

**ВПЛИВ МАКРО- І МІКРОДОБРИВ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ВЕГЕТАТИВНОЇ МАСИ РОСЛИН КУКУРУДЗИ ТА РОЗРАХУНКОВИЙ ВИХІД БІОМЕТАНУ****К. В. Павліченко, М. Б. Грабовський, Т. В. Панченко, М. В. Лозінський, С. С. Німенко***Білоцерківський національний аграрний університет, пл. Соборна, 8/1, м. Біла Церква, Київська обл., Україна, 09117*

**Актуальність.** Виробництво біометану з відновлювальних джерел має велике значення для сталого використання аграрної біомаси та значні екологічні переваги. **Метою досліджень** було визначення впливу макро- і мікродобрих на показники якості вегетативної маси рослин кукурудзи та розрахунковий вихід біометану. **Матеріали та методи.** Дослідження проводилися в 2019–2021 рр. у СТОВ «Птахоплемзавод Коробівський» Андрушівського району Житомирської області. У трифакторному досліді вивчали: Фактор А. Гібриди кукурудзи: Амарос, Богатир, КВС 381, Каріфолс; Фактор В. Макродобрива, кг/га д. р.: без добрив (контроль),  $N_{90}P_{60}K_{60}$ ,  $N_{120}P_{90}K_{90}$ ; Фактор С. Мікродобрива: без застосування (контроль), обробка насіння YaraVita Teprosyn NP+Zn (5 л/т) і обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Maize Boost (4 л/га); обробка насіння YaraTera Tenso Cocktail (0,15 кг/т) і обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Kombiphos (3 л/га). **Результати.** При застосуванні макро- і мікродобрих відмічена тенденція до підвищення рівня крохмалю, сирого протеїну й целюлози, порівняно з контролем. При цьому, під впливом внесених добрив, спостерігалось зниження вмісту клітковини. Серед гібридів кукурудзи, що досліджувалися у вегетативній масі рослин середньостиглих КВС 381 та Каріфолс був вищий вміст крохмалю, сирого протеїну та жиру порівняно з середньоранніми Амарос і Богатир. Питомий вихід метану в досліді мали 272,1–356,6 м<sup>3</sup>/т сухої органічної речовини (СОР), що відповідає 97,2–129,2 м<sup>3</sup>/т вегетативної маси рослин кукурудзи. Найвищий питомий вихід метану був у гібрида Каріфолс – 335,0–356,6 м<sup>3</sup>/т СОР, у КВС 381 він складав 319,6–343,2 м<sup>3</sup>/т СОР, у Богатир – 310,2–332,8 м<sup>3</sup>/т СОР, а в Амарос – 272,1–301,7 м<sup>3</sup>/т СОР. **Висновки.** Встановлено високий позитивний кореляційний зв'язок між розрахунковим виходом метану та вмістом крохмалю ( $r = 0,86$ ), сирого протеїну ( $r = 0,93$ ), жиру ( $r = 0,95$ ), середній зв'язок – із вмістом сирової золи ( $r = 0,57$ ) і целюлози ( $r = 0,66$ ). Кореляційний зв'язок між вмістом клітковини та виходом метану був слабким ( $r = 0,31$ ). Внесення макродобрих більше впливало на вихід метану порівняно з варіантом з мікродобривами. Так, внесення макродобрих забезпечувало збільшення цього показника на 11,2–28,4 %, тоді як застосування мікродобрих – лише на 1,6–3,3 %, порівняно з контролем.

**Ключові слова:** біоенергетика, кукурудза, гібриди, вегетативна маса рослин, хімічний склад, питомий вихід метану

**Вступ.** Глобальні зміни клімату призводять до негативного впливу на навколишнє середовище, здоров'я людини та світову економіку, причому головним винуватцем цих змін є високий рівень парникових газів. Заміна викопних видів палив відновлювальними джерелами енергії пропонується як один із ключових шляхів скорочення викидів парникових газів [1]. Відновлювані джерела енергії є частиною європейської бороть-

би зі зміною клімату, водночас вони сприяють економічному зростанню, збільшенню кількості робочих місць та забезпеченню енергетичної безпеки. Виробництво біогазу (біометану) з сільськогосподарської біомаси набуває все більшого значення для сталого використання аграрної біомаси та має значні екологічні переваги [2].

Придатними субстратами для зброджування на сільськогосподарських біогазових

**Інформація про авторів:**

**Павліченко Костянтин Васильович**, доктор філософії, асистент кафедри технологій у рослинництві та захисту рослин, <https://orcid.org/0000-0002-5469-9684>

**Грабовський Микола Борисович**, доктор с.-г. наук, професор, професор кафедри технологій у рослинництві та захисту рослин, e-mail: nikgr1977@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8494-7896>,

**Панченко Тарас Валентинович**, кандидат с.-г. наук, доцент, завідувач кафедри технологій у рослинництві та захисту рослин, <https://orcid.org/0000-0003-1114-5670>

**Лозінський Микола Владиславович**, доктор с.-г. наук, доцент, завідувач кафедри генетики, селекції і насінництва сільськогосподарських культур, <https://orcid.org/0000-0002-6078-3209>

**Німенко Сергій Сергійович**, доктор філософії, асистент кафедри технологій у рослинництві та захисту рослин, <https://orcid.org/0000-0003-1748-549X>

установках є енергетичні культури: кукурудза (*Zea mays*), злакові трави (*Poaceae*), конюшина лучна (*Trifolium pratense*), суданська трава (*Sorghum sudanense*), буряк кормовий (*Beta vulgaris L. subsp.*) [3–6]. Кукурудза є однією з культур для виробництва біогазу (біометану) і має найвищий потенціал врожайності серед польових сільськогосподарських рослин, що вирощуються в Європі [7].

Виробництво метану з органічних субстратів головним чином залежить від вмісту в них речовин, які можуть розкладатися на  $\text{CH}_4$  та  $\text{CO}_2$ . Склад та біорозкладність є ключовими факторами виходу метану з вегетативної маси енергетичних культур. Вміст сирого протеїну, сирого жиру, сирого клітковини, целюлози, геміцелюлози, крохмалю та цукрів суттєво впливають на вихід метану [8–10]. Хімічний склад та рівень біологічної розкладаності є ключовими характеристиками субстратів, які мають рослинне походження. Такі компоненти як, сирий білок, жири, структурні вуглеводи, а також легкоферментовані вуглеводи – крохмаль і прості цукри суттєво впливають на інтенсивність утворення метану в процесі анаеробного зброджування [11].

