

УДК 633.15:631.86

DOI: 10.37128/2707-5826-2025-2-2

**ВИРОЩУВАННЯ СИЛОСНОЇ
КУКУРУДЗИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА
БІОГАЗУ ТА ОТРИМАННЯ
ДИГЕСТАТУ**

В.Д. ПАЛАМАРЧУК, доктор с.-г. наук,
доцент

М.В. СКАКУН, аспірант

Вінницький національний аграрний
університет

На основі проведених досліджень та аналізу наукових матеріалів можна простежити стабілізацію посівних площ вирощування кукурудзи як в Україні, так і у світі загалом, перш за все враховуючи можливість використання її для отримання біоетанолу із зерна та біогазу із силосної маси із можливістю виробництва біоорганічного добрива – дигестату. Дослідження проводяться в умовах ТОВ «Органік-Д» на гібридах кукурудзи двох груп стиглості: середньоранньої Амарос (ФАО 230) та П9071 (ФАО 280) і середньостиглої П9170 (ФАО 320) та Буріто (ФАО 390).

Вміст сухих речовин в зеленій масі кукурудзи станом на 10-14 серпня становив у групі середньоранніх гібридів: Амарос (ФАО 230) – 26,61 %, П9071 (ФАО 280) – 22,21 %, а у групі середньостиглих: П9170 (ФАО 320) – 23,52 % та Буріто (ФАО 390) – 22,87 %. Вміст сирого протеїну у натуральній та абсолютно сухій речовині виявився найвищим у гібридів середньостиглої групи П9170 – 2,01 та 8,55 % і Буріто – 1,88 % та 8,22 %, тоді як у групі середньоранніх гібридів він становив Амарос – 1,75 та 6,58 %, а у гібриду П9071 – 1,65 та 7,43 %. У натуральній та абсолютно сухій речовині найбільше значення вмісту сирової клітковини визначене у гібриду П9170 – 6,32 та 26,86 %, відповідно.

За збирання зеленої маси 20-24 вересня найвищий вміст сирого протеїну був у середньостиглого гібриду кукурудзи Буріто – 9,49 %. Тоді як у інших досліджуваних гібридів він становив П9071 (ФАО 280) – 7,22 %, П9170 (ФАО 320) – 7,19 % та Амарос (ФАО 230) – 6,45 %. Вміст сирової клітковини був найвищим у гібридів кукурудзи Амарос (ФАО 230) – 19,63 % та П9170 (ФАО 320) – 15,67 %. Вміст крохмалю у зеленій масі за досліджуваний період збільшився на 25,38-27,72 %, а вміст цукру на 5,07-25,40 % порівняно з вмістом, що був на період 10-14 серпня. За урожайністю виділилися гібриди Буріто – 78,1 т/га та П9170 – 73,1 т/га середньостиглої групи стиглості, а середньоранні гібриди мали урожайність на рівні Амарос – 55,3 т/га та П9071 – 68,9 т/га. Подовження тривалості вегетаційного періоду в досліджуваних гібридів кукурудзи не лише сприяє підвищенню урожайності зеленої маси, а й збільшує вихід сухої речовини з одиниці площі.

Ключові слова: кукурудза, силос, дигестат, клітковина, біогаз, урожайність, зелена маса, крохмаль, лігнін.

Табл. 6. Літ. 20.

Постановка проблеми. Вирощування кукурудзи було і залишається для України пріоритетним напрямом розвитку рослинництва, оскільки вона поряд із продовольчим, кормовим напрямом використання характеризується можливістю переробки на біогаз та біоетанол. А в перспективі і переробки кукурудзяної олії на біодизель. Кукурудза є однією з найпродуктивніших зернових культур і на формування своєї продуктивності використовує багато ресурсів, включаючи ґрунт, вологу, світло, поживні речовини та ін.

Наразі все більше уваги набуває в Україні вирощування саме силосної кукурудзи як субстрату для біогазової станції. Біогаз, який виробляється з кукурудзи, може бути використаний для отримання електроенергії та тепла, а

дигестат, що залишається, – це високоякісне біоорганічне добриво, яке можна використовувати у технологіях вирощування сільськогосподарських культур. У Європейських країнах вирощування силосної кукурудзи для біогазових станцій є поширеною практикою і довело свою ефективність. Україна, яка має значні сільськогосподарські ресурси, також має потенціал для успішного розвитку біогазового сектора. Крім того, вирощування силосної кукурудзи дозволить збільшити частку культур кормового клину. Можливість отримання дигестату у сільськогосподарських підприємствах потребує все більшої уваги, оскільки сьогодні спостерігається різке зростання цін на мінеральні (синтетичні) добрива і постає проблема раціонального використання системи удобрення.

У зв'язку із цим дослідження в цьому напрямі є необхідними та актуальними і саме таким дослідженням присвячена ця публікація.

Аналіз досліджень і публікацій. Площа вирощування кукурудзи на зерно в 2018 році в Україні становила 4,58 млн га, у 2020 році 5,39 млн. га [1]. У 2022 році спостерігалось скорочення посівних площ під зерновою кукурудзою в Україні на 17 % до 4,267 млн га порівняно з 5,5 млн га у 2021 році, що пов'язане з великою кількістю факторів, включаючи військову агресію Росії проти України, проблеми із паливо-мастильними матеріалами (особливо на досушування зерна), проблеми з логістикою та ін. [2]. У 2024 році площа посіву зернової кукурудзи в Україні, за даними міністерства аграрної політики, склала 3,928 га. Площа вирощування силосної кукурудзи в Україні поступається зерновій та становила у 2018 році – 286 тис. га, 2019 році – 258 тис. га, 2020 році – 263 тис. га, а в 2021 році – 214 тис. га [1].

