

DOI: 10.32636/01308521.2026-(79)-2-1

Оригінальна наукова стаття

УДК 633.15:662.757:620.9

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО ТА ВИРОБНИЦТВО ПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ**С. П. Вахній, М. Б. Грабовський, Т. В. Панченко,
К. В. Павліченко, М. В. Степаненко, О. В. Мостипан**

Білоцерківський національний
аграрний університет
пл. Соборна, 8/1, м. Біла Церква,
Київська обл., 09117

Про авторів:

Сергій ВАХНІЙ,
доктор сільськогосподарських наук
ORCID: 0000-0002-3460-9493

Микола ГРАБОВСЬКИЙ,
доктор сільськогосподарських наук
ORCID: 0000-0002-8494-7896

Тарас ПАНЧЕНКО,
кандидат сільськогосподарських
наук
ORCID: 0000-0003-1114-5670

Костянтин ПАВЛІЧЕНКО,
доктор філософії
ORCID: 0000-0002-5469-9684

Микола СТЕПАНЕНКО,
ORCID: 0000-0002-1286-4151
доктор філософії

Олена МОСТИПАН
доктор філософії
ORCID: 0000-0002-0743-700

Для листування:

Микола ГРАБОВСЬКИЙ
e-mail: nikgr1977@gmail.com

Інформація про фінансування:

Міністерство освіти і науки України

Отримано:

30 грудня 2025 р.

Погоджено до друку:

4 лютого 2026 р.

Опубліковано:

30 червня 2026 р.

Наведено результати досліджень з впливу мінеральних добрив, мікродобрив і регуляторів росту рослин на енергетичну ефективність вирощування кукурудзи на зерно та виробництва паливних пелет. Встановлено, що максимальна урожайність зерна кукурудзи та вихід паливних пелет отримано на варіанті $N_{90}P_{70}K_{70}$ у поєднанні із позакореневим підживленням Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га) – 9,41 і 6,66 т/га. Максимальні значення коефіцієнта енергетичної ефективності вирощування кукурудзи на зерно та для виробництва паливних пелет були також на цьому варіанті досліду – 3,32 і 6,62. Застосування мінеральних добрив дозволяє підвищити урожайність зерна і вихід паливних пелет на 11,3–18,8 % та 13,9–23,3 %, а мікродобрива та регулятори росту рослин на 3,5–6,5 % та 3,6–11,2 %, порівняно з варіантами без їх використання. В структурі енергетичних витрат при вирощуванні кукурудзи на зерно найбільшу частку займають мінеральні добрива (48,2 %), пальне (18,3 %) та технічні засоби (17,0 %), а в структурі витрат для виробництва паливних пелет з побічної продукції кукурудзи – електрична енергія (46,4 %) та витрати на перероблення сировини (31,4 %). Використання мінеральних добрив у технології вирощування кукурудзи дозволило підвищити коефіцієнт енергетичної ефективності на 0,62–0,86, а мікродобрив на 0,22–0,61, порівняно з контрольними варіантами.

Ключові слова: кукурудза, мінеральні добрива, регулятори росту рослин, урожайність зерна, побічна продукція, паливні пелети, коефіцієнт енергетичної ефективності.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons.

© Вахній С. П., Грабовський М. Б., Панченко Т. В., Павліченко К. В., Степаненко М. В., Мостипан О. В., 2026

Energy efficiency of growing corn for grain and production of fuel pellets

Bila Tserkva National Agrarian University
Soborna Square, 8/1, Bila Tserkva,
Kyiv region, 09117

About authors:

Serhiy VAKHNII
ORCID: 0000-0002-3460-9493

Mykola GRABOVSKYI
ORCID: 0000-0002-8494-7896

Taras PANCHENKO
ORCID: 0000-0003-1114-5670

Kostyantyn PAVLICHENKO
ORCID: 0000-0002-5469-9684

Mykola STEPANENKO
ORCID: 0000-0002-1286-4151

Olena MOSTYPAN
ORCID: 0000-0002-0743-700

For corresponding
Mykola GRABOVSKYI
e-mail: nikgr1977@gmail.com

Funding information:
Ministry of Education and Science
of Ukraine

Received:
December 30, 2025
Accepted:
February 4, 2026
Published:
June 30, 2026

Results of the impact of mineral fertilisers, micronutrients, and plant growth regulators on the energy efficiency of growing corn for grain and production of fuel pellets are presented. It was established that the maximum grain yield of corn and the output of fuel pellets were obtained with the $N_{90}P_{70}K_{70}$ treatment combined with foliar application of Ikar Bigo Roots (0.5 l/ha) + Ikar Fosto (0.5 l/ha) + Ikar Zinto (0.5 l/ha) – 9.41 and 6.66 t/ha, respectively. The highest values of the energy efficiency coefficient in corn cultivation for grain and for fuel pellet production were also recorded in this experimental variant – 3.32 and 6.62. The application of mineral fertilizers increased grain yield and fuel pellet output by 11.3–18.8 % and 13.9–23.3 %, respectively, while the use of micronutrients and plant growth regulators increased them by 3.5–6.5 % and 3.6–11.2 %, compared to control variants without their application. In the structure of energy inputs in corn cultivation for grain, the largest share is held by mineral fertilizers (48.2 %), fuel (18.3 %), and technical means/machinery (17.0 %). In the cost structure for producing fuel pellets from corn by-products, the largest shares are held by electrical energy – 46.4 % and raw material processing costs – 31.4 %. The use of mineral fertilizers in the corn cultivation technology increased the energy efficiency coefficient by 0.62–0.86, and the use of micronutrients increased it by 0.22–0.61, compared to the control variants.

Keywords: corn, mineral fertilizers, plant growth regulators, grain yield, by-products, fuel pellets, energy efficiency coefficient.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons.

Вступ. В багатьох країнах світу через зростання споживання енергії проводиться пошук нових методів її виробництва, вдосконалюються наявні та збільшується частка відновлюваних ресурсів енергії в енергетичному балансі та все більша частка отримується з відновлюваних джерел. Для цього використовуються залишки рослинної біомаси, а також різні сільськогосподарські та лісові рослини. Подрібнена біомаса цих рослин переважно використовується для виробництва біопалива з якого виробляється газ, який

пізніше використовується для опалення чи виробництва електроенергії. Раціональне використання ресурсів сьогодні пов'язане з постійним використанням відновлюваних ресурсів [14]. Відновлювані енергоресурси є одним з багатьох аспектів, що стосуються обмеження використання викопного палива і значної частки енергетичного сектору у викидах парникових газів, що сприяє зміні клімату та підвищенню енергетичної безпеки у світі.

Вирощування кукурудзи як джерела відновлюваної енергії стає все більш

популярним. Її можна застосовувати для харчових, кормових та енергетичних цілей [19]. Слід зазначити, що вирощування кукурудзи вимагає високих енергетичних витрат, отже, необхідно проводити дослідження для підвищення енергоефективності виробництва цієї культури. Енергоефективність слід визначати як співвідношення енергетичної цінності врожаю біомаси (накопиченої енергії, що міститься в біомасі) до загальних енергетичних витрат (накопиченої енергії, необхідної для виробництва біомаси) [18]. Елементи технології вирощування сільськогосподарських культур впливають по різному на навколишнє середовище, тому розрахунок енергетичної ефективності має бути важливим елементом оцінки виробництва продукції рослинництва, яке часто обмежується економічними та виробничими критеріями [13, 24].

Сільськогосподарські відходи, такі як солома, макуха чи целюлоза, мають високу енергомісткість. Їх можна використовувати як паливо безпосередньо (через пресування чи гранулювання) або шляхом перероблення на біогаз і рідке паливо. Окрім енергетичної вигоди, використання біомаси позитивно впливає на довкілля (зменшення викидів) та соціальну сферу (створення додаткових робочих місць) [3].

Стрімке зростання цін на газ стимулювало перехід до відновлюваних джерел. Україна володіє значним ресурсом біомаси – приблизно 8,3 млн т н.е. на рік (солома, стебла соняшника тощо). Зокрема, за даними Біоенергетичної асоціації України (2018 р.), лише потенціал відходів кукурудзи оцінюється у 18,6 млн т (3,6 млн т н.е.), де 9,7 млн т припадає на стебла, а 3,3 млн т – на стрижні [5].

