, що матиме досить високу урожайність у перерахунку на 1 т сухої речовини з 1 га. Як можна побачити на рис. 1, для кліматичних умов півночі Німеччини (громада Шубі), озиме жито та озиме тритикале показали вищу, в порівнянні з іншими проміжними культурами, урожайність, на рівні 15,8 т СР/га та 15,1 т СР/га, відповідно. За цим показником вказані культури є сумірними з силосом кукурудзи, що робить їх перспективною альтернативною сировиною для виробництва біогазу.

Результати досліджень потенціалу виходу біогазу з жита та тритикале озимих підтверджують перспективність їх використання як сировини для біогазу. Водночас, на урожайність культур та загальний потенціал виходу метану з розрахунку на 1 га землі значно впливає сорт рослин, регіон їх вирощування та агрокліматичні умови, а

СЖ – силос житній

н. у. – нормальні умови

нл – літри за н. у.

також період вегетації й фаза росту рослин, при якій проводиться збір урожаю.

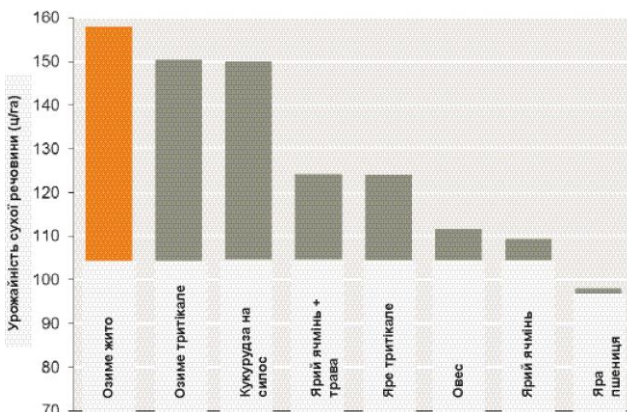


Рис. 1. Урожайність поширених зернових культур у перерахунку на суху речовину [1]

Fig. 1. Dry matter yield of common grain crops [1]

Так, у дослідженні [2] було встановлено потенціал виходу біогазу з 6 різних сортів жита озимого (*Elbon*, *Wheeler*, *PH2019*, *Wrens Abruzzi*, *Winter Grazer* та *ISURF*), вирощених в умовах США на дослідній ділянці Університету штату Іллінойс, Нормал (Іллінойс), у процесі їх монузброджування. При посіві восени та зборі жита в травні середня врожайність сортів становила 4,9 т СР/га, що, втім, є досить низьким показником. Вихід біогазу з отриманих зразків жита, без їх попередньої обробки, становив 175÷225 нм³/т СОР. За іншими результатами досліджень [3], питомий вихід метану з жита озимого, вирощеного в кліматичних умовах Франції (експериментальні ділянки «Arvalis», Монтардон, та «Biometharn», Егфонт), становив 348 нм³ CH₄/т СОР при додаванні порошку CaO у концентрації 60 г/кг СОР. Дещо нижчий питомий вихід метану з жита озимого встановлено в дослідженні [4] – на рівні 293 нм³ CH₄/т СОР. При цьому питомий потенціал на одиницю площі землі при середній за 3 роки врожайності жита, зібраного у фазі ранньої воскової стиглості, 17,7 т СР/га становив 4800 нм³ CH₄/га. Питомий вихід біогазу з жита озимого, вирощеного в умовах Бельгії, встановлено на рівні 170 нм³/т свіжої маси [5]. При цьому врожайність жита на момент збору становила 32 т/га при вмісті сухих речовин 26 %, а питомий потенціал виходу метану – 3200 нм³ CH₄/га. У дослідженні [7] встановлено потенціал виходу метану з жита сорту *Besku*, вирощеного в умовах Австрії та зібраного у фазі воскової стиглості, на рівні 243 нм³ CH₄/т СОР та 3350 нм³ CH₄/га, за врожайності 15 т СР/га. В Україні також проводились дослідження виходу біогазу з жита озимого [6]. Питомий вихід біогазу з 7 різних сортів жита, зібраних у фазі виходу в трубку (третя макростадія у фазах розвитку зернових за міжнародною шкалою BBCH), становив 280÷363 нм³/т СОР.

При використанні тритикале озимого на функціонуючій біогазовій установці в Ломбардії (Італія) було встановлено, що вихід біогазу з нього становить 594 нм³/т СОР, метану – 315 нм³ CH₄/т СОР [8]. Дещо вищий показник питомого виходу метану отримано при монозброджуванні тритикале озимого на діючій біогазовій установці Söderåsens Bioenergi у Швеції – на рівні 396 нм³ CH₄/т СОР [9]. За даними [10], потенціал виходу біогазу з тритикале озимого сорту *Tulus*, вирощеного в умовах Швеції та зібраного у фазі воскової стиглості, становить 397 нм³ CH₄/т СОР, що в перерахунку на площу ріллі дає 5687 нм³ CH₄/га за врожайності 15 т СР/га. Відносно менший вихід метану показали два сорти тритикале озимого, *Tremplin* та *Talentro*, вирощені в умовах Австрії та зібрані у фазі молочної стиглості, на рівні 236÷265 нм³ CH₄/т СОР [7]. При цьому очікуваний вихід метану на одиницю площі землі за врожайності 15 т СР/га становить 3400÷3600 нм³ CH₄/га. У дослідженні [11] було показано,

що при вирощуванні двох сортів тритикале, *Bienvenù* та *Talentro*, в умовах Північної Італії прогнозований питомий потенціал виробництва метану на 1 га землі становить 5775 та 7700 нм³ CH₄/га, відповідно, що є найвищим показником серед розглянутих результатів досліджень. Можна бачити, що для сорту *Talentro* в цьому дослідженні отримано більш ніж вдвічі вище значення потенціалу виходу метану на 1 га землі, що може вказувати на суттєвий вплив регіону вирощування та відповідних кліматичних умов. Результатів дослідження виходу біогазу з тритикале озимого, вирощеного в умовах України, наразі не виявлено.