Виробництво біогазу в Європі з енергетичних культур, зокрема з кукурудзи, дійсно набуло значного розвитку в Європі. Кукурудза (*Zea mays* L.) є однією з найпоширеніших та ефективних культур для зазначеного виробництва [3]. Виробництво біогазу із зеленої маси кукурудзи здійснюється за допомогою процесу біогазового перетворення, відомого як анаеробний ферментаційний процес. Під час цього процесу кукурудзяна біомаса розкладається в анаеробних умовах (без доступу до кисню) за допомогою мікроорганізмів. Результатом цього процесу є утворення біогазу, який складається в основному з метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2), а також невеликої кількості інших газів, таких як сірководень (H_2S). Вирощування кукурудзи для виробництва біогазу має кілька переваг, зокрема висока врожайність, значний вміст органічних речовин, що є важливим для процесу біогазового перетворення, високий вміст крохмалю, який є досить цінним компонентом для виробництва метану і налагоджена технологія вирощування врожаю [4].

У деяких країнах Європи, таких як Німеччина, Польща та Франція, розвиток виробництва біогазу з кукурудзи відбувається через сприятливу законодавчу політику та підтримку уряду. Однак варто зазначити, що вирощування кукурудзи для виробництва біогазу також може впливати на доступність цієї культури для використання в інших галузях, таких як харчова

промисловість.

Однак деякі вчені [5-6] працюють у напрямку пошуку нових субстратів для заміни кукурудзи з метою зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та економічний баланс [7-8], а також для боротьби з ерозійними процесами [9].

Дигестат, який утворюється після біогазового процесу, є багатим на поживні речовини і може бути використаний як органічне добриво для підвищення родючості ґрунту та урожайності наступних сільськогосподарських культур. Аграрії виявляють зацікавленість у використанні дигестату як органічного добрива через його економічні переваги, необхідність використання органічних добрив для підвищення родючості ґрунту та потребу в утилізації органічних відходів.

Згідно з даними вчених [10] застосування дигестату дозволить знизити потребу у мінеральних добривах, які промислово отримуються із значним використанням викопного палива та збільшенням викидів CO₂. У країнах Євросоюзу щорічно отримується близько 180 млн тонн дигестату, основна частка якого використовується як органічне добриво [11, 12].

Україна має значний сировинний потенціал для виробництва біогазу та дигестату, зокрема і за рахунок великих площ посіву кукурудзи на силос. Значна частина земельних ресурсів України використовується для сільського господарства, що створює значну кількість сільськогосподарських відходів, які можна використовувати для виробництва біогазу через процес біологічного розкладу (анаеробного зброджування) у біогазових установках [13-14].

Органічна речовина силосу кукурудзи може бути представлена різними компонентами, такими як целюлоза, геміцелюлоза, лігнін, білки та інші органічні речовини. Здатність цих сполук до біологічного розкладу залежить від їх хімічної структури та доступності для мікроорганізмів. Наприклад, целюлоза та геміцелюлоза є полісахаридами, які можуть бути розщеплені мікроорганізмами за участю ферментів. Лігнін, який є більш складною структурою, може бути менш доступним для біологічного розпаду. Білки також можуть впливати на процес розпаду, іноді затримуючи його або створюючи додаткові продукти розпаду, які можуть впливати на якість дигестату. Потенціал виходу метану з силосу кукурудзи визначається кількістю органічної речовини, що розпадається, та ефективністю біологічного процесу [15]. Своєю чергою хімічний склад органічної речовини кукурудзи залежить від: кліматичних умов, ґрунтово-кліматичної зони вирощування, гібриду кукурудзи, тривалості його вегетаційного періоду, технології вирощування та силосування [16, 17].

М.Б. Грабовський [16] вказує, що у фазі воскової стиглості зерна гібридів кукурудзи вміст азоту, фосфору і вуглецю був вищим на 0,27-0,29%, 0,04-0,12% і 1,21-1,27%, а калію меншими на 0,17-0,23%, в порівнянні із рослинною масою сорго цукрового: азоту – 1,09-1,14%, фосфору – 0,32-0,39%, калію – 1,11-1,16% та вуглецю – 38,06-38,59%. Це ще раз підтверджує важливість використання силосної маси як компоненту для виробництва біогазу та отримання

дигестату.

Метою досліджень було вивчення ефективності використання силосної маси кукурудзи як субстрату для виробництва біогазу та отримання дигестату.

Матеріал та методика досліджень. Дослідження якості силосної кукурудзи та елементів технології її вирощування проводяться з 2020 року по сьогоднішній день в умовах ТОВ «Органік-Д» с. Сутиски Вінницької області України. В дослідженнях використовували гібриди кукурудзи двох груп стиглості: середньоранньої Амарос (ФАО 230) та П9071 (ФАО 280) і середньостиглої П9170 (ФАО 320) та Буріто (ФАО 390).

Ґрунт ділянки проведення досліджень – сірий лісовий середньо-суглинковий за механічним складом, із вмістом гумусу (за Тюрінім) – 1,5%; гідролітичною кислотністю – 1,3 мг/екв. на 100 г ґрунту; сумою ввібраних основ – 28 мг/екв на 100 г ґрунту; вмістом азоту – 9,6 мг / на 100 г ґрунту (за Корнфілдом), легкодоступного фосфору – 8,5 і обмінного калію – 11,4 мг / на 100 г ґрунту (за Чириковим).

Технологія загально прийнята для цієї ґрунтово-кліматичної зони. Попередником була пшениця озима, посів проводили у третю декаду квітня – І декаду травня широкорядним способом, сівалкою точного висіву John Deere, із шириною міжрядь 70 см, формуючи густоту стояння рослин на рівні 75 тис. шт./га.

Система основного обробітку ґрунту включала дискування та оранку глибиною 22-25 см. У системі удобрення передбачалося внесення біоорганічного добрива на основі дигестату нормою 60 т/га, отриманого на основі анаеробного зброджування свинячого гною у біогазовій станції.