Листя кукурудзи є ефективною сировиною для виробництва паливних пелет і брикетів шляхом пресування під високим тиском. Хоча національний стандарт на кукурудзяні брикети та пелети в Україні наразі відсутній, підприємства можуть розробляти власні технічні умови

або використовувати міжнародний стандарт ISO 17225-7, що регулює вимоги до недеревної біомаси [11].

Для досягнення максимальної ефективності використання відходів сільського господарства необхідно провести комплексну оптимізацію технологічних циклів, що передбачає не лише вдосконалення методів заготівлі сировини, а й глибоке науково-технічне обґрунтування характеристик обладнання, що залучене у процесах виробництва біопалива та подальшої генерації енергії на його основі [12, 26].

Відомо, що енергоефективність технології визначається корисним ефектом від її впровадження. Корисний ефект енергетичної технології – це різниця між виходом енергії з одиниці палива та витратами енергії на виробництво цієї одиниці палива. Якщо ця різниця від'ємна або близька до нуля, то технологія є енергетично неефективною [1]. У структурі затрат енергії на виробництво біопалив найбільше складають добрива (43,8–46,7 %), на другому місці це затрати енергії на перероблення сировини на біопаливо (32,2–39,6 %). На енергоносії затрачається 8,2–11,4 % енергії. Найменші енергозатрати складає праця людей (0,8 %) [16, 21].

За даними досліджень проведених в Польщі, на основі енергії накопиченої в урожаї були розраховані значення індексу енергоефективності для 13 технологій вирощування кукурудзи. Встановлено, що найбільший вплив на результати розрахунків енергоефективності мали витрати на добрива та паливо [20].

Збільшення норми добрив підвищує витрати енергії на вирощування кукурудзи: за умови використання добрив $N_{80}P_{40}K_{60}$ вони становили 4,20 млн ккал/га, а при проведенні підживлень зростали до 4,40–4,57 млн ккал/га. Збільшення норми добрив до $N_{120}P_{60}K_{100}$ призвело до зростання витрат до 5,17 млн ккал/га на контролі та 5,37–5,54 млн ккал/га при проведенні підживлень, а при удобренні $N_{160}P_{80}K_{140}$ – 6,14 млн ккал/га на

контрольному варіанті та 6,34–6,51 млн ккал/га у варіантах з проведенням підживлень [25].

За результатами досліджень, виконаних у зоні Правобережного Лісостепу України, за показником енергетичного коефіцієнта найбільш ефективним виявився спосіб удобрення, що поєднував передпосівне внесення азоту (N_{40} перед сівбою) та використання мікродобрива Вуксал Р Мах – 2,95. Цей варіант забезпечив найвищий рівень акумуляції енергії врожаєм – 191,57 ГДж/га [6].

При вирощуванні кукурудзи для отримання біогазу (біометану) максимальний вихід енергії з метану (207,5 ГДж/га) отримано в гібрида кукурудзи Каріфолс при застосуванні $N_{120}P_{90}K_{90}$ та передпосівної обробки насіння YaraTera Tenso Cocktail (0,15 кг/т) й обприскування кукурудзи у фазі 3–5 листків YaraVita Kombiphos (3 л/га). Але найвищий показник коефіцієнта енергетичної ефективності (5,1) одержано в гібрида Богатир на варіанті без використання макродобрив [7].

В південному Степу України дані розрахунків енергоефективності вирощування кукурудзи на зерно свідчать, що впровадження різних методів захисту рослин у технологію вирощування забезпечує приріст енергії з 11,0 у гібрида Степовий (ФАО 180) на контрольному варіанті до 49,1 у гібрида Арабат (ФАО 430) за інтегрованого методу захисту [17].

Згідно з даними, отриманими Є. В. Крестяніновим та ін. [9] встановлено, що найвищі енерговитрати на 1 га посіву кукурудзи були у варіантах за застосування позакоренових підживлень посівів кукурудзи та у гібриду Аякс на фоні внесених мінеральних добрив та підживлення сучасними добривами Нутрімікс, Нутрібор та Мікро-Мінераліс Кукурудза – 36136–35324 Мдж/га. Але відмічено і значне зростання виходу енергії з урожаєм зерна гібридів кукурудзи при застосуванні сучасних мікродобрив. Найвищі показники у гібридів Аякс та Оржиця 237 МВ було отримано за

комплексного застосування двох видів добрив у підживлення та дворазової обробки посівів у фенологічні фази 4 та 8 листка – 171952 та 162096 Мдж/га.