Зведену інформацію щодо потенціалу виходу біогазу з різних сортів жита та тритикале озимих, вирощених у різних регіонах світу та зібраних у різних фазах вегетації, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Потенціал виходу біогазу з жита і тритикале озимих

Table 1. Biogas yields from winter rye and winter triticale

Культура	Сорт	Регіон вирощування	Фаза стиглості при зборі	Врожайність, т СР/га	СР, % СМ	СОР, % СР	Вихід біогазу, нм ³ /т СОР	Вихід метану, нм ³ CH ₄ /т СОР	Потенціал виходу метану на одиницю площі	Джерело
Жито озиме	<i>Elbon</i>	США, Midwest	Повна	н/з	94,21	87,6	174,8	104,9	н/з	[2]
	<i>Wheeler</i>				95,1	86,18	174,6	104,7		
	<i>PH2019</i>				95,79	88,21	193,7	116,2		
	<i>Wrens Abruzzi</i>				96,09	89,73	182,2	109,3		
	<i>Winter Grazer</i>				97,49	90,78	213,3	128,0		
	<i>ISURF Mix</i>				96,43	87,48	225,2	135,1		
	н/з	Франція	Повна поява суцвіття	н/з	25	95,2	580 ^a	348	н/з	[3]
	н/з	Німеччина	Рання воскова	17,7	38,5	н/з	488,3	293	4823	[4]
	н/з	Бельгія	н/з	8,32	26	н/з	170 ^b	н/з	3200	[5]
	<i>Slobozhanets F1</i>	Україна	Вихід в трубку	4,9	30,7	н/з	363,4	218,1	1781	[6]
	<i>Jupiter F1</i>			5,5	34,6		319,7	191,8	1759	
	<i>Saturn F1</i>			7,8	37,5		284,0	170,4	2215	
	<i>Pamyat`Hudoyerka</i>			6,6	36,4		314,1	188,4	2073	
	<i>Hamarka</i>			9,2	35,7		306,9	184,1	2824	
	<i>Stoir</i>			6,7	37,6		281,5	168,9	1886	
	<i>Dikhar</i>			6,3	36,6		325,7	195,4	2052	
	<i>Beskud</i>	Австрія	Воскова	15	н/з	н/з	405,0	243,0	3350	[7]
Тритикале озиме	н/з	Італія	н/з	н/з	33	94	594,0	315	н/з	[8]
	н/з	Швеція	Рання воскова	н/з	37	95,70	660,0	396	н/з	[9]
	<i>Tulus</i>	Швеція	Воскова	15	35,8	95,5	661,7	397,0	5687	[10]
	<i>Tremplin</i>	Австрія	Молочна	15	н/з	н/з	441,7	265,0	3600	[7]
	<i>Talentro</i>						393,3	236,0	3400	
	<i>Bienvenù</i>	Італія	н/з	15,5	18	н/з	621 ^c	372,6 ^c	5775	[11]
	<i>Talentro</i>			17,5	18,5		733 ^c	440 ^c	7700	

Примітки: ^a – проводилася попередня обробка з додаванням СаО з концентрацією 60 г/кг СОР; ^b – вихід газу наведений у нм³/т СМ; ^c – вихід газу наведений у нм³/т СР; н/з – не зазначено

Як видно з табл. 1, діапазон значень питомого виходу метану коливаються в досить широкому діапазоні, від 104,7 до 348 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{т СОР}$ та 1759–4823 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{га}$ для жита озимого та 236–397 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{тСОР}$ та 3400–7700 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{га}$ – для тритикале озимого. Для порівняння, кукурудза на силос (гібриди *Кардинал*, *Шедевр*, *Слобожанський*, *Світанок*, *Варта*), вирощена в умовах України та забрана у фазах між ранньою восковою стиглістю та ранньою повною стиглістю, має потенціал виходу метану на рівні 330–360 $\text{nm}^3/\text{т СОР}$ [12]. За врожайності 9,9–17,7 т СР/га очікуваний вихід метану на 1 га землі становить 3400–6300 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{га}$. Схожі результати виходу метану з кукурудзи на силос отримано в дослідженні [13], з використанням гібридів *Амарос*, *Бога-тир*, *КВС 381*, *Каріфолс*, вирощених в умовах півночі України (Житомирська обл). У цьому дослідженні оцінений питомий вихід метану з різних гібридів кукурудзи становив 272,1–356,6 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{т СОР}$, а в перерахунку на 1 га землі – 3860–6630 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{га}$. Наведені дані показують, що проміжні культури, як-от жито й тритикале озимі, можна розглядати як альтернативну сировину кукурудзи сировину при виробництві біогазу та біометану.

Водночас можна бачити, що на потенціал виходу біогазу з проміжних культур може суттєво впливати сорт культури та регіон вирощування. Зважаючи на вагомість проміжних культур в оцінці потенціалу виробництва метану в Україні, недостатню вивченість продуктивності за біогазом різних сортів жита й тритикале озимих, вбачається актуальною задача експериментального дослідження ефективності анаеробного зброджування рослинної біомаси цих культур, вирощених в Україні, та отримання нових даних про питомий вихід біогазу та метану і загальний енергетичний потенціал використання ріллі ($\text{nm}^3\text{CH}_4/[\text{га}\cdot\text{рік}]$).

Для проведення експериментального дослідження було використано зразки жита озимого німецької селекції та тритикале озимого української селекції, вирощених в умовах України. Три (3) дослідні зразки силосу жита озимого було надано компанією KWS, а саме: (а) силос житній СЖ 39, зібраний до виходу колосу; (б) силос житній СЖ 65, зібраний після цвітіння; (в) силос житній СЖ 73, зібраний у фазі молочно-воскової стиглості. Надані зразки є гібридним житом власного сорту компанії KWS – КВС ПРОПАУЕР, вирощеного в умовах України в 2021 році. Це гібрид подвійного призначення, що може заготовлятися як у фазі прапорцевого листка, так і у фазі молочно-воскової стиглості, та дає змогу повністю відмовитися від використання регуляторів росту і забезпечує в молочно-восковій фазі врожайність на рівні 45 т/га і більше. Три (3) дослідні зразки тритикале озимого було надано компанією СТОВ «Перемога»: (а) сорт Егор, (б) сорт Пудік та (в) сорт Велетень, власної селекції компанії. Урожайність наданих зразків тритикале, вирощених в умовах Фастівського району Київської області, на момент збору становила: для сорту Егор – 81 т/га, Велетень – 70 т/га, Пудік – 64 т/га.