Повторність досліду чотирьохразова, розміщення варіантів у досліді рендомізованих блоків. Розмір ділянки варіанта 25 м², облікової ділянки 10,5 м², тобто чотири суміжні рядки довжиною 5 м.

Збирання та облік урожаю зеленої (силосної) маси кукурудзи проводили в фазу молочно-воскової та воскової стиглості зерна шляхом вручну із кожної ділянки досліду шляхом зрізування 10 типових рослин із двох суміжних рядків кожного варіанту [18].

Визначення якості та хімічного складу зеленої (силосної) маси досліджуваних гібридів кукурудзи проводили в сертифікованій лабораторії Інституту кормів та сільського господарства Поділля НААН України.

Результати досліджень та їх обговорення. У процесі досліджень нами встановлена тісна залежність між якістю силосної маси кукурудзи та агротехнічними прийомами вирощування, ґрунтово-кліматичними умовами, групою стиглості та біологічними особливостями гібридів, а також строками проведення збиральних робіт. За збирання зеленої маси 10-14 серпня у фазу молочно-воскової стиглості хімічний склад, вуглеводно-лігніновий комплекс у натуральній та абсолютно сухій речовині приведені в таблиці 1-3.

Варто зазначити, що силосна маса має вищі показники виходу біогазу та вміст метану, ніж зелена маса. Через це силосування можна розглядати як технологічну операцію для поліпшення виробництва метану з рослинної маси кукурудзи та інших енергетичних культур.

Таблиця 1

**Характеристика хімічного складу зеленої маси досліджуваних гібридів
кукурудзи, %**

Назва зразка (зелена маса кукурудзи)	Суша речовина	Сирий протеїн		Сира клітковина	
		у натуральній речовині	у абсолютно сухій речовині	у натуральній речовині	у абсолютно сухій речовині
Амарос (ФАО 230)	26,61	1,75	6,58	6,52	24,51
П9071 (ФАО 280)	22,21	1,65	7,43	5,50	24,77
П9170 (ФАО 320)	23,52	2,01	8,55	6,32	26,86
Буріто (ФАО 390)	22,87	1,88	8,22	6,56	28,68

Джерело: сформовано на основі власних досліджень

Із даних таблиці 1 видно, що вміст сухої речовини в зеленій масі кукурудзи станом на 10-14 серпня становив у групі середньоранніх гібридів: Амарос (ФАО 230) – 26,61 %, П9071 (ФАО 280) – 22,21 %, а у групі середньостиглих: П9170 (ФАО 320) – 23,52 % та Буріто (ФАО 390) – 22,87 %. Виходячи із даних вмісту сухої речовини (табл. 1) можна побачити, що найбільший вплив на цей показник здійснювали генетичні особливості гібриду, зокрема за вмістом сухої речовини на 10-14 серпня виділився середньоранній гібрид Амарос (26,61%) порівняно з іншими досліджуваними гібридами.

Для проведення якісного силосування кукурудзи вміст сухих речовин в ній має становити 30-40 %. Необхідно зазначити, що істотно зменшується потенціал утворення та виходу біогазу, знижуються властивості самого силосу, накопичується істотна кількість фільтрату, за значення вмісту сухих речовин менше 20 %. 1 т силосу забезпечує орієнтовно вихід 290-360 м³ метану, а за даними М.В. Роїка і 640 м³ або 16000 м³/га.

М.Б. Грабовський [16] стверджує, що завдяки вищому вмісту сухих речовин, розрахунковий вихід біогазу з одиниці завантаженої силосної маси кукурудзи перевищував аналогічний показник для цукрового сорго на 33,7-50,6 %, а також був вищим на 9,2-13,0 % порівняно з виходом біогазу з суміші кукурудзи та сорго.

Автори [16, 19] вказують на те, що можливе зниження питомого виходу метану із силосної маси гібридів кукурудзи, що мають більшу тривалість вегетаційного періоду. За вмісту сухої речовини понад 22 % вихід метану становить близько 370 л·кг⁻¹ СОР. Однак при перевищенні рівня сухої речовини понад 35 % питомий вихід метану зменшується. Найбільш ефективно виробництво метану спостерігалось при вмісті сухої речовини в межах 30-35 %.

Вміст сирого протеїну у натуральній та абсолютно сухій речовині виявився найвищим у гібридів середньостиглої групи П 9170 – 2,01 та 8,55 % і Буріто – 1,88 % та 8,22 %, тоді як у групі середньоранніх гібридів він становив Амарос – 1,75 та 6,58 %, а у гібриду П 9071 – 1,65 та 7,43 %.

На вихід біогазу і на якість кормової цінності силосної маси істотний вплив має вміст сирого клітковини, яка також визначалась у натуральній та абсолютно

сухий речовині. У середньостиглого гібриду кукурудзи П 9170 визначений найвищий вміст сирової клітковини, як у натуральній та абсолютно сухій речовині – 6,32 та 26,86 %, відповідно. Тобто зростання групи стиглості гібриду сприяє збільшенню значення вмісту сирової клітковини. В інших гібридів вміст сирової клітковини склав: Амарос (ФАО 230) – 6,52 та 24,51%, П 9071 (ФАО 280) – 5,50 та 24,77 % та Буріто (ФАО 390) – 6,56 та 28,68 %, відповідно.

При цьому в результаті наших досліджень встановлена відмінність вуглеводно-лігнінового комплексу зеленої маси досліджуваних гібридів кукурудзи різних груп стиглості залежно від генетичних особливостей самого гібриду (табл. 2).