Слід зазначити, що концентрація метану в біогазі меншою мірою пов'язана з хімічним складом субстрату, ніж загальний вихід біогазу. Таким чином, навіть при відносно невисокому вмісті метану в біогазі, його загальний вихід може бути значним [12].

Лігноцелюлозна фракція кукурудзи може бути використана для виробництва біометану шляхом анаеробного розкладання. Лігноцелюлоза перетворюється на біометан через гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез [13–14].

На сьогодні розроблено низку моделей, які дозволяють оцінювати потенційний вихід метану на підставі хімічного складу субстрату. Серед чинників які обмежують цей процес особливу увагу приділяють лігніну, який вважається одним з основних інгібіторів метаногенезу [15]. Його високий вміст традиційно розглядається як фактор, що значною мірою стримує ефективність розкладання рослинної біомаси [16–17]. Дослідження V. Dandikas та ін. встановили істотну негативну кореляцію ( $r = -0,90$ ) між виходом метану та вмістом лігніну у випадках, коли його частка

не перевищувала 10 % у загальній масі сухої речовини [18].

Одержали також негативну залежність між обсягом утвореного біогазу та вмістом зольних елементів і білків у досліджених рослинних субстратах [19]. У роботі S. Schittenhelm зазначено, що вміст золи мав тенденцію до підвищення у більш пізньостиглих гібридів кукурудзи, а вміст жиру у всіх гібридів збільшувався до кінця вегетації кукурудзи. Відмінності у наявності жиру серед гібридів кукурудзи були більш вираженими на пізніх етапах розвитку. Кількість білка майже постійно знижувалася від першої до останньої дати збору врожаю [20].

У наукових працях є дані про негативний вплив сирого протеїну на вихід біогазу [21]. Однією з причин цього може бути утворення в результаті зброджування рослинних субстратів аміаку, який є інгібітором бродіння метану при занадто високій концентрації [22]. Гібриди кукурудзи, що використовуються як відновлювана біоенергетична сировина, повинні мати генетично обумовлений високий вміст крохмалю [23].

Застосування добрив  $\text{N}_{300}$  і меншою мірою  $\text{N}_{200}$  зменшує вміст кислотно-детергентної та нейтральної клітковини детергенту, але підвищує вміст сирого протеїну порівняно з неудообреними варіантами посівів кукурудзи [24]. Збільшення доз внесення мінеральних добрив і проведення підживлень сприяє підвищенню вмісту в зерні кукурудзи протеїну і зниженню крохмалю та жиру [25–26].

*Метою досліджень* було визначення впливу макро- і мікродобрив на показники якості вегетативної маси рослин кукурудзи та розрахунковий вихід біометану.

**Матеріали та методи дослідження.** Дослідження проводилися в 2019–2021 рр. у СТОВ «Птахоплемзавод Коробівський» Андрушівського району Житомирської області за наступною схемою: **Фактор А.** Гібриди кукурудзи: 1. Амарос (ФАО 230); 2. Богатир (ФАО 290); 3. КВС 381 (ФАО 350); 4. Каріфолс (ФАО 380). **Фактор В.** Макродобрива, кг/га д. р.: 1. Без добрив (контроль); 2.  $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ ; 3.  $\text{N}_{120}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ . **Фактор С.** Мікродобрива: 1. Без внесення добрив (контроль); 2. Обробка насіння (інкрустація насіння) YaraVita Terrosyn NP+Zn (5 л/т) + обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita

Maize Boost (4 л/га); 3. Обробка насіння YaraTera Tenso Cocktail (0,15 кг/т) + обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Kombiphos (3 л/га). Повторність досліду чотириразова. Розміщення варіантів – систематичне. Площа облікової ділянки – 184 м<sup>2</sup>.

Агротехніка вирощування кукурудзи була загальноприйнятою для умов Правобережного Лісостепу України, крім факторів, що вивчалися. Мінеральні добрива вносили восени, решту азотних – перед сівбою кукурудзи. Добрива Yara застосовували для обробки насіння перед сівбою та для позакорневих підживлень у фазі 3–5 листків кукурудзи (BVCH 13–16).

Визначення хімічних показників вегетативної маси рослин кукурудзи проводили в сертифікованій лабораторії «Eurofins Agro (BLGG AgroXpertus)» м. Київ за методикою З. М. Грицаєнка та ін. [27]. Визначення вмісту геміцелюлози і целюлози у зразках кукурудзи здійснювали відповідно до методики [28]. Сиру масу п'яти зразків рослин кукуруд-

зи відбирали перед збиранням (фаза воскової стиглості зерна). Потім рослини подрібнювали на шматочки розміром 2,5–3,0 см, заповнювали і запаювали у вакуумні пакети вагою 2 кг, щоб отримати матеріал для визначення вмісту сухої речовини та хімічних аналізів. Сировина була об'єднана, фрагментована, упакована в 5-літрові пластикові бочки і зберігалася в темряві. Для розрахунку виходу біогазу приймали, що з 1 кг сухої речовини кукурудзи можна отримати 0,6 м<sup>3</sup> біогазу з вмістом метану 58 %. Вихід біометану вираховували згідно з методичними рекомендаціями [29].

**Результати досліджень.** Встановлено, що у рослинах середньостиглих гібридів кукурудзи КВС 381 та Каріфолс містилося більше крохмалю, сирого протеїну та жиру порівняно з середньоранніми гібридами Амарос і Богатир. Крім того, вегетативна маса гібрида КВС 381 вирізнялася максимальним вмістом целюлози – 28,4–29,6 % (табл. 1, 2).