Дослідження проведено в два етапи: на етапі 1 досліджено вихід біогазу зі зразків жита озимого, на етапі 2 – зі зразків тритикале озимого. Усі зразки жита озимого було доставлено в лабораторію в липні 2021 року. Відбір усіх зразків тритикале проведено 14 травня 2024 року зрізанням усієї рослини на площі 1 m^2 для кожного сорту. Середня висота зрізаних стебел становила 110 см, найбільша – 140 см.

Дослідження проведено в лабораторії теплофізичних проблем біоенергетики відділу Теплофізичних проблем систем тепlopостачання Інституту технічної теплофізики НАНУ.

Методи дослідження

Вміст сухих речовин (СР) та сухих органічних речовин (СОР) визначали згідно з ГОСТ 26713-85 «Добрива органічні. Метод визначення вологи й сухого залишку» та ДСТУ-П CEN/TS 14775:2012 «Біопаливо тверде. Метод визначення вмісту золи», відповідно. Вміст СР визначали висушуванням зразків у сушильній шафі «ThermoLab» СНОЛ 58/350, вміст СОР – у муфельній печі ThermoLab СНОЛ 7.2/1100. Масу досліджених матеріалів виміряно за допомогою лабораторних ваг марки «Acculab» ALC-150.3-U, з класом точності $\pm 0,001$ г. Вимірювання об'єму виділеного біогазу виконували візуальним зчитуванням показів градуйованої мірної шкали на рухомій частині евідіометра, похибка вимірювання становить ± 10 мл для кожного зчитування показів. Визначення вмісту CH_4 та CO_2 у виділеному біогазі виконували портативним газоаналізатором Landtec GEM-500, похибка вимірювання становить 0,1–6,0 %, залежно від фактичної концентрації газу. Температурні показники вимірювали за допомогою лабораторного ртутного термометра типу ТЛ 4-2.

Пробопідготовка та модельні суміші. Усі зразки жита озимого було досліджено у формі силосу, доставленого в лабораторію в липні 2021 року. Зразки стебел тритикале перед дослідженням було подрібнено до частинок з лінійними розмірами 8–12 мм (рис. 2).



Рис. 2. Подрібнені зразки листя (зліва) та стовбуру (справа) тритикале

Fig. 2. Fragmented samples of leaves (left) and stems (right) of triticale

Кожен зразок жита і тритикале було змішано з інокулятом у 3 повторностях, і утворені модельні суміші зброджено в періодичному режимі за температури 37 ± 1 °C. При цьому, початкова концентрація СОР силосу жита в модельних сумішах становила 6,87–7,53 г СОР/кг, тритикале – 7,51–7,59 г СОР/кг. Співвідношення маси СОР субстрату до маси СОР інокуляту $\frac{COP_{\text{субстрат}}}{COP_{\text{інокулят}}}$ у модель-

них сумішах становило 0,4 для тритикале та $0,47 \pm 0,51$ – для силосу жита, що відповідає рекомендаціям німецького стандарту VDI 4630 [14].

Опис дослідної установки. Компонівка однієї установки зі стенду для дослідження процесу метанового

бродиння наведена на рис. 3. Стенд для досліджень складений з набору аналогічних газошліхних систем, основними елементами яких є скляний біореактор з газошліхною кришкою з капрону повним об'ємом $1,55 \text{ дм}^3$ та евідіометр з ПВХ з робочим об'ємом $1,6 \text{ дм}^3$, з'єднані між собою гнучкою трубкою з силікону. Біореактори розміщено в ємності з водою, що виконує роль теплоносія. Підігрів та контроль температури процесу бродиння в біореакторах реалізовано за допомогою зануреного в ємність з водою нагрівача типу Aquael Easyheater, з фактичним гістерезисом ± 1 °C. Для забезпечення рівномірного розподілу тепла від нагрівача по всьому об'єму ємності з водою використано крильчатковий насос зануреного типу.

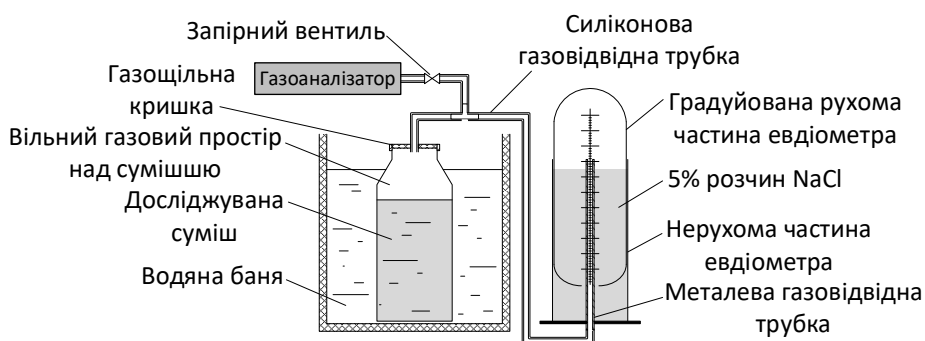


Рис. 3. Система реактор–евдіометр, застосована в досліді

Fig. 3. Reactor-eudiometer system used in the experiment

Внаслідок виділення в біореакторі біогазу та зростання тиску в газовому просторі системи рухома частина евідіометра піднімається на певну висоту, що відповідає визначеному об'єму газу. Задля уникнення втрати накопиченого біогазу шляхом абсорбції нерухому частину евідіометра заповнювали 5%-м водним розчином NaCl. Аналіз вмісту у виділеному біогазі CH_4 та CO_2 виконували шляхом відкачування біогазу з евідіометра за допомогою вмонтованої в газоаналізаторі помпи. Заміри складу біогазу виконували в міру наповнення евідіометра щонайменше до 300 дм^3 , що дозволяло отримувати стабілізовані покази газоаналізатора. Вимірювання обсягу виділеного біогазу проводили до моменту досягнення значення добового приросту виходу біогазу менше 5 % сумарного накопиченого об'єму.