Таблиця 2

Характеристика вуглеводно-лігнінового комплексу в зеленій масі гібридів кукурудзи, % у натуральній речовині

Назва зразка (зелена маса кукурудзи)	Крохмаль	Цукор	Сума легкорозчинних вуглеводів	Геміцелюлоза	Целюлоза	Лігнін	Сума структурних вуглеводів
Амарос (ФАО 230)	0,63	5,04	12,69	6,66	6,33	1,35	14,34
П9071 (ФАО 280)	0,44	3,39	9,40	5,29	4,47	1,09	10,85
П9170 (ФАО 320)	0,37	2,15	9,71	6,83	6,61	1,25	14,69
Буріто (ФАО 390)	0,18	6,91	13,44	6,03	5,31	1,60	12,94

Джерело: сформовано на основі власних досліджень

Вміст легкорозчинних вуглеводів та цукрів забезпечує високу якість силосної маси. Із даних таблиці 2 видно, що найвищий вміст крохмалю станом на 10-14 серпня визначений у гібриду Амарос – 0,63 %, тоді як у інших досліджуваних гібридів він становив П9071 – 0,44 %, П9170 – 0,37 % та Буріто – 0,18 %, вміст цукру був Буріто – 6,91 %, Амарос – 5,04 %, П9071 – 3,39 % та П9170 – 2,15 %.

Сума легкорозчинних вуглеводів виявилася найвищою у середньостиглого гібриду Буріто – 13,44 % та середньораннього гібриду Амарос – 12,69 %, тоді як у інших гібридів вона становила – П9071 – 9,40 % та П9170 – 9,71 %. Розчинність та високий їх вміст у рослинній біомасі може зменшувати вихід біогазу. Вміст цих речовин у досліджуваних гібридів коливався в межах геміцелюлоза – 5,29-6,83 %, целюлоза – 4,47-6,61 % та лігнін – 1,09-1,60 %. Найвищим вміст геміцелюлози та целюлози виявився у гібридів П9170 (ФАО 320) – 6,83 і 6,61 % та Амарос (ФАО 230) – 6,66 і 6,33 %, відповідно. Вміст лігніну був найвищим у середньостиглого гібриду кукурудзи Буріто 1,60 % та середньораннього гібриду Амарос – 1,35 %.

Сума структурних вуглеводів виявилася найвищою у гібридів П9170 (ФАО 320) – 14,69 % та Амарос (ФАО 230) – 14,34 %, тоді як у гібриду Буріто (ФАО 390) вона становила 12,94%, а у гібриду П9071 (ФАО 280) вона була найменшою і склала 10,85 %.

Аналогічний аналіз можна провести і за вуглеводно-лігніновим комплексом

зеленої маси гібридів кукурудзи у перерахунку на абсолютно суху речовину (табл. 3).

Таблиця 3

Характеристика вуглеводно-лігнінового комплексу зеленої маси гібридів кукурудзи, % у абсолютно сухій речовині

Назва зразка (зелена маса кукурудзи)	Крохмаль	Цукор	Сума легкорозчинних вуглеводів	Геміцелюлоза	Целюлоза	Лігнін	Сума структурних вуглеводів
Амарос (ФАО 230)	2,38	18,95	47,68	25,04	23,78	5,08	53,90
П9071 (ФАО 280)	1,98	15,26	42,31	23,81	20,12	4,89	48,82
П9170 (ФАО 320)	1,58	9,16	41,31	29,04	28,09	5,32	62,45
Буріто (ФАО 390)	0,79	30,21	58,77	26,38	23,22	7,00	56,60

Джерело: сформовано на основі власних досліджень

Із даних таблиці 3 видно, що закономірності накопичення хімічних речовин у перерахунку на абсолютно суху речовину аналогічні накопиченню у натуральній речовині. Так зокрема найвищий вміст крохмалю був у гібридів Амарос (ФАО 230) – 2,38 % та П 9071 (ФАО 280) – 1,98 %, тоді як у інших гібридів він становив – П 9170 (ФАО 320) – 1,58 % та Буріто (ФАО 390) – 0,79 %. Вміст цукру виявився найвищим у гібриду Буріто (ФАО 390) – 30,21 %, тоді як у інших гібридів він становив Амарос (ФАО 230) – 18,95 %, П 9071 (ФАО 280) – 15,26 % та П 9170 (ФАО 320) – 9,16 %. Сума легкорозчинних вуглеводів у досліджуваних гібридів коливалася в межах 41,31-58,77 %, із найвищим значенням її у гібриду кукурудзи середньостиглої групи стиглості Буріто – 58,77 % та найнижчим значенням у середньостиглого гібриду П9170 – 41,31 %, тоді як у середньоранніх гібридів такий показник становив Амарос – 47,68 % та П 9071 – 42,31 %. Сума структурних вуглеводів (целюлози, геміцелюлози та лігніну) найвище значення мала у середньостиглих гібридів кукурудзи П 9170 – 62,45 % та Буріто – 56,60 %. У групі середньоранніх гібридів даний показник складав Амарос – 53,90 % та П 9071 – 48,82 %.

Значення вуглеводнево-лігнінового комплексу та хімічного складу істотно залежало від строків проведення збиральних робіт зеленої маси досліджуваних гібридів кукурудзи. Так, зокрема за збирання зеленої маси 20-24 вересня на початок фази воскової стиглості хімічний склад зеленої маси та вуглеводно-лігніновий комплекс у абсолютно сухій речовині приведені в таблиці 4-5.

Таблиця 4

Хімічний склад зеленої маси гібридів кукурудзи, % у абсолютно сухій речовині

Назва зразка (зелена маса кукурудзи)	Сирий протеїн	Сира клітковина
Амарос (ФАО 230)	6,45	19,63
П9071 (ФАО 280)	7,22	14,72
П9170 (ФАО 320)	7,19	15,67
Буріто (ФАО 390)	9,49	14,04

Джерело: сформовано на основі власних досліджень

Із даних таблиці 4 видно, що за збирання зеленої маси 20-24 вересня найвищий вміст сирого протеїну був у середньостиглого гібриду кукурудзи Буріто – 9,49 %. Тоді як у інших досліджуваних гібридів він становив П9071 (ФАО 280) – 7,22 %, П9170 (ФАО 320) – 7,19 % та Амарос (ФАО 230) – 6,45 %.