Вміст крохмалю у вегетативній масі рос-

**Таблиця 1. Хімічний склад вегетативної маси рослин середньоранніх гібридів кукурудзи у фазі воскової стиглості зерна, 2019–2021 рр., % на сиру речовину**

Гібрид	Макродобрива	Мікродобрива*	Крохмаль	Сирий протеїн	Сирий жир	Сира зола	Сира клітковина	Целюлоза	Геміцелюлоза
Амарос	Без добрив	1	32,5	7,8	1,7	5,3	21,3	23,6	24,5
		2	32,4	7,8	1,6	5,2	21,0	23,8	25,1
		3	32,5	7,9	1,3	5,2	21,1	24,0	24,9
	N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1	33,3	8,3	1,7	5,4	20,2	24,3	26,1
		2	33,2	8,2	1,5	5,3	20,0	24,2	25,7
		3	33,3	8,4	1,7	5,4	19,8	24,5	24,8
	N <sub>120</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1	33,8	8,5	1,8	5,8	19,5	25,0	26,4
		2	33,9	8,6	1,5	5,8	19,2	25,2	25,4
		3	33,8	8,5	1,7	5,9	19,3	25,4	24,7
Богатир	Без добрив	1	32,9	8,3	1,9	6,8	25,6	26,7	30,2
		2	33,0	8,3	2,0	6,8	25,0	27,0	31,4
		3	32,8	8,5	2,0	7,0	24,8	27,0	30,9
	N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1	33,6	8,7	2,1	7,0	23,9	27,1	32,1
		2	33,8	8,4	2,0	6,9	23,6	27,3	31,5
		3	33,6	8,7	2,0	7,2	23,5	27,5	32,4
	N <sub>120</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1	34,0	9,0	2,2	7,3	22,8	27,9	28,7
		2	34,0	8,9	2,0	6,9	22,7	28,0	30,5
		3	34,2	9,0	2,0	7,2	22,6	28,2	32,4
НІР <sub>05</sub>	A	0,3	0,3	0,2	0,5	0,7	0,8	1,6	
	B	0,4	0,2	0,1	0,2	0,8	0,4	1,5	
	C	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	
	AB	1,0	0,4	0,3	0,7	1,5	1,3	2,9	
	AC	0,5	0,3	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4	
	BC	0,6	0,3	0,2	0,2	0,5	0,4	0,3	
	ABC	1,2	0,6	0,5	0,9	2,1	1,9	3,8	

Примітка\* 1. Без застосування (контроль); 2. Обробка насіння YaraVita Teprosyn NP+Zn (5 л/т) + обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Maize Boost (4 л/га); 3. Обробка насіння YaraTera Tenso Cocktail (0,15 кг/т) + обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Kombiphos (3 л/га)

лин середньоранніх та середньостиглих гібридів кукурудзи становив 32,4–34,2 % та 35,6–38,2 % відповідно, що зумовлювалося передусім, їх генетичними особливостями. Вміст сирого протеїну у вегетативній масі рослин гібридів Амарос і Богатир (середньо-

рання група) становив 7,8–9,0 %, тоді як у КВС 381 і Каріфолс (середньостигла група) цей показник був у межах 8,9–10,0 %. Застосування макро- та мікродобрив сприяло зростанню вмісту сирого протеїну на 2,1–8,7 %, а мікродобрив – на 0,6–1,8 %.

**Таблиця 2. Хімічний склад вегетативної маси рослин середньостиглих гібридів кукурудзи у фазі воскової стиглості зерна, 2019–2021 рр.), % на СР**

Гібрид	Макро-добрива	Мікро-добрива	Крохмаль	Сирий протеїн	Сирий жир	Сира зола	Сира клітковина	Целюлоза	Геміцелюлоза
КВС 381	Без добрив	1	35,7	8,9	2,1	7,5	24,7	28,4	27,2
		2	35,8	9,0	1,9	7,3	24,0	28,6	25,9
		3	35,6	9,0	2,0	7,2	24,2	28,6	28,0
	N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1	36,5	9,4	2,2	7,4	23,6	28,9	27,0
		2	36,6	9,5	2,0	7,6	23,1	29,1	26,9
		3	36,6	9,4	2,2	7,7	23,4	29,0	27,6
	N <sub>120</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1	36,9	9,5	2,2	7,4	22,3	29,5	28,2
		2	37,0	9,6	2,0	7,8	21,8	29,6	28,6
		3	36,9	9,7	2,1	7,8	21,6	29,4	27,8
Каріфолс	Без добрив	1	36,7	9,6	2,4	6,2	23,2	25,6	28,1
		2	36,5	9,6	2,1	6,0	22,8	26,1	27,6
		3	36,4	9,7	2,3	6,3	22,7	26,4	28,6
	N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1	37,5	9,9	2,3	6,2	22,0	26,4	26,7
		2	37,6	9,8	2,1	6,4	21,8	26,7	28,2
		3	37,6	10,0	2,4	5,3	21,8	27,0	28,8
	N <sub>120</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1	38,2	9,9	2,4	6,4	20,9	27,2	28,2
		2	37,9	10,0	2,3	6,5	20,6	28,2	27,6
		3	38,1	9,8	2,5	6,4	20,5	28,5	29,0
НІР <sub>05</sub>	А	0,3	0,3	0,2	0,5	0,7	0,8	1,6	
	В	0,4	0,2	0,1	0,2	0,8	0,4	1,5	
	С	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	
	АВ	1,0	0,4	0,3	0,7	1,5	1,3	2,9	
	АС	0,5	0,3	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4	
	ВС	0,6	0,3	0,2	0,2	0,5	0,4	0,3	
	АВС	1,2	0,6	0,5	0,9	2,1	1,9	3,8	

Примітка\* 1. Без застосування (контроль); 2. Обробка насіння YaraVita Teprosyn NP+Zn (5 л/м) + обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Maize Boost (4 л/га); 3. Обробка насіння YaraTera Tenso Cocktail (0,15 кг/м) + обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Kombiphos (3 л/га)

Вміст сирого жиру у вегетативній масі рослин середньоранніх гібридів змінювався з 1,3 до 2,2 %, тоді як у середньостиглих – з 1,9 до 2,5 %. Вплив макро- та мікродобрив на цей показник був статистично незначним (НІР<sub>05</sub> = 0,3), а відмінності між гібридами не були суттєвими. Вміст сирого золи у вегетативній масі рослин був найнижчим у гібрида Амарос (5,5 %) і найвищим – у рослин гібрида КВС 381 (7,5 %), що свідчить про суттєвий вплив генотипу. Внесення макро- та мікродобрив зумовлювало збільшення цього показника на 1,3–4,9 %, у той же час як мікродобрива не

мали достовірного впливу.