Основними показниками, які визначали в процесі проведення дослідження, були:

приведений до нормальних умов (н. у., тиск $P_0 = 1013 \text{ гПа}$, температура $T_0 = 273 \text{ К}$) кумулятивний вихід біогазу $V_{\text{БГ, кум}_i}^{\text{н.у.}}$, нмл, i -го заміру:

$$V_{\text{БГ, кум}_i}^{\text{н.у.}} = V_{\text{БГ, кум}_i} \cdot \frac{(P_{\text{атм}_i} - P_{\text{вод.пар}_i}) \cdot T_0}{P_0 \cdot T_{\text{атм}_i}}, \quad (1)$$

де $V_{\text{БГ, кум}_i}$ – кумулятивний вихід біогазу i -го заміру за умов експерименту, мл;

$P_{\text{атм}_i}$ – атмосферний тиск i -го заміру в приміщенні, де проводився експеримент, гПа;

$T_{\text{атм}_i}$ – температура i -го заміру в приміщенні, де проводився експеримент, гПа;

$P_{\text{вод.пар}_i}$ – тиск насиченої водяної пари в газовому просторі реактора як функція температури модельної суміші i -го заміру, гПа;

приведений до н. у. (тиск $P_0 = 1013 \text{ гПа}$, температура $T_0 = 273 \text{ К}$) кумулятивний вихід метану $V_{\text{CH}_4, \text{ кум}_i}^{\text{н.у.}}$, нмл, i -го заміру:

$$V_{\text{CH}_4, \text{ кум}_i}^{\text{н.у.}} = V_{\text{CH}_4, \text{ кум}_i} \cdot \frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{атм}} - P_{\text{вод.пар}_i}}, \quad (2)$$

де $V_{\text{CH}_4, \text{ кум}_i}$ – кумулятивний вихід метану за умов експерименту i -го заміру, мл;

скориговані на газовий простір у реакторі та евідіометрі $V_{\text{БГ, кум}_{i=n}}^{\text{зкоригов.}}$ та $V_{\text{CH}_4, \text{ кум}_i}^{\text{зкоригов.}}$, відповідно, кумулятивні виходи біогазу та метану i -го заміру, мл:

$$V_{\text{БГ, кум}_{i=n}}^{\text{зкоригов.}} = \left[V_{\text{БГ, кум}_{i=n}} + \Delta V_{i=n} \cdot (V_p - V_{\text{сум}} + V_{\text{евд}_0}) \right] \cdot \frac{(P_{\text{атм}_i} - P_{\text{вод.пар}_i}) \cdot T_0}{P_0 \cdot T_{\text{атм}_i}} \quad (3)$$

$$V_{\text{зкоригов.}}^{\text{CH}_4, \text{ кум}_i} = V_{\text{CH}_4, \text{ кум}_i}^{\text{н.у.}} + \left(V_{\text{CH}_4, \text{ кум}_i}^{\text{н.у.}} - V_{\text{CH}_4, \text{ кум}_{i-1}}^{\text{н.у.}} \right) \cdot \frac{V_{\text{евд}_0} + (V_p - V_{\text{сум}})}{V_{\text{н.у.}}^{\text{БГ, кум}_i}}, \quad (4)$$

де $\Delta V_{i=n}$ – накопичений між двома замірами об'єм біогазу на кінець експерименту, мл;

V_p – повний об'єм біореактора, мл;

$V_{\text{евд}_0}$ – нульовий об'єм рухомої частини відповідного евідіометра, мл;

$V_{\text{сум}}$ – об'єм внесеної модельної суміші у відповідний реактор, мл;

кумулятивний питомий вихід біогазу та метану на одиницю внесеної маси СОР власне субстрату $Q_{\text{БГ, кумСОР, суб}}$ та

$Q_{\text{CH}_4, \text{ кумСОР, суб}}$, відповідно, нмл/гСОР:

$$Q_{\text{БГ, кумСОР, суб}} = \frac{Q_{\text{БГ, кумСОР}} \cdot m_{\text{СОР сум}} - Q_{\text{БГ, кумСОР}}^{\text{бланк}} \cdot m_{\text{СОР інок}}}{m_{\text{СОР суб}}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{CH}_4, \text{ кумСОР, суб}} = \frac{Q_{\text{CH}_4, \text{ кумСОР}} \cdot m_{\text{СОР сум}} - Q_{\text{CH}_4, \text{ кумСОР}}^{\text{бланк}} \cdot m_{\text{СОР інок}}}{m_{\text{СОР суб}}}, \quad (6)$$

де $Q_{\text{БГ, кумСОР}}$ – кумулятивний питомий вихід біогазу на одиницю внесеної маси СОР всієї суміші реактора, нмл/г СОР;

$m_{\text{СОР сум}}$ – маса внесеної СОР всієї модельної суміші реактора, г;

$Q_{\text{БГ, кумСОР}}^{\text{бланк}}$ – накопичений за весь час експерименту питомий об'єм біогазу в бланк-реакторі (реактор з інокулятом без внесення зразку досліджуваного матеріалу) у перерахунку на одиницю СОР інокуляту, нмл/г СОР;

$m_{\text{СОР інок}}$ – маса СОР у внесеному інокуляті в бланк-реакторі, г;

$Q_{\text{CH}_4, \text{ кумСОР}}$ – кумулятивний питомий вихід метану на одиницю внесеної маси СОР усієї суміші реактора, нмл/г СОР;

$Q_{\text{CH}_4, \text{ кумСОР}}^{\text{бланк}}$ – накопичений за весь час експерименту питомий об'єм метану в бланк-реакторі, у перерахунку на одиницю СОР інокуляту, нмл/г.