Вміст сирої клітковини був найвищим у гібридів кукурудзи Амарос (ФАО 230) – 19,63 % та П9170 (ФАО 320) – 15,67 %.

Характеристику вуглеводно-лігнінового комплексу зеленої маси гібридів кукурудзи зібраної 20-24 вересня у абсолютно сухій речовині наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Вуглеводно-лігніновий комплекс зеленої маси гібридів кукурудзи, % у абсолютно сухій речовині

Назва зразка (зелена маса кукурудзи)	Крохмаль	Цукор	Сума легкокорозчинних вуглеводів	Геміцелюлоза	Целюлоза	Лігнін	Сума структурних вуглеводів
Амарос (ФАО 230)	27,76	5,05	48,94	15,47	14,14	3,53	33,14
П9071 (ФАО 280)	39,70	4,49	57,19	13,02	13,02	3,63	29,67
П9170 (ФАО 320)	38,10	4,09	54,97	12,78	10,44	3,56	26,78
Буріто (ФАО 390)	33,25	4,81	59,29	16,23	15,48	3,88	35,59

Джерело: сформовано на основі власних досліджень

Вміст крохмалю у зазначений період збільшився на 25,38-27,72 % порівняно з вмістом, що був на період 10-14 серпня і становив у гібриду П 9071 (ФАО 280) – 39,70%, П 9170 (ФАО 320) – 38,10 %, Буріто (ФАО 390) – 33,25 % та Амарос (ФАО 230) – 27,76 %.

Вміст цукру в зеленій масі зменшився порівняно з періодом 10-14 серпня на 5,07-25,40 %, і становив Амарос (ФАО 230) – 5,05 %, Буріто (ФАО 390) – 4,81 %, П9071 (ФАО 280) – 4,49 % та П9170 (ФАО 320) – 4,09 %. При цьому сума легкокорозчинних вуглеводів була найвищою у середньостиглого гібриду кукурудзи Буріто – 59,29 % та середньораннього гібриду П9071 – 57,19 %.

Сума структурних вуглеводів (геміцелюлози, целюлози та лігніну) виявилася найвищою у середньостиглого гібриду кукурудзи Буріто – 35,59 % та середньораннього гібриду Амарос – 33,14 %.

На те, що зміна термінів збирання зеленої маси може впливати на характеристику хімічного складу та вихід біогазу, вказують і німецькі дослідники, які стверджують, що гібриди кукурудзи, зібрані у фазу воскової стиглості зерна, характеризуються вмістом сухих речовин на рівні 30-42 %, а середній вихід метану, при цьому складає 0,40 м³ / кг субстрату. Гібриди DK 604 і Doge, характеризувалися на 6,5 і 16 % нижчим виходом метану, за вмісту сухих речовин 22,2 і 19,8 % та за збиранням їх у фазу молочно-воскової стиглості зерна [15, 16].

Для визначення виходу біогазу важливо не лише знати вміст сухих речовин та хімічний склад зеленої маси гібридів кукурудзи, але і вихід сухої

маси із одиниці площі.

М.Б. Грабовський [16] зазначає, що гідротермічні умови вегетаційних періодів досліджуваних років суттєво впливають на урожайність зеленої маси кукурудзи. Так, в 2012 році, коли спостерігалось істотне погіршення гідротермічних умов спостерігалось зниження на 9,7-21,6 % урожайності зеленої маси гібридів кукурудзи в порівнянні із 2013 роком, який виявився більш сприятливим за кліматичними показниками.

Рівень урожайності зеленої (силосної) маси досліджуваних гібридів кукурудзи зібраних 14 серпня 2020 року наведено в таблиці 6.

Таблиця 6

Рівень урожайності зеленої маси досліджуваних гібридів кукурудзи різних груп стиглості, (за 2020 р.)

Назва зразка (зелена маса кукурудзи)	Суха речовина, %	Урожайність, т/га	Вихід сухої речовини на 1 га, т
Амарос (ФАО 230)	26,61	55,3	14,72
П9071 (ФАО 280)	22,21	68,9	15,30
П9170 (ФАО 320)	23,52	73,1	17,19
Буріто (ФАО 390)	22,87	78,1	17,86
НІР _{0,5} , т/га		4,82	1,30

Джерело: сформовано на основі власних досліджень

Із даних таблиці 6 видно, що рівень урожайності зеленої маси вивчених гібридів кукурудзи суттєво варіював залежно від їх групи стиглості. Найвищу продуктивність продемонстрували середньостиглі гібриди: Буріто – 78,1 т/га та П 9170 – 73,1 т/га. Порівняно з ними, середньоранні гібриди мали нижчі показники врожайності: Амарос – 55,3 т/га та П 9071 – 68,9 т/га.

Подібна тенденція прослідковується і для виходу сухої речовини із одиниці площі. Найвищою вона була у середньостиглих гібридів кукурудзи Буріто – 17,86 т/га та П9170 – 17,19 т/га.