Вміст сирогої клітковини у вегетативній масі рослин середньоранніх гібридів складав 19,2–25,6 %, а у середньостиглих – 20,5–24,7 %. Внесення макро- та мікродобрив сприяло її зниженню на 2,3–6,7 %, а мікродобрив – на 0,5–1,4 %, відносно контролю. У середньоранніх гібридів вміст целюлози й геміцелюлози змінювався в межах 23,6–28,2 % і 24,5–32,4 %, а у середньостиглих – 25,6–29,6 % і 26,7–29,0 %.

При застосуванні як макро-, так і мікродобрив відмічена тенденція до підвищення рівня крохмалю, сирого протеїну й целюлози

у порівнянні з варіантами без добрив (контроль). Найвищі значення цих показників були у варіанті з дозою N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>. Одночасно із тенденцією до зростання кількості целюлози спостерігалось практично пропорційне зниження вмісту сирової клітковини під впливом дії макро- та мікродобрив. Також є тенденція до підвищення вмісту сирової золи у варіантах із застосуванням макродобрив. Щодо інших хімічних елементів то чіткої закономірності впливу добрив на їх вміст виявлено не було.

За даними І. П. Сатановською встановлено, що комплексне застосування передпосівної обробки насіння й позакореневих підживлень препаратами «Емістим С» та «Еколист багатоконпонентний» зумовлюва-

ло зменшення сирової клітковини з 26,73 до 24,03 % у середньораннього гібрида кукурудзи і з 28,18 до 25,08 % – у середньостиглого гібрида [30].

Розрахований питомий вихід метану у вегетативній масі рослин кукурудзи, визначений на основі вмісту сухої речовини, сирово протеїну, жиру, целюлози та геміцелюлози, змінювався у межах 272,1–356,6 м<sup>3</sup>/т сухої органічної речовини (СОР), що у перерахунку на вегетативну масу становило 97,2–126,8 м<sup>3</sup>/т (табл. 3). Проведені дослідження засвідчили, що найбільше зростання цього показника відбувалося під впливом внесення макродобрив: N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> – на 11,2–16,9 %, N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> – на 12,9–23,4 % порівняно з контрольними варіантами.

**Таблиця 3. Розрахунковий вихід біометану у гібридів кукурудзи у фазі воскової стиглості зерна, 2019–2021 рр.**

Макродобрива	Мікродобрива*	Питомий вихід біометану	
		м <sup>3</sup> /т СОР	м <sup>3</sup> /т вегетативної маси рослин
1	2	3	4
<b>Амарос</b>			
Без добрив	1	279,9	99,6
	2	278,5	99,3
	3	272,1	97,2
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1	293,4	103,0
	2	285,1	100,2
	3	293,4	103,3
N <sub>120</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1	301,7	104,2
	2	294,0	101,1
	3	296,8	102,5
<b>Богатир</b>			
Без добрив	1	310,2	114,8
	2	315,6	117,2
	3	318,5	117,6
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1	327,3	119,3
	2	318,2	116,0
	3	325,8	118,8
N <sub>120</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1	331,5	118,9
	2	327,3	118,0
	3	332,8	119,7
<b>КВС 381</b>			
Без добрив	1	325,1	118,0
	2	319,6	116,8
	3	326,0	119,0
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1	338,0	121,4
	2	334,5	119,9
	3	339,2	121,7
N <sub>120</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1	343,0	121,5
	2	340,2	120,1
	3	343,2	121,5
<b>Каріфолс</b>			
Без добрив	1	343,3	124,9
	2	335,0	122,7
	3	344,7	125,6

1	2	3	4
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1	345,3	124,0
	2	340,9	122,6
	3	354,6	129,2
N <sub>120</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1	352,0	124,4
	2	352,0	124,5
	3	356,6	126,8

Примітка\* 1. Без застосування (контроль); 2. Обробка насіння YaraVita Teprosyn NP+Zn (5 л/т)+ обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Maize Boost (4 л/га); 3. Обробка насіння YaraTera Tenso Cocktail (0,15 кг/т)+обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Kombiphos (3 л/га)

Застосування мікродобрив за схемою: передпосівна обробка насіння препаратом YaraVita Teprosyn NP+Zn (5 л/т) у поєднанні з позакореневим підживленням у фазі 3–5 листків препаратом YaraVita Maize Boost (4 л/га) практично не впливало на значення розрахункового виходу метану.

Більш ефективним для виробництва біометану може бути застосування мікродобрив за схемою: обробка насіння YaraTera Tenso Cocktail (0,15 кг/т) і обприскування посівів у фазі 3–5 листків YaraVita Kombiphos (3 л/га). При цьому питомий вихід метану збільшується на 0,8–4,8 % за відсутності макродобрив (контроль), при удобренні N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> – на 1,6–6,1 %, а при внесенні N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> – на 0,2–3,9 %.

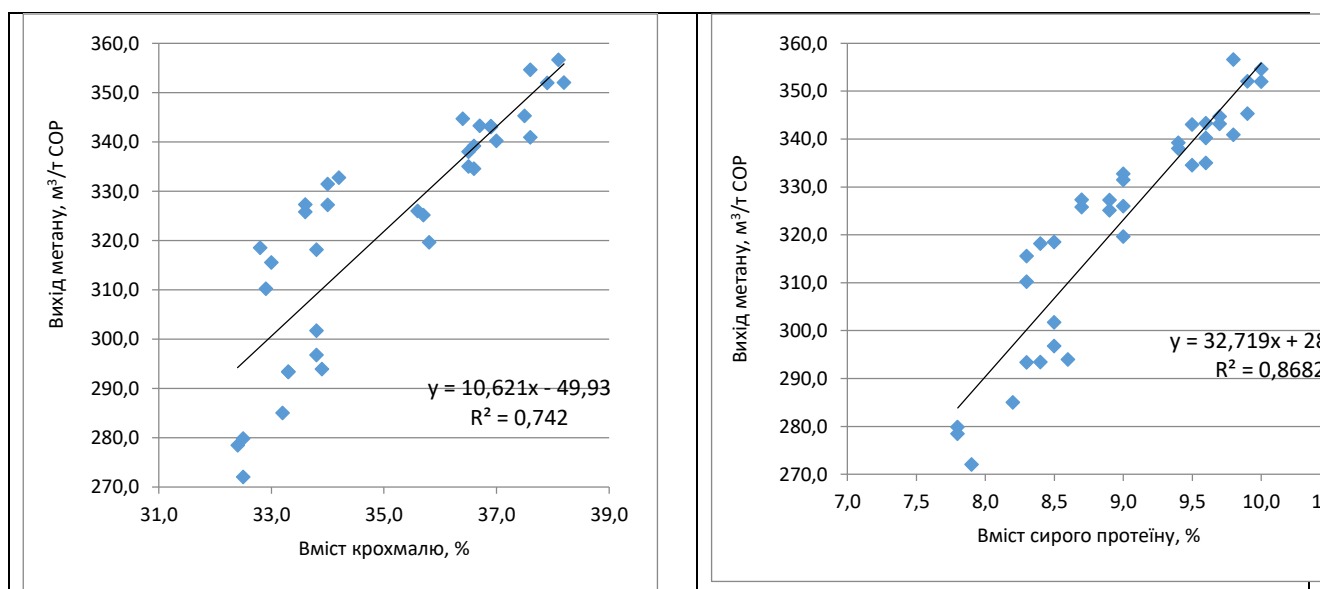
Таким чином, макродобрива суттєво впливають на зростання енергетичного потенціалу вегетативної маси рослин кукурудзи, ніж мікродобрива, хоча останні можуть бути корисним додатковим елементом у системі удобрення для підвищення виробництва біометану.