Виклад основного матеріалу

Визначення вмісту СР та СОР

Жито озиме. У табл. 2 наведено результати вимірювання вмісту СР та СОР у наданих зразках силосу житнього та інокуляту, використаних на етапі 1 досліджень.

Як видно з табл. 2, зразки силосу житнього істотно відрізняються як за вмістом сухих речовин, так і за зольністю сухої речовини. Так, при збільшенні тривалості вегетації жита з 39 до 73 днів вміст СР та СОР на одиницю маси збільшується, а вміст золи в сухій речовині – навпаки, зменшується. На рис. 4 представлено апроксимацію залежності частки СОР у біомасі житнього силосу від періоду вегетації жита з використанням експоненційної

функції виду $y = 0,1587 e^{0,0103x}$, де y – частка СОР, ч.о., x – період вегетації, дб.

Таблиця 2. Результати вимірювання вмісту СР та СОР у зразках силосу жита й інокуляту

Table 2. Results of estimating the DM and ODM content in rye silage samples and inoculum

Код матеріалу	СР, % свіжої маси	СОР, % СР
СЖ-39	26,78	89,05
СЖ-65	32,99	91,41
СЖ-73	36,13	94,97
Інокулят лабораторний	2,47	60,82

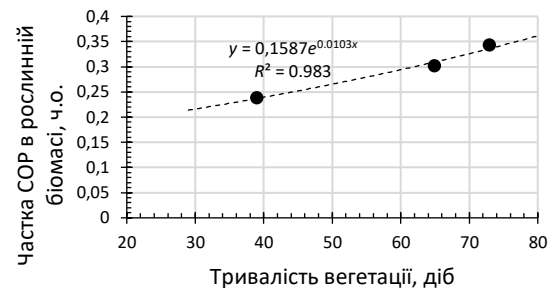


Рис. 4. Залежність частки СОР у біомасі жита від періоду вегетації

Fig. 4. ODM content in a rye biomass as a function of vegetation period

За врожайності жита 45 т/га, вихід СОР з 1 га площі посівів становитиме: 10,73 т СОР/га для зразка СЖ-39, 13,57 т СОР/га – для зразка СЖ-65, 15,44 т СОР/га – для зразка СЖ-73. З погляду потенціалу виробництва біогазу потрібно досягати більшої частки СОР у рослинній біомасі. На практиці залежність вмісту СОР від періоду вегетації (рис. 4) є важливою, оскільки дозволяє прогнозувати такий вміст за зміни планового періоду вегетації. На останній можуть вплинути погодні фактори, такі як середня температура та сума опадів протягом періоду вегетації.

Тритикале озиме. Результати вимірювання вмісту СР та СОР у зразках тритикале та інокуляту, використаних на етапі 2 досліджень, наведено в табл. 3.

З урахуванням значень досягнутої врожайності для досліджених сортів тритикале та вмісту в них СР та СОР оцінений вихід СОР з 1 га становитиме: 13,66 т СОР/га – для сорту Єгор, 11,79 т СОР/га – для сорту Велетень, і 12,25 т СОР/га – для сорту Пудік. За цим показником зразки сортів тритикале зіставні зі зразками жита озимого СЖ-65.

Таблиця 3. Результати вимірювання вмісту СР та СОР у зразках тритикале

Table 3. Results of measuring the DM and ODM content in triticale samples

Код матеріалу	СР, % свіжої маси	СОР, % СР
Егор	18,75	89,95
Велетень	18,63	90,41
Пудік	21,09	90,72
Інокулят лабораторний	3,4	57,9

Результати досліджень метанового бродіння

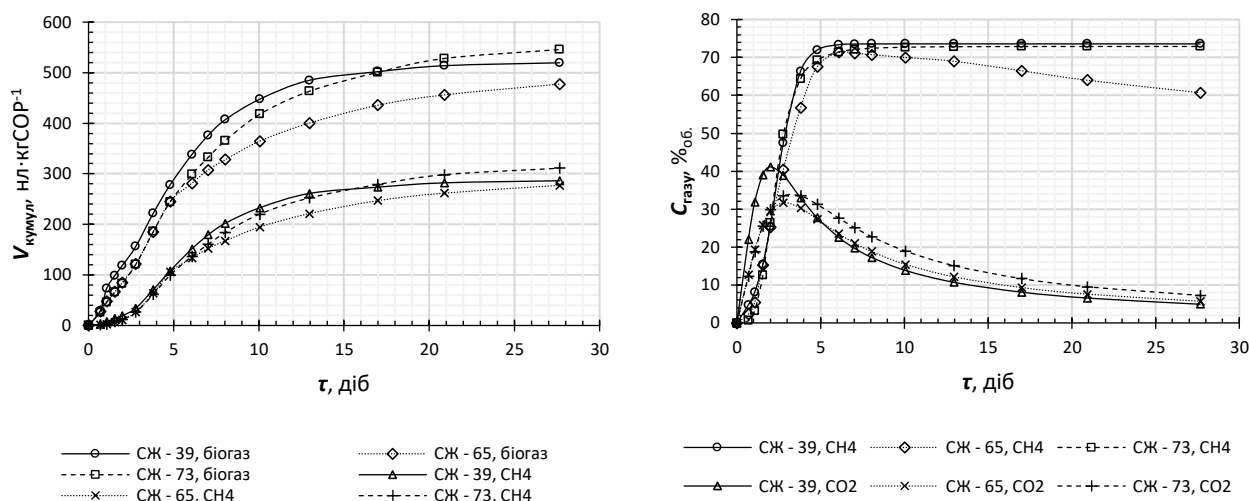
Силос жита озимого. Показники виходу біогазу та метану при зброджуванні силосу жита наведено в табл. 4. Середній накопичений вихід біогазу з різних зразків жита коливається в межах 477,4÷529,3 нл·кг СОР⁻¹, з максимумом виходу біогазу для зразка СЖ-73 (529,3 нл·кг СОР⁻¹). Середній накопичений вихід метану коливається в межах 301,5÷351 нл СН₄·кг СОР⁻¹, з максимумом виходу метану для зразка СЖ-73 (351 нл СН₄·кг СОР⁻¹) за середньої концентрації метану 66,4 %.