Отже, подовження тривалості вегетаційного періоду в досліджуваних гібридів кукурудзи не лише сприяє підвищенню урожайності зеленої маси а й збільшує валовий вихід сухих речовин із одиниці площі. На те, що урожайність сухої маси може змінюватися у різних гібридів, вказують також латвійські вчені [20], які зазначають що урожайність сухих речовин знаходиться в діапазоні від 12 до 16 т / га. Вихід біогазу з досліджуваних варіантів знаходиться в діапазоні 476-570 л × кг⁻¹ СОР. При цьому середній вміст метану становив 49,6-59,3 %. В зв'язку із цим, для виробництва біогазу як субстрат вирощують спеціалізовані енергетичні гібриди кукурудзи, здатні забезпечити урожайність сухої маси на рівні 18-25 т/га. Це відповідає орієнтовному виходу метану в межах 5300-9000 м³/га, залежно від особливостей гібрида, умов вирощування та фази збирання кукурудзи [16, 20].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, вуглеводно-лігніновий комплекс та загальний хімічний склад зеленої маси гібридів

кукурудзи може змінюватись залежно від фенологічної фази росту і розвитку рослин. Зокрема спостерігаємо зростання кількості органічної речовини та вмісту крохмалю (на 25,38-27,72 %) від фази молочно-воскової до воскової стиглості зерна. Крім того, характеристика хімічного складу та вуглеводно-лігнінового комплексу зеленої маси істотно залежала від генетичних особливостей гібридів та групи їх стиглості. Урожайність зеленої маси та вихід сухих речовин у досліджуваних гібридів кукурудзи суттєво залежали від групи стиглості. Найвищі показники були зафіксовані у середньостиглих гібридів: Буріто – 78,1 т/га зеленої маси та 17,86 т/га сухої речовини, і П 9170 – 73,1 т/га та 17,19 т/га відповідно. Для гібридів середньоранньої групи ці показники були нижчими, і становили: Амарос – 55,3 т/га та 14,72 т/га, П 9071 – 68,9 т/га та 15,30 т/га відповідно.

Тому найбільш придатні для виробництва біогазу як субстрату біогазових станцій силосні гібриди кукурудзи середньостиглої групи стиглості П 9170 (ФАО 320) та Буріто (ФАО 390), які забезпечують найвищу урожайність та вихід сухих речовин із одиниці площі та мають сприятливий вуглеводно-лігніновий комплекс та хімічний склад зеленої маси.

Список використаної літератури

1. Статистичний щорічник за 2021 р. Державна служба статистики України / За ред. І. Є. Вернера. К.: Держстат України, 2022. 447 с.
2. Tsyhansky V. Formation of corn productivity depending on the use of modern biological fertilizers in the Forest-steppe right bank. *Сільське господарство та лісівництво*. 2022. № 4 (27). С. 15-24. DOI: 10.37128/2707-5826-2022-4-2.
3. Smutný V., Neudert L., Dryšlov T., Lukas V., et al. Current arable farming systems in the Czech Republic-agronomic measures adapted to soil protection and climate change. *Agric Conspec Sci*. 2018. 83 (1): 11-16.
4. Theuerl S., Herrmann C., Heiermann M., Grundmann P., Landwehr N., Kreidenweis U. et al. The future agricultural biogas plant in Germany: A vision. *Energies*. 2019. 12 (3), 396. doi: 10.3390/en12030396.
5. Sigurnjak I., Vaneeckhaute C., Michels E., Ryckaert B., Ghekiere G., Tack F. M. G. et al. Fertilizer performance of liquid fraction of digestate as synthetic nitrogen substitute in silage maize cultivation for three consecutive years. *Sci. Total Environ*. 2017. 599-600, 1885-1894. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.120.
6. Dębowski M., Kazimierowicz J., Zieliński M., Bartkowska I. Co-Fermentation of microalgae biomass and *Miscanthus × giganteus* silage-assessment of the substrate, biogas production and digestate characteristics. *Appl. Sci*. 2022. 12 (14), 7291. doi: 10.3390/app12147291.
7. Von Cossel M., Pereira L. A., Lewandowski I. Deciphering substrate-specific methane yields of perennial herbaceous wild plant species. *Agronomy*. 2021. 11 (3). P 451. doi: 10.3390/agronomy11030451.
8. Herman T., Nungesser E., Miller K. E., Davis S. C. Comparative fuel yield from anaerobic digestion of emerging waste in food and brewery systems. *Energies*. 2022. 15. P. 1538. doi: 10.3390/en15041538.

9. Mata-Alvarez J., Dosta J., Macé S., Astals S. Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling. *Crit Rev Biotechnol.* 2011. 31 (2). P. 99-111.
10. Popović V., Vučković S., Jovović Z., Ljubičić N., Kostić M., Rakašćan N., Ikanović J. Genotype by year interaction effects on soybean morpho-productive traits and biogas production. *Genetika.* 2020. 52 (3) P. 1055-1073. <https://doi.org/10.2298/GENSR1802635>.
11. Паламарчук В. Д., Кричковський В. Ю., Рудська Н. О., Колісник О. М. Новітні технології вирощування овочевих культур та кукурудзи за використання дигестату біогазових станцій: монографія. Вінниця: Друкарня «Друк», 2023. 296 с.
12. Corden C., Bougas K., Cunningham E., Tyrer D., Kreißig J., Crookes M. *Digestate and Compost as Fertilisers: Risk Assessment and Risk Management Options*; Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited: Aberdeen, UK, 2019. pp. 121-128. Available online: https://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/40039DigestateandCompostRMOA-Finalreporti2_20190208.pdf.
13. Черевко Г., Шугало В. Сфери та переваги застосування біогазу у вирішенні енергетичних проблем. *Аграрна економіка. Серія Економіка природокористування.* 2017. Т. 10, № 3-4. С. 127-132. <https://doi.org/10.31734/agrarecon2017.03.127>.
14. Palamarchuk V., Krychkovskiy V., Skakun M. Study of the efficiency of growing maize for silage for processing into biogas and digestate. *Scientific Horizons.* 2024. 27 (1). P. 54-61. DOI: 10.48077/scihor1.2024.54.
15. Bartuševics J., Gaile Z. Effect of silaging on chemical composition of maize substrate for biogas production. *Annual 16th International Scientific Conference Proceedings, "Research for rural development 2010"*, Jelgava, Latvia, 19-21 May 2010. Vol. 1. P. 42-47.
16. Грабовський М.Б. Потенціал виробництва біогазу із силосної маси сорго цукрового та кукурудзи. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2019. № 106. С. 26-32.
17. Логоша Р.В., Паламарчук В.Д., Кричковський В.Ю. Економічна та біоенергетична ефективність використання дигестату біогазових станцій при вирощуванні сільськогосподарських та овочевих культур в умовах євроінтеграції України. *Бізнес Інформ.* 2022. № 9. С. 40-52. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2022-9-40-52>.
18. Вовкодав В.В. Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур (зернові, круп'яні та зернобобові). К.: 2001. 64 с.
19. Amon Th., Kryvoruchko V., Amon B., Bodiroza V., Zollitsch W., Boxberger J. Biogas production from energy maize. *Landtechnik.* 2006. № 2. P. 86-87.
20. Dubrovskis V., Plume I., Bartusevics J., Kotelenecs V. Biogas production from fresh maize biomass. *Engineering for rural development.* 2010. P. 220-225.