Українські дослідники довели, що найбільші витрати при виробництві пелет – це витрата електроенергії. Ці витрати залежать від багатьох факторів: заготівля сировини, вологість сировини й необхідність її додаткового подрібнення. Крім того, ці витрати також залежать від потужності обладнання. Різниця в питомому споживанні енергії при гранулюванні деревної та зернової соломи незначна, в той час, як питоме споживання енергії при гранулюванні лушпиння соняшника нижче [4, 8].

Як зазначають деякі вчені [15, 22, 23, 27] аналіз використання енергії при вирощуванні сільськогосподарських культур є важливим кроком у розробці відповідної енергетичної політики. Більш ефективно використання енергетичних ресурсів призведе до зменшення викидів парникових газів та зменшення їх впливу на навколишнє середовище.

Метою досліджень було визначення впливу мінеральних добрив, мікродобрив і регуляторів росту рослин на енергетичну ефективність вирощування кукурудзи на зерно та виробництва паливних пелет.

Матеріал і методи. Дослідження проводили у 2022–2024 рр. в ПСП Агрофірма «Світанок» Київської області за наступною схемою:

Фактор А. Мінеральні добрива (кг/га д. р.).

1. Без добрив;
2. $N_{50}P_{30}K_{30}$;
3. $N_{70}P_{50}K_{50}$;
4. $N_{90}P_{70}K_{70}$.

Фактор В. Позакореневе підживлення мікродобривами та регуляторами росту рослин.

1. Без застосування;
2. Нутрівант Універсальний (2 кг/га) у фазі 3–5 листків кукурудзи (ВВСН 13-16);
3. Нутрівант плюс Зерновий (2 кг/га) у фазі 3–5 листків кукурудзи (ВВСН 13-16) +

Атланте (0,5 л/га) у фазі 7–8 листків кукурудзи (ВВСН 17-18);

4. Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) у фазі 3–4 листків кукурудзи (ВВСН 13-14) + Ікар Фосто (0,5 л/га) у фазі 4–5 листків кукурудзи (ВВСН 15-16) + Ікар Зінто (0,5 л/га) у фазі 7–8 листків кукурудзи (ВВСН 17-18).

Висівали гібрид кукурудзи СИ Октеон (ФАО 380). Площа облікової ділянки – 294 м². Повторність – триразова. Розміщення варіантів послідовне. Ґрунт дослідних ділянок – чорнозем глибокий середньосуглинковий на лесовидному суглинку.

Технологія вирощування кукурудзи загальноприйнята для зони Лісостепу, крім способів, які були поставлені на вивчення. Сівбу кукурудзи проводили у третій декаді квітня за температури ґрунту на глибині загортання насіння 8–10 °С. Мінеральні добрива (нітроамофоска) вносили восени, решту азотних добрив (аміачна селітра) – перед сівбою. Добрива Нутрівант, Атланте та Ікар вносили у позакореневе підживлення у відповідні фази кукурудзи з витратою робочого розчину 250 л/га.

Урожайність основної та побічної продукції кукурудзи проводили прямим

комбайнуванням поділяючно, з подальшим перерахунком маси зерна на 1 га.

Розрахунок виходу пелет (Р_{ВП}) проводили за рівнянням запропонованим Г. А. Голубом та ін. [2]:

$$P_{ВП} = \frac{B_{ПП} * Q_n}{25,31},$$

де В_{ПП} – вихід побічної продукції кукурудзи, т/га;

Q_н – нижча теплотворна здатність продукції, МДж/кг;

25,31 – теплотворна здатність 1 кг умовного палива, МДж/кг.

Енергетичну ефективність визначали за виходом енергії з урожаєм зерна та з паливних пелет, витратами енергії на вирощування кукурудзи та виробництво паливних пелет, коефіцієнтом енергетичної ефективності (К_{ее}) [10].