Таблиця 4. Питомий вихід біогазу та метану з силосу жита озимого

Table 4. Specific biogas and methane yield from rye silage

Код матеріалу	Показники				
	Кумулятивний вихід біогазу		Кумулятивний вихід СН ₄		С _{СН₄}
	нл·кг ⁻¹	нл·кг СОР ⁻¹	нл СН ₄ ·кг ⁻¹	нл СН ₄ ·кг СОР ⁻¹	
СЖ-39	126,21	529,20	82,61	346,37	65,5
СЖ-65	143,94	477,38	90,89	301,45	63,1
СЖ-73	181,59	529,29	120,44	351,05	66,4

Зміна накопиченого питомого виходу біогазу та метану на одиницю маси СОР субстрату в часі наведена на рис. 5, а. Динаміка зміни концентрації СН₄ та СО₂ у біогазі в часі показана на рис. 5, б.



а

б

Рис. 5. Зміна накопиченого питомого виходу біогазу та метану (а) в часі, зміна концентрації СН₄ та СО₂ у біогазі в часі (б)Fig. 5. Changes in the cumulative specific yield of biogas and methane (a) over time, changes in the concentration of CH₄ and CO₂ in biogas over time (b)

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням тривалості вегетації жита озимого збільшується питомий вихід метану на одиницю маси СОР. Так, під час збирання до виходу колоса (зразок СЖ-39) кількість отриманого метану становить до 350 нл СН₄/кг СОР, під час збирання після цвітіння (зразок СЖ-65) цей показник дещо знижується (до 301 нл СН₄/кг СОР). Під час збирання у фазі молочно-воскової стиглості спостерігаються найвищі показники продуктивності силосу за метаном. Найбільший питомий вихід метану (351 нл СН₄/кг СОР) встановлено

для жита, зібраного у фазі молочно-воскової стиглості, що є сумірним з потенціалом виходу СН₄ із силосу кукурудзи (330–360 нл СН₄/кг СОР [12]). Силос, заготовлений у фазі прапорцевого листка (кінець квітня — початок травня), також показує високі результати. Збирання в цей період є доцільним для господарств з нормальним вологозабезпеченням ще й тому, що після жита може бути висіяна інша культура. За врожайності 45 т/га при зборі жита озимого у фазі молочно-воскової стиглості потенціал виходу метану на одиницю площі землі становитиме

5400 нм³ CH₄/га, що також є зіставним з аналогічним показником для силосу кукурудзи (3400–6300 нм³ CH₄/га за врожайності 39–52 т/га [15]).

Тритикале озиме. Показники виходу біогазу та метану при зброджуванні тритикале наведено в табл. 5. Середній накопичений вихід біогазу для різних зразків коливається в межах 531,32÷570,76 нл·кгCOP-1, з максимумом виходу біогазу для зразка Пудік. Середній на-

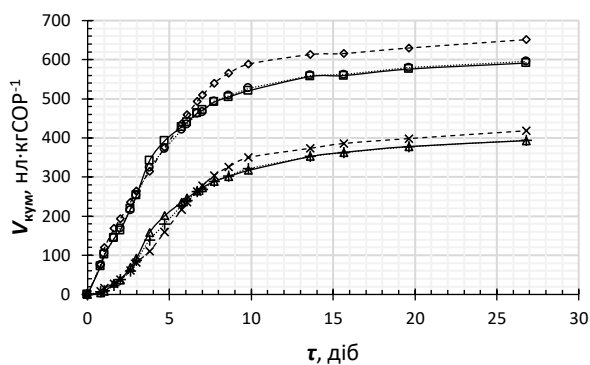
копичений вихід метану коливається в межах 362,7÷368,1 нл CH₄·кг COP-1, з максимумом виходу метану для зразка Єгор за середньої концентрації метану 66,1 %.

Зміна накопиченого питомого виходу біогазу та метану на одиницю маси COP субстрату в часі наведена на рис. 6, а. Динаміка зміни концентрації CH₄ та CO₂ у біогазі в часі показана на рис. 6, б.

Таблиця 5. Питомий вихід біогазу та метану зі зразків тритикале озимого

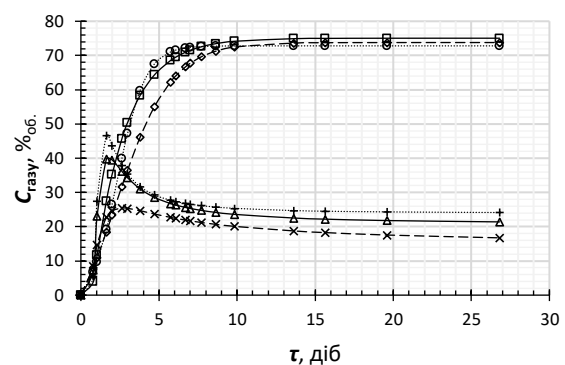
Table 5. Specific biogas and methane yields from triticale samples

Код матеріалу	Показники				
	Кумулятивний вихід біогазу		Кумулятивний вихід CH ₄		CCH ₄
	нл·кг-1	нл·кг COP-1	нл CH ₄ ·кг-1	нл CH ₄ ·кг COP-1	
Єгор	94,73	566,61	66,60	368,08	66,1
Велетень	87,94	531,32	60,48	362,74	61,1
Пудік	108,43	570,76	75,72	364,34	66