Список використаної літератури у транслітерації / References

1. Statystychnyi shchorichnyk za 2021 r. (2022). Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [*Statistical yearbook of Ukraine for 2021 / State statistics service of*

Ukraine]. / Za red. I. Ye. Vernera. K.: Derzhstat Ukrainy, 2022. 447 p. [in Ukrainian].

2. Tsyhansky V. (2022). Formation of corn productivity depending on the use of modern biological fertilizers in the Forest-steppe right bank. *Sil'ske hospodarstvo ta lisivnytstvo – Agriculture and forestry*. 4 (27). 15-24. [in Ukrainian]. DOI: 10.37128/2707-5826-2022-4-2.

3. Smutný V., Neudert L., Dryšlov T., Lukas V., et al. (2018). Current arable farming systems in the Czech Republic-agronomic measures adapted to soil protection and climate change. *Agric. conspec science*. 83(1): P. 11-16. [in English]

4. Theuerl S., Herrmann C., Heiermann M., Grundmann P., Landwehr N., Kreidenweis U. et al. (2019). The future agricultural biogas plant in Germany: A vision. *Energies*. 12 (3), 396. doi: 10.3390/en12030396. [in English]

5. Sigurnjak I., Vaneeckhaute C., Michels E., Ryckaert B., Ghekiere G., Tack F. M. G. et al. (2017). Fertilizer performance of liquid fraction of digestate as synthetic nitrogen substitute in silage maize cultivation for three consecutive years. *Sci. Total Environ*. 599-600, 1885-1894. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.120. [in English]

6. Dębowski M., Kazimierowicz J., Zieliński M., Bartkowska I. (2022). Co-Fermentation of microalgae biomass and *Miscanthus × giganteus* silage-assessment of the substrate, biogas production and digestate characteristics. *Appl. Sci*. 12 (14), 7291. doi: 10.3390/app12147291. [in English]

7. von Cossel M., Pereira L. A., Lewandowski I. (2021). Deciphering substrate-specific methane yields of perennial herbaceous wild plant species. *Agronomy*. 11 (3). P 451. doi: 10.3390/agronomy11030451. [in English]

8. Herman T., Nungesser E., Miller K. E., Davis S. C. (2022). Comparative fuel yield from anaerobic digestion of emerging waste in food and brewery systems. *Energies*. 15. P. 1538. doi: 10.3390/en15041538. [in English]

9. Mata-Alvarez J., Dosta J., Macé S., Astals S. (2011). Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling. *Crit Rev Biotechnol*. 2011. 31(2): P. 99-111. [in English]

10. Popović V., Vučković S., Jovović Z., Ljubičić N., Kostić M., Rakašćan N., Ikanović J. (2020). Genotype by year interaction effects on soybean morpho-productive traits and biogas production. *Genetika*. 52(3): 1055-1073. <https://doi.org/10.2298/GENSR1802635>. [in English].

11. Palamarchuk V. D., Krychkovskyi V. Yu., Rudska N. O., Kolisnyk O. M. (2023). Novitni tekhnolohii vyroshchuvannia ovochevykh kultur ta kukurudzy za vykorystannia dyhestatu biohazovykh stantsii: monohrafiia [*Modern technologies for growing vegetable crops and maize using biogas plant digestate: monograph*]. [in Ukrainian]

12. Corden C., Bougas K., Cunningham E., Tyrer D., Kreißig J., Crookes M. (2019). Digestate and Compost as Fertilisers: Risk Assessment and Risk Management Options; Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited: Aberdeen, UK, 2019. pp. 121-128. Available online: [https://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/40039 Digestate and Compost RMOA – Final report i2_20190208.pdf](https://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/40039_Digestate_and_Compost_RMOA_-_Final_report_i2_20190208.pdf). [in English].