Результати та обговорення. За результатами проведених розрахунків встановлено, що при вирощуванні кукурудзи на зерно, в структурі енергетичних витрат, найбільшу частку складають мінеральні добрива (48,2 %), пальне (18,3 %) та технічні засоби (17,0 %). Частка мікродобрив і регуляторів росту рослин становить 3,1 % (рис. 1).



Рис. 1. Структура енергетичних витрат при вирощуванні кукурудзи на зерно

Найвища урожайність зерна кукурудзи отримана на варіанті із застосуванням N₉₀P₇₀K₇₀ у поєднанні із

позакореневим підживленням Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га) – 9,41 т/га, що на 2,02 т/га вище за

контроль (табл. 1). На варіантах із внесенням $N_{50}P_{30}K_{30}$ і $N_{70}P_{50}K_{50}$ урожайність зерна кукурудзи становила 8,80 і 9,08 т/га. Використання мінеральних добрив $N_{50}P_{30}K_{30}$ дозволило підвищити урожайність зерна кукурудзи на 0,87 т/га, або 11,3 %, $N_{70}P_{50}K_{50}$ і $N_{90}P_{70}K_{70}$ на 1,17 і 1,45 т/га, або 15,2 і 18,8 % порівняно з контролем.

Встановлено, що витрати сукупної енергії при вирощуванні кукурудзи на зерно на варіанті без мінеральних добрив були в межах 42,38–43,21 ГДж/га і підвищувалися до 43,67–46,70 ГДж/га на варіантах з їх внесенням. Відмічено збільшення виходу загальної енергії з урожаєм та коефіцієнта енергетичної ефективності при використанні $N_{50}P_{30}K_{30}$ – на

13,97–15,37 ГДж/га і 0,23–0,26, $N_{70}P_{50}K_{50}$ – на 18,70–19,35 ГДж/га і 0,25–0,27 та $N_{90}P_{70}K_{70}$ – на – 22,93–25,35 ГДж/га і 0,27–0,32, порівняно з контролем.

Проведення позакореневого підживлення мікродобривом Нутривант Універсальний (2 кг/га) забезпечувало підвищення виходу загальної енергії з урожаєм та коефіцієнта енергетичної ефективності на 4,44–5,08 ГДж/га і 0,08–0,10; Нутривант плюс Зерновий (2 кг/га) + Атланте (0,5 л/га) – на 5,17–5,82 ГДж/га і 0,07–0,09; Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га) – на 7,92–9,72 ГДж/га і 0,12–1,15, порівняно з контролем.

1. Енергетична ефективність вирощування кукурудзи на зерно (середнє за 2022–2024 рр.)

Мінеральні добрива	Мікродобрива та регулятори росту рослин*	Урожайність зерна, т/га	Вихід загальної енергії з урожаєм, ГДж/га	Витрати сукупної енергії на вирощування, ГДж/га	Коефіцієнт енергетичної ефективності, K_{ee}
Без добрив	1	7,39	121,99	42,38	2,88
	2	7,70	127,07	42,70	2,98
	3	7,74	127,68	42,97	2,97
	4	7,87	129,91	43,21	3,01
$N_{50}P_{30}K_{30}$	1	8,24	135,96	43,67	3,11
	2	8,54	140,98	43,91	3,21
	3	8,59	141,78	44,23	3,21
	4	8,80	145,27	44,54	3,26
$N_{70}P_{50}K_{50}$	1	8,57	141,34	44,88	3,15
	2	8,84	145,78	45,16	3,23
	3	8,88	146,51	45,48	3,22
	4	9,08	149,75	45,74	3,27
$N_{90}P_{70}K_{70}$	1	8,82	145,54	45,91	3,17
	2	9,09	150,00	46,21	3,25
	3	9,16	151,06	46,46	3,25
	4	9,41	155,26	46,70	3,32

Примітка. *Тут і в наступних таблицях. 1 – Без застосування; 2 – Нутривант Універсальний (2 кг/га); 3 – Нутривант плюс Зерновий (2 кг/га) + Атланте (0,5 л/га); 4 – Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га).

Максимальні значення коефіцієнта енергетичної ефективності отримано на варіанті із внесенням мінеральних добрив $N_{90}P_{70}K_{70}$ та препаратів Ікар Біго Рутс

(0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га) – 3,32.