—□— Єгор, біогаз ---◇--- Велетень, біогаз
 ---○--- Пудік, біогаз —▲— Єгор, CH₄
 ---×--- Велетень, CH₄ ---+--- Пудік, CH₄

а



—□— Єгор, CH₄ ---◇--- Велетень, CH₄
 ---○--- Пудік, CH₄ —▲— Єгор, CO₂
 ---×--- Велетень, CO₂ ---+--- Пудік, CO₂

б

Рис. 6. Вихід біогазу та метану з тритикале і концентрація CH₄ та CO₂ в біогазі

Fig. 6. Biogas and methane yields from triticale and CH₄ and CO₂ concentrations in biogas

За результатами експерименту найвищу продуктивність за метаном показав сорт Єгор з потенціалом виходу CH₄ на рівні 368,1 нл CH₄·кг COP-1, при цьому найвищий потенціал виходу CH₄ на одиницю свіжої маси, 75,72 нл CH₄·кг-1, має

сорт Пудік. Усі три сорти тритикале озимого мають сумірний потенціал виходу метану на одиницю свіжої маси та на одиницю маси COP, у порівнянні з силосом жита, зібраним у середині травня, та силосом кукурудзи (табл. 6).

Таблиця 6. Потенціал виходу метану з жита й тритикале озимих і силосу кукурудзи на 1 га землі

Table 6. Methane yield potential per 1 ha from winter rye, winter triticale and maize silage

Сировина	Потенціал виходу метану на одиницю площі, нм ³ CH ₄ /га	Потенціал виходу метану на одиницю маси, нм ³ CH ₄ /т
Жито-73	5400	120,4
Тритикале	4258–5028	60,8–69,7
Кукурудза	3400–6300	97,2–129,2

За врожайності сортів Єгор, Велетень та Пудік 81, 70 та 64 т/га, відповідно, потенціал виходу метану на одиницю посівної площі становитиме 5028, 4258 та

4462 нм³ CH₄/га, відповідно. Оскільки найвищий вихід COP з 1 га серед досліджених сортів тритикале (13,66 т COP/га для сорту Єгор) є нижчим, ніж для

силосу жита (15,44 т СОР/га для зразка СЖ-73) та для силосу кукурудзи (в середньому 16,2 т СОР/га), то на одиницю маси тритикале має найнижчі показники потенціалу виходу метану (рис. 7, а). Проте, враховуючи високу

урожайність тритикале (64–81 т/га проти 45 т/га для жита та 39–52 т/га для кукурудзи), потенціал виходу метану на одиницю площі землі є зрівняним як з житом, так і з кукурудзою на силос (рис. 7, б).

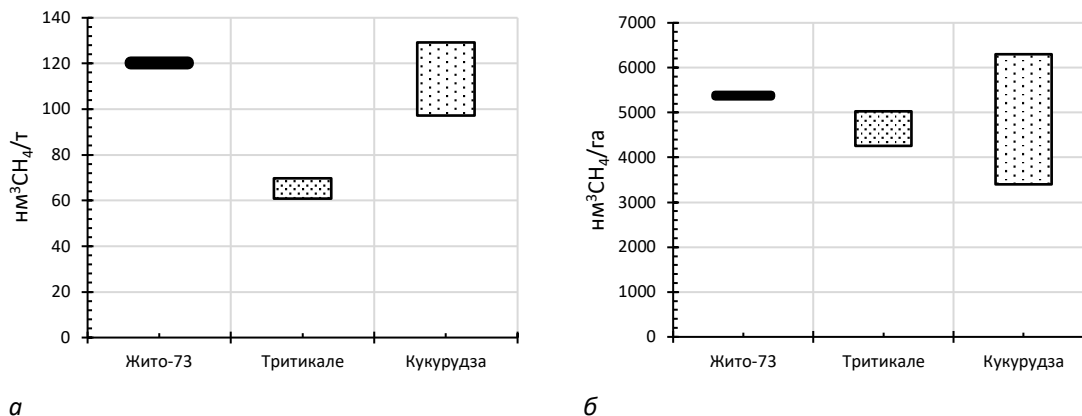


Рис. 7. Потенціал виходу метану на одиницю маси сировини (а) та на 1 га посівної площі (б)

Fig. 7. Methane yield potential per unit mass of feedstock (a) and 1 ha of cropping area (b)

Висновки

Впровадження та розширення практики вирощування проміжних культур на посівних площах в Україні в періоди між зборами основного врожаю дозволить суттєво збільшити потенціал виробництва біогазу та диверсифікувати джерела походження сталої сировини для виробництва передового біометану. Одними з найперспективніших видів проміжних культур з погляду ефективності використання земельних ресурсів для енергетики можуть бути жито озиме та тритикале озиме, що мають достатньо високу урожайність у кліматичних умовах України. За показниками питомого виходу метану на одиницю маси СОР та на одиницю площі посівних земель досліджені зразки жита й тритикале є сумірними з силосом кукурудзи, що традиційно використовується на біогаз. Це робить такі проміжні культури перспективною альтернативною сировиною для проєктів виробництва передового біометану в Україні.