13. Cherevko H., Shuhalo V. (2017). Sfery ta perevahy zastosuvannia biohazu u vyrishenni enerhetychnykh problem [*Areas and advantages of biogas application in solving energy problems*]. *Ahrarna ekonomika. Seriiia Ekonomika pryrodokorystuvannia [Agrarian economics. Series: Economics of nature management]*, 10, 3-4. P. 127-132. <https://doi.org/10.31734/agrarecon2017.03.127>. [in Ukrainian].
14. Palamarchuk V., Krychkovskyi V., Skakun M. (2024). Study of the efficiency of growing maize for silage for processing into biogas and digestate. *Scientific Horizons*, 27 (1), P. 54-61. DOI: 10.48077/scihor1.2024.54. [in Ukrainian]
15. Bartuševics J., Gaile Z. (2010). Effect of silaging on chemical composition of maize substrate for biogas production. *Annual 16th International Scientific Conference Proceedings, "Research for rural development 2010"*, Jelgava, Latvia, 19-21 May 2010. Vol. 1. P. 42-47. [in English].
16. Hrabovskyi M. B. (2019). Potentsial vyrobnytstva biohazu iz sylosnoi masy sorho tsukrovoho ta kukurudzy [*Potential of biogas production from silage mass of sweet sorghum and maize*]. *Tavriiskyi naukovi visnyk. Seriiia: Silskohospodarski nauky [Tavriiskyi scientific bulletin]*, 106, P. 26-32. [in Ukrainian]
17. Lohosha R.V., Palamarchuk V.D., Krychkovskyi V.Iu. (2022). Ekonomichna ta bioenerhetychna efektyvnist vykorystannia dyhestatu biohazovykh stantsii pry vyroshchuvanni silskohospodarskykh ta ovochevykh kultur v umovakh yevrointehratsii Ukrainy [*Economic and bioenergy efficiency of using biogas plant digestate in the cultivation of agricultural and vegetable crops under the conditions of Ukraine's european integration*]. *Biznes Inform–Business inform*. 9. P. 40-52. [in Ukrainian].
18. Vovkodav V.V. (2001). Metodyka derzhavnogo sortovyprobuvannia silskohospodarskykh kultur (zernovi, krupiani ta zernobobovi) [*Methodology of state variety testing of agricultural crops (Cereals, pseudocereals, and legumes)*]. 64 p. [in Ukrainian].
19. Amon Th., Kryvoruchko V., Amon B., Bodiroza V., Zollitsch W., Boxberger J. (2006). Biogas production from energy maize. *Landtechnik*, 2, P. 86-87. [in English]
20. Dubrovskis V., Plume I., Bartusevics J., Kotelenecs V. (2010). Biogas production from fresh maize biomass. *Engineering for rural development*. P. 220-225. [in English].

ANNOTATION

CULTIVATION OF SILAGE CORN FOR BIOGAS PRODUCTION AND DIGESTATE GENERATION

Based on conducted research and analysis of scientific materials, there is a noted stabilization in the sown areas of corn cultivation both in Ukraine and globally. This trend is primarily driven by the crop's versatility, particularly its use in producing bioethanol from grain and biogas from silage mass, with the added benefit of generating bio-organic fertilizer in the form of digestate. Research is being carried out under the conditions of LLC «Organic-D» using corn hybrids from two maturity groups: early-medium – Amaros (FAO 230) and P 9071 (FAO 280), and medium – P 9170 (FAO 320) and Burito (FAO 390).

As of August 10–14, the dry matter content in the green mass of corn was as follows among the early-medium maturity hybrids: Amaros (FAO 230) – 26.61 %, and P 9071 (FAO 280) – 22.21 %. Among the medium maturity hybrids, the values were: P 9170 (FAO 320) – 23.52 %, and Burito (FAO 390) –

22.87%. The highest crude protein content, both in fresh and absolutely dry matter, was recorded in the medium-maturity hybrids: P9170 – 2.01 % and 8.55 %, and Burito – 1.88 % and 8.22 %. In the early-medium hybrids, the values were: Amaros – 1.75 % and 6.58 %, and P 9071 – 1.65 % and 7.43 %. The highest crude fiber content was also observed in the P 9170 hybrid, amounting to 6.32% in fresh matter and 26.86 % in absolutely dry matter.

During the green mass harvest conducted from September 20-24, the highest crude protein content was observed in the medium-maturity corn hybrid Burito (FAO 390) at 9.49 %. The other hybrids showed lower values: P 9071 (FAO 280) – 7.22%, P 9170 (FAO 320) – 7.19%, and Amaros (FAO 230) – 6.45 %. The highest crude fiber content was found in Amaros (FAO 230) – 19.63%, and P9170 (FAO 320) – 15.67 %. During this period, starch content in the green mass increased by 25.38–27.72 %, while sugar content rose by 5.07-25.40 % compared to the levels recorded between August 10-14. In terms of yield, the medium-maturity hybrids Burito and P 9170 stood out, producing 78.1 t/ha and 73.1 t/ha respectively, while the early-medium hybrids yielded 55.3 t/ha for Amaros and 68.9 t/ha for P 9071. Extending the vegetation period in the studied corn hybrids not only contributes to higher green mass yield but also increases the output of dry matter per unit area.

Key words: corn, silage, digestate, fiber, biogas, yield, green mass, starch, lignin.

Table. 6. Lit. 20.

Інформація про авторів

Паламарчук Віталій Дмитрович – доктор сільськогосподарських наук, доцент кафедри рослинництва та садівництва, факультету агрономії, садівництва та захисту рослин навчально-наукового інституту агротехнологій та природокористування Вінницького національного аграрного університету (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3. email: vd-palamarchuk@ukr.net).

Скакун Михайло Васильович – аспірант кафедри рослинництва та садівництва факультету агрономії, садівництва та захисту рослин навчально-наукового інституту агротехнологій та природокористування Вінницького національного аграрного університету (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3. email: mykhaylo.skakun@kws.com)

Palamarchuk Vitalii Dmytrovych – Doctor of agricultural sciences, associate professor of the department of plant production and horticulture, faculty of agronomy, horticulture and plant protection, educational and research institute of agricultural technologies and nature management, Vinnytsia national agrarian university (21008, Vinnytsia, Sonyachna st., 3 email: vd-palamarchuk@ukr.net).

Skakun Mykhailo Vasylovych – a postgraduate student at the Department of Crop Production and Horticulture, Faculty of Agronomy, Horticulture, and Plant Protection, Educational and Scientific Institute of Agrotechnologies and Environmental Management, Vinnytsia National Agrarian University (21008, Vinnytsia, Sonyachna Street, 3. Email: mykhaylo.skakun@kws.com).