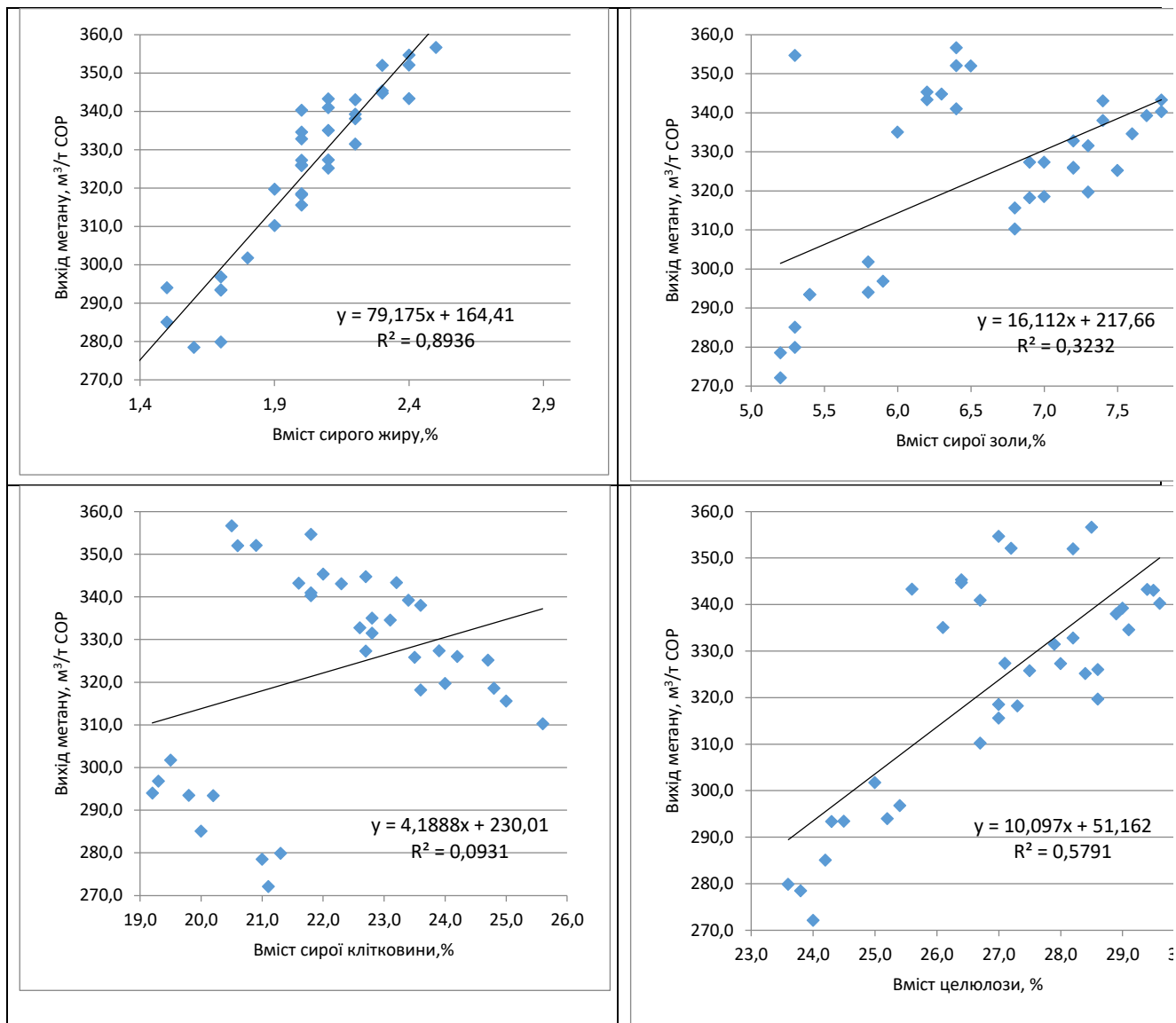
Враховуючи, що рослинний організм функціонує як єдина біосистема, зміни одного показника супроводжуються певними трансформаціями інших. Ці взаємозв'язки ідентифікуються за допомогою коефіцієнтів кореляції, які дозволяють виявити потенційно факторні ознаки – маркери для добору за продуктивністю [31].

Кореляційний аналіз показав на високий рівень зв'язку розрахункового виходу метану із вмістом крохмалю ( $r = 0,86$ ), протеїну ( $r = 0,93$ ) і жиру ( $r = 0,95$ ). Помірний взаємозв'язок був за вмістом целюлози ( $r = 0,66$ ), геміцелюлози ( $r = 0,58$ ) та золи ( $r = 0,57$ ) (рис. 1).

Водночас зв'язок між вмістом клітковини та виходом метану був слабким ( $r = 0,31$ ).

**Висновки.** При застосуванні як макро-, так і мікродобрив відмічена тенденція до підвищення вмісту крохмалю, сирого протеїну й целюлози у вегетативній масі рослин кукурудзи, порівняно з контрольними варіантами. При цьому, під впливом добрив спостерігається зниження вмісту клітковини. Серед





**Рис. 1** Кореляційні залежності між хімічним складом вегетативної маси рослин кукурудзи і розрахунковим виходом метану

гібридів кукурудзи середньостиглі КВС 381 та Каріфолс мали вищий вміст крохмалю, сирого протеїну та жиру у вегетативній масі рослин, порівняно з середньоранніми Амарос і Богатир.