ПОСИЛАННЯ

1. Сухина А. Злакові силоси – перспектива для виробництва біогазу. Пропозиція. 2022. URL: <https://propozitsiya.com/ua/zlakovi-sylosy-perspektyva-dlya-vyrobnnytva-biogazu> (дата звернення: 20.11.2024).
2. Anaerobic Digestion of Cereal Rye Cover Crop / L. Yang et al. Fermentation. 2022. Т. 8. № 11. С. 617. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation8110617> (дата звернення: 20.11.2024).
3. Long term alkaline storage and pretreatment process of cover crops for anaerobic digestion / C. Van Vlierberghe et al. Bioresource Technology. 2021. Т. 330. С. 124986. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124986> (дата звернення: 20.11.2024).
4. Energy crop production in double-cropping systems: Results from an experiment at seven sites / R. Graß et al. European Journal of Agronomy. 2013. Т. 51. С. 120–129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.004> (дата звернення: 20.11.2024).
5. Using rye as cover crop for bioenergy production: An environmental and economic assessment / E. Igos et al. Biomass and Bioenergy. 2016. Т. 95. С. 116–123. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.09.023> (дата звернення: 20.11.2024).
6. Jegorov D., Zmiievs'ka O., Dem'ianenko S. Use of winter rye for production of biogas. Visnyk agrarnoi nauky. 2018. Т. 96. № 5. С. 63–67. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201805-10> (дата звернення: 20.11.2024).
7. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations / T. Amon et al. Bioresource Technology. 2007. Т. 98. № 17. С. 3204–3212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.007> (дата звернення: 20.11.2024).
8. Greenhouse gas emissions of electricity and biomethane produced using the Biogasdoneright™ system: four case studies from Italy / L. Valli et al. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2017. Т. 11. № 5. С. 847–860. URL: <https://doi.org/10.1002/bbb.1789> (дата звернення: 20.11.2024).
9. Benefits of supplementing an industrial waste anaerobic digester with energy crops for increased biogas production / I. A. Nges et al. Waste Management. 2012. Т. 32. № 1. С. 53–59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.009> (дата звернення: 20.11.2024).
10. Comparing energy crops for biogas production – Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation / C. Gissén et al. Biomass and Bioenergy. 2014. Т. 64. С. 199–210. URL:

- <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.061> (дата звернення: 20.11.2024).
11. Biogas from dedicated energy crops in Northern Italy: electric energy generation costs / A. Schievano et al. *GCB Bioenergy*. 2014. Т. 7. № 4. С. 899–908. URL: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12186> (дата звернення: 20.11.2024).
 12. Assessment of Areal Methane Yields from Energy Crops in Ukraine, Best Practices / I. Morozova et al. *Applied Sciences*. 2020. Т. 10. № 13. С. 4431. URL : <https://doi.org/10.3390/app10134431> (дата звернення: 20.11.2024).
 13. Grabovskyi, M., Kucheruk, P., Pavlichenko, K. et al. Influence of macronutrients and micronutrients on maize hybrids for biogas production. *Environ Sci Pollut Res* 30, 70022–70038 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27235-3> (дата звернення: 20.11.2024).
 14. VDI 4630. Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Чинний від 2006-04-01. Вид. офіц. Düsseldorf, 2006. 92 с.
 15. Bauer, A., Leonhartsberger, C., Bösch, P., Amon, B., Friedl, A., & Amon, T. Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. 2009. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12(2), 153–161. doi:10.1007/s10098-009-0236-1 (дата звернення: 20.11.2024).
 6. Jegorov D., Zmievskaya O., Dem'ianenko S. Use of winter rye for production of biogas. *Visnyk agrarnoi nauky*. 2018. Т. 96. № 5. С. 63–67. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201805-10> (date of access: 20.11.2024).
 7. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations / T. Amon et al. *Bioresource Technology*. 2007. Т. 98. № 17. С. 3204–3212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.007> (date of access: 20.11.2024).
 8. Greenhouse gas emissions of electricity and biomethane produced using the Biogasdoneright™ system: four case studies from Italy / L. Valli et al. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2017. Т. 11. № 5. С. 847–860. URL: <https://doi.org/10.1002/bbb.1789> (date of access: 20.11.2024).
 9. Benefits of supplementing an industrial waste anaerobic digester with energy crops for increased biogas production / I. A. Nges et al. *Waste Management*. 2012. Т. 32. № 1. С. 53–59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.009> (date of access: 20.11.2024).
 10. Comparing energy crops for biogas production – Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation / C. Gissén et al. *Biomass and Bioenergy*. 2014. Т. 64. С. 199–210. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.061> (date of access: 20.11.2024).
 11. Biogas from dedicated energy crops in Northern Italy: electric energy generation costs / A. Schievano et al. *GCB Bioenergy*. 2014. Т. 7. № 4. С. 899–908. URL: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12186> (date of access: 20.11.2024).
 12. Assessment of Areal Methane Yields from Energy Crops in Ukraine, Best Practices / I. Morozova et al. *Applied Sciences*. 2020. Т. 10. № 13. С. 4431. URL: <https://doi.org/10.3390/app10134431> (date of access: 20.11.2024).
 13. Grabovskyi, M., Kucheruk, P., Pavlichenko, K. et al. Influence of macronutrients and micronutrients on maize hybrids for biogas production. *Environ Sci Pollut Res* 30, 70022–70038 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27235-3> (date of access: 20.11.2024).
 14. VDI 4630. Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. In force from 2006-04-01. Düsseldorf, 2006. 92 p.
 15. Bauer, A., Leonhartsberger, C., Bösch, P., Amon, B., Friedl, A., & Amon, T. Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. 2009. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12(2), 153–161. doi:10.1007/s10098-009-0236-1 (date of access: 20.11.2024).

REFERENCES

1. Sukhina A. Cereal silos - a prospect for biogas production. *Propozytsiya*. 2022. URL: <https://propozytsiya.com/ua/zlakovi-sylosy-perspektyva-dlya-vyrobnnytva-biogazu> (date of access: 20.11.2024).
2. Anaerobic Digestion of Cereal Rye Cover Crop / L. Yang et al. *Fermentation*. 2022. Т. 8. № 11. С. 617. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation8110617> (date of access: 20.11.2024).
3. Long term alkaline storage and pretreatment process of cover crops for anaerobic digestion / C. Van Vlierberghe et al. *Bioresource Technology*. 2021. Т. 330. С. 124986. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124986> (date of access: 20.11.2024).
4. Energy crop production in double-cropping systems: Results from an experiment at seven sites / R. Groß et al. *European Journal of Agronomy*. 2013. Т. 51. С. 120–129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.004> (date of access: 20.11.2024).
5. Using rye as cover crop for bioenergy production: An environmental and economic assessment / E. Igos et al. *Biomass and Bioenergy*. 2016. Т. 95. С. 116–123. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.09.023> (date of access: 20.11.2024).