Питомий вихід метану в досліді був у межах 272,1–356,6 м³/т сухої органічної речовини (COP), що відповідає 97,2–129,2 м³/т з вегетативної маси рослин кукурудзи. Найвищий питомий вихід метану одержали у гібрида Каріфолс – 335,0–356,6 м³/т COP, у КВС 381 він складав – 319,6–343,2 м³/т COP, у Богатир – 310,2–332,8 м³/т COP, а в Амарос –

272,1–301,7 м³/т COP.

Встановлено високий позитивний кореляційний зв'язок між розрахунковим виходом метану та вмістом крохмалю ( $r = 0,86$ ), сирого протеїну ( $r = 0,93$ ) та жиру ( $r = 0,95$ ), середній зв'язок – із вмістом сирого золи ( $r = 0,57$ ) і целюлози ( $r = 0,66$ ). Кореляційний зв'язок між вмістом клітковини та виходом метану був слабким ( $r = 0,31$ ).

Внесення макрообрив забезпечувало збільшення виходу метану на 11,2–28,4 %, тоді як застосування мікробобрив – лише на 1,6–3,3 %, порівняно з контролем.

#### Використана література

1. Alavijeh R. S., Shahvandi A., Okoro O. V., Denayer J. F., Karimi K. Biorefining of corn stover for efficient production of bioethanol, biodiesel, biomethane, and

valueadded byproducts. *Energy Conversion and Management*. 2023.283. 116877. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116877>

2. Amon T, Amon B, Kryvoruchko V. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology*. 2007. №98(17). P. 3204–3212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.007>
3. Chynoweth D. P., Turick C. E., Owens J. M., Jerger D E., Peck M. W. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 1993. №5. P. 95–111.
4. Grabovskiy, M., Lozinskyi, M., Grabovska, T., Roubik, H. Green mass to biogas in Ukraine – bioenergy potential of corn and sweet sorghum. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. 13, 3309–3317. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01316-0>
5. Павліченко К. В., Грабовський М. Б. Урожайність зеленої і сухої маси гібридів кукурудзи та вихід біогазу залежно від застосування макро- і мікродобрив. *Зрошуване землеробство*. 2022. Вип. 77. С. 79–85. <https://doi.org/10.32848/0135-2369.2022.77.17>
6. Seppälä M., Pyykkönen V., Väisänen A., Rintala J. Biomethane production from maize and liquid cow manure—effect of share of maize, post-methanation potential and digestate characteristics. *Fuel*. 2013. № 107. P. 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.069>
7. Oslaj M., Mursec B., Vindis, P. Biogas production from maize hybrids. *Biomass and bioenergy*. 2010. № 34 (11). P.1538–1545. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.016>
8. Lebuhn M., Liu F., Heuwinkel H. Biogas production from mono-digestion of maize silage-long-term process stability and requirements. *Water Science Technology*. 2008. №58(8). P.1645–1651. doi: 10.2166/wst.2008.495
9. Grabovskiy M., Kucheruk P., Pavlichenko K., Roubik H. Influence of macronutrients and micronutrients on maize hybrids for biogas production. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. 30. 70022–70038. doi.org/10.1007/s11356-023-27235-3
10. Степаненко М.В., Грабовський М.Б., Качан Л. М., Козак Л. А. Вміст крохмалю в зерні кукурудзи залежно від способу сівби. Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Актуальні проблеми агропромислового виробництва України: виклики і шляхи розвитку в умовах війни і повоєнної відбудови», с. Оброшине, 23 листопада 2023 р., Львів-Оброшине, 2023. С. 114–115.
11. Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Zollitsch W., Mayer K., Gruber L. Biogas production from maize and dairy cattle manure—influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2007. №118 (1). pp. 173–182. doi: 10.1016/j.agee.2006.05.007
12. Oleszek M., Matyka M. Determination of the efficiency and kinetics of biogas production from energy crops through nitrogen fertilization levels and cutting frequency. *BioResources*. 2018. № 13 (4). P. 8505–8528. doi: 10.15376/biores.13.4.8505-8528
13. Ma S., Wang H., Li L., Gu X., Zhu W. Enhanced biomethane production from corn straw by a novel anaerobic digestion strategy with mechanochemical pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. 146. 111099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111099>
14. Павліченко К. В., Грабовський М. Б., Німенко С. С. Оцінка гібридів кукурудзи за якісними показниками вегетативної маси рослин. Матеріали XII Між-нар. наук.-практ. конф. молодих вчених і спеціалістів «Селекція, генетика та технології вирощування сільськогосподарських культур», присвячена 60-річчю реєстрації сорту-шедевр пшениці м'якої озимої Миронівська 808, с. Центральне, 19 квітня 2024 р., МПП ім. Ремесла. С. 124.
15. Thomsen S. T., Spliid H., Østergård H. Statistical prediction of biomethane potentials based on the composition of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2014. № 154. P. 80–86. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.12.029
16. Triolo J. M., Sommer S. G., Møller H. B., Weisbjerg M. R., Jiang X. Y. A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology*. 2011. № 102 (20). pp. 9395–9402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.026>
17. Liimatainen A., Sairanen A., Jaakkola S., Kokkonen T., Kuoppala K., Jokiniemi T., Mäkelä P.S.A. Yield, Quality and Nitrogen Use of Forage Maize under Different Nitrogen Application Rates in Two Boreal Locations. *Agronomy*. 2022. № 12(4). P. 887. doi:10.3390/agronomy12040887
18. Dandikas V, Heuwinkel H, Lichti F, Drewes JE, Koch K. Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 174. P. 316–320. doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.019
19. Tsavkelova E. A., Netrusov A. I. Biogas production from cellulose-containing substrates: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2012. № 48(5). P. 421–433. doi:10.1134/s0003683812050134
20. Schittenhelm S. Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *European Journal of Agronomy*. 2008. Vol. 29. P. 72–79. DOI: 10.1016/j.eja.2008.04.001
21. Golinski P., Jokś W. Chemical and biological properties of grasses and biogas production. *Grassland Science in Poland*. 2007. №10. P. 37–47.
22. Wagner A. O., Lins P., Malin C., Reitschuler C., Illmer P. Impact of protein, lipid- and cellulose-containing complex substrates on biogas production and microbial communities in batch experiments. *Sci. Total Environ*. 2013. № 458–460. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.034
23. Дейнеко Л. В., Загний О. Г. Проблеми виробництва та використання біопалива в Україні. *Вісник Сумського державного університету. Серія: Економіка*. 2006. № 1 (85). С. 49–54.
24. Lamptey S., Yeboah S., Li L. Response of Maize Forage Yield and Quality to Nitrogen Fertilization and Harvest Time in Semi-arid Northwest China. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*. 2018. № 1 (2). P. 1–10. DOI: 10.9734/AJRAF/2018/40968
- Shynkaruk L., Lykhochvor V. Influence of fertilization and foliar feeding on maize grain qualitative indicators. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11. № 6. pp. 113–116. doi: 10.15421/2021\_232
25. Степаненко М. В., Грабовський М. Б. Вплив системи удобрення на лінійні розміри рослин кукурудзи. *Аграрні інновації*. 2023. № 21. С. 104–109. doi: 10.32848/agrar.innov.2023.21.16
26. Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень

рослин і ґрунтів: методичні рекомендації. Київ: ЗАТ «Нічлава», 2003. 320 с.

27. Провальчук В. П., Васильев В. Г., Бойко Л. В., Зосимов В. Д. Сборник методов исследования почв и растений. Київ: Труд-ГриПол ХХІ вік, 2010. 252 с.
28. Методичні рекомендації з розрахунку виходу біогазу та біогазу з біоенергетичних культур. Грабовський М. Б. та ін. Біла Церква. 2021. 28 с.

## References

1. Alavijeh, R. S., Shahvandi, A., Okoro, O. V., Denayer, J. F., & Karimi, K. (2023). Biorefining of corn stover for efficient production of bioethanol, biodiesel, biomethane, and value-added byproducts. *Energy Conversion and Management*, 283, 116877. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116877>
2. Amon, T., Amon, B., & Kryvoruchko, V. (2007). Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology*, 98 (17), 3204–3212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.007>
3. Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E., & Peck, M. W. (1993). Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 5, 95–111.
4. Grabovskyi, M., Lozinskyi, M., Grabovska, T., & Roubík, H. (2023). Green mass to biogas in Ukraine – bioenergy potential of corn and sweet sorghum. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 3309–3317. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01316-0>
5. Pavlichenko, K. V., & Grabovskyi, M. B. (2022). Yield of green and dry mass of maize hybrids and biogas output depending on the use of macro- and micronutrients. *Zroshuvane zemlerobstvo* [Irrigated Agriculture], 77, 79–85. <https://doi.org/10.32848/0135-2369.2022.77.17> [in Ukrainian]
6. Seppälä, M., Pyykkönen, V., Väisänen, A., & Rintala, J. (2013). Biomethane production from maize and liquid cow manure – effect of share of maize, post-methanation potential and digestate characteristics. *Fuel*, 107, 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.069>
7. Oslaj, M., Mursec, B., & Vindis, P. (2010). Biogas production from maize hybrids. *Biomass and Bioenergy*, 34(11), 1538–1545. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.016>
8. Lebuhn, M., Liu, F., & Heuwinkel, H. (2008). Biogas production from mono-digestion of maize silage – long-term process stability and requirements. *Water Science and Technology*, 58 (8), 1645–1651. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.495>
9. Grabovskyi, M., Kucheruk, P., Pavlichenko, K., & Roubík, H. (2023). Influence of macronutrients and micronutrients on maize hybrids for biogas production. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 70022–70038. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27235-3>
10. Stepanenko, M. V., Grabovskyi, M. B., Kachan, L. M., & Kozak, L. A. (2023). Vmist krokhmalu v zerni kukurudzji zalezno vid sposobu sivby [Starch content in maize grain depending on sowing method]. Proc 12 All-Ukrainian Sci.-Pract. Conf. of Young Scientists (pp. 114–115). November 23, 2023, v. Obroshy-ne. Lviv-Obroshyne. Ukraine [in Ukrainian]
11. Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., & Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure-influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118 (1), 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.007>
12. Oleszek, M., & Matyka, M. (2018). Determination of the efficiency and kinetics of biogas production from energy crops through nitrogen fertilization levels and cutting frequency. *BioResources*, 13 (4), 8505–8528. <https://doi.org/10.15376/biores.13.4.8505-8528>
13. Ma, S., Wang, H., Li, L., Gu, X., & Zhu, W. (2021). Enhanced biomethane production from corn straw by a novel anaerobic digestion strategy with mechanochemical pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111099>
14. Pavlichenko, K. V., Grabovskyi, M. B., & Nimenko, S. S. (2024). Otsinka hibrydiv kukurudzji za yakisnymi pokaznykamy zelenoi masy [Evaluation of maize hybrids by qualitative indicators of green mass]. Proc XII Intern. Sci. Conf. of Young Scientists and Specialists “Breeding, Genetics and Technologies for Growing Agricultural Crops” (p. 124), April 19, 2024, The V. M. Remeslo Myronivka Institute of Wheat, v. Centralne, Myronivskyi district, Kyiv region. Ukraine. [in Ukrainian]
15. Thomsen, S. T., Spliid, H., & Østergård, H. (2014). Statistical prediction of biomethane potentials based on the composition of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 154, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.029>
16. Triolo, J. M., Sommer, S. G., Møller, H. B., Weisbjerg, M. R., & Jiang, X. Y. (2011). A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology*, 102 (20), 9395–9402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.026>
17. Liimatainen, A., Sairanen, A., Jaakkola, S., Kokkonen, T., Kuoppala, K., Jokiniemi, T., & Mäkelä, P. S. A. (2022). Yield, quality and nitrogen use of forage maize under different nitrogen application rates in two boreal locations. *Agronomy*, 12(4), 887. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040887>
18. Dandikas, V., Heuwinkel, H., Lichti, F., Drewes, J. E., & Koch, K. (2014). Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. *Bioresource Technology*, 174, 316–320. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.019>
19. Tsavkelova, E. A., & Netrusov, A. I. (2012). Biogas production from cellulose-containing substrates: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 48(5), 421–433. <https://doi.org/10.1134/S0003683812050134>
20. Schittenhelm, S. (2008). Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *European Journal of Agronomy*, 29, 72–

79. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.001>
21. Golinski, P., & Jok s, W. (2007). Chemical and biological properties of grasses and biogas production. *Grassland Science in Poland*, 10, 37–47.
  22. Wagner, A. O., Lins, P., Malin, C., Reitschuler, C., & Illmer, P. (2013). Impact of protein, lipid- and cellulose-containing complex substrates on biogas production and microbial communities in batch experiments. *Science of the Total Environment*, 458–460, 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.034>
  23. Deineko, L. V., & Zahni , O. H. (2006). Problems of biofuel production and use in Ukraine. *Visnyk Sumskoho derzhavnoho universytetu. Seriya: Ekonomika* [Visnyk of Sumy State University. Series “Economy”], 1 (85), 49–54. [in Ukrainian]
  24. Lamptey, S., Yeboah, S., & Li, L. (2018). Response of maize forage yield and quality to nitrogen fertilization and harvest time in semi-arid northwest China. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 1 (2), 1–10. <https://doi.org/10.9734/AJRAF/2018/40968>
  25. Shynkaruk, L., & Lykhochvor, V. (2021). Influence of fertilization and foliar feeding on maize grain qualitative indicators. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11 (6), 113–116. [https://doi.org/10.15421/2021\\_232](https://doi.org/10.15421/2021_232)
  26. Stepanenko, M. V., & Grabovskyi, M. B. (2023). Effect of fertilization system on linear dimensions of maize plants. *Ahrarni innovatsii* [Agricultural innovations], 21, 104–109. <https://doi.org/10.32848/agrarinov.2023.21.16> [in Ukrainian]
  27. Hrytsaienko, Z. M., Hrytsaienko, A. O., & Karpenko, V. P. (2003). *Metody biolohichnykh ta ahrokhimichnykh doslidzhen roslyn i truntiv: metodychni rekomendatsii* [Methods of biological and agrochemical research of plants and soils: methodological recommendations]. Kyiv: ZAT “Nichlava”. [in Ukrainian]
  28. Provalchuk, V. P., Vasyliiev, V. H., Boiko, L. V., & Zosymov, V. D. (2010). *Zbornyk metodiv doslidzhenia pochv i roslyn* [Collection of methods for soil and plant research]. Kyiv: Trud-HriPol XXI vik. [in Ukrainian]
  29. Grabovskyi, M. B. et al. (2021). *Metodychni rekomendatsii z rozrakhunku vykhodu biohazu ta biohazu z bioenerhetychnykh kultur* [Methodical recommendations for calculating biogas output from bioenergy crops]. Bila Tserkva: N. p. [in Ukrainian]
  30. Satanovska, I. P. (2013). Use of growth regulators and chelate fertilizers in shaping productivity of maize hybrids of different maturity groups for silage. *Kormy i kormovyrobnytstvo* [Feed and feed production], 76, 218–224. [in Ukrainian]
  31. Biliavska, L. H., & Rybalchenko, A. M. (2020). Structure of correlation relations of quantitative traits in soybean collection samples in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Zroshuvane zemlerobstvo* [Irrigated Agriculture], 74, 97–102. [in Ukrainian]

UDC 631.543:633.34:633.10

**Pavlichenko, K. V., Grabovskyi, M. B., Panchenko, T. V., Lozinskyi, M. V., Nimenko, S. S. Influence of macro- and microfertilisers on the quality indicators of maize vegetative mass and the estimated biomethane output. *Grain Crops*. 2025. 9 (2). 256–265.**

*Bila Tserkva National Agrarian University, 8/1 Soborna Sq., Bila Tserkva, Kyiv region, 09117, Ukraine*

**Topicality.** The use of renewable sources for biomethane production is important for the sustainable use of agricultural biomass and has significant environmental benefits. **Purpose.** To determine the effect of macro- and microfertilisers on the maize vegetative mass quality and the estimated biomethane output. **Material and Methods.** The research was carried out at the Agricultural Limited Liability Company Korobivskyi Poultry-Breeding Factory located in the Andrushivka district of Zhytomyr region during 2019–2021. The three-factor experiment involved the study of: factor A – maize hybrids (Amaros, Bohatyr, KWS 381, Carifols); factor B – macronutrient fertilisers (kg a.i./ha): control (no fertilisers), N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>, and N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>); and factor C – micronutrient fertilizers: control (no application), seed treatment with YaraVita Teprosyn NP+Zn (5 l/t) followed by foliar spraying with YaraVita Corn Boost (4 L/ha) at the 3–5 leaf stage, and seed treatment with YaraTera Tenso Cocktail (0.15 kg/t) followed by spraying with YaraVita Kombiphos (3 l/ha) at the same stage. **Results.** In the case of application of macro- and microfertilisers, there was a tendency towards an increase in the level of starch, crude protein and cellulose in the vegetative mass of maize plants compared to the control. At the same time, fertiliser application resulted in a decrease in fibre content. Among the maize hybrids under study, the vegetative mass of mid-ripening hybrids KWS 381 and Carifols had a higher content of starch, crude protein and fat in comparison with the mid-early hybrids Amaros and Bohatyr. The specific methane yield in the experiment was in the range of 272.1–356.6 m<sup>3</sup>/t of dry organic matter (DOM), which corresponds to 97.2–129.2 m<sup>3</sup>/t of vegetative mass of maize plants. The highest specific methane yield was recorded in the Carifols hybrid – 335.0–356.6 m<sup>3</sup>/t DOM, followed by KWS 381 – 319.6–343.2 m<sup>3</sup>/t DOM, Bohatyr – 310.2–332.8 m<sup>3</sup>/t DOM, and Amaros – 272.1–301.7 m<sup>3</sup>/t DOM. **Conclusions.** A strong positive correlation was found between methane yield and the content of starch (r = 0.86), crude protein (r = 0.93), and fat (r = 0.95). A moderate correlation was observed with crude ash (r = 0.57) and cellulose (r = 0.66), whereas the correlation with crude fibre content was weak (r = 0.31). The application of macrofertilisers had a greater effect on methane yield compared to the variant with microfertilisers. Thus, the application of mineral macronutrients resulted in an increase in methane yield by 11.2–28.4%, while the application of micronutrients led to an increase by only 1.6–3.3 % compared to the control (no fertilisers).

**Key words:** bioenergy, maize, hybrids, vegetative mass, chemical composition, specific methane yield