Згідно з проведеними нами розрахунків встановлено, що в енергетичних витратах у виробництві

паливних пелет з побічної продукції кукурудзи найбільшу частку займає електрична енергія – 46,4 % та витрати на перероблення сировини – 31,4 % (рис. 2).

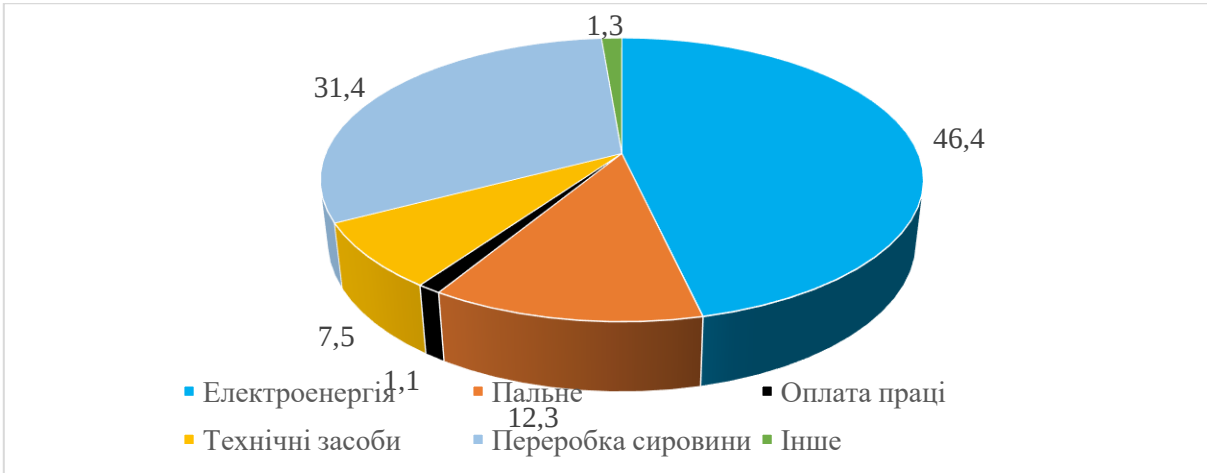


Рис. 2. Структура енергетичних витрат при виробництві паливних пелет з побічної продукції кукурудзи

Згідно з отриманими даними найвищий вихід побічної продукції кукурудзи та пелет отримано на варіанті N₉₀P₇₀K₇₀ у поєднанні із позакореневим підживленням Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га) – 11,61 і 6,66 т/га (табл. 2).

2. Енергетична ефективність виробництва паливних пелет з побічної продукції кукурудзи (середнє за 2022–2024 рр.)

Мінеральні добрива	Мікро-добрива та регулятори росту рослин	Вихід побічної продукції для виробництва пелет, т/га	Розрахунковий вихід паливних пелет, т/га	Вихід енергії з пелет, ГДж/га	Витрати енергії на виробництво пелет, ГДж/га	Коефіцієнт енергетичної ефективності, К _{ее}
Без добрив	1	8,59	4,93	124,76	23,54	5,30
	2	9,12	5,23	132,40	23,61	5,61
	3	9,24	5,30	134,11	23,63	5,68
	4	9,42	5,40	136,75	23,72	5,77
N ₅₀ P ₃₀ K ₃₀	1	10,10	5,79	146,58	24,12	6,08
	2	10,45	6,00	151,80	24,23	6,27
	3	10,52	6,04	152,79	24,27	6,30
	4	10,84	6,22	157,35	24,38	6,45
N ₇₀ P ₅₀ K ₅₀	1	10,06	5,77	146,02	24,56	5,95
	2	10,73	6,16	155,83	24,63	6,33
	3	10,85	6,23	157,57	24,69	6,38
	4	11,17	6,41	162,20	24,76	6,55
N ₉₀ P ₇₀ K ₇₀	1	10,44	5,99	151,61	25,21	6,01
	2	11,13	6,39	161,65	25,30	6,39
	3	11,22	6,44	162,96	25,38	6,42
	4	11,61	6,66	168,59	25,46	6,62

Застосування Нутривант
Універсальний (2 кг/га) збільшувало вихід паливних пелет на 3,6–6,6 %, Нутривант плюс зерновий (2 кг/га) + Атланте (0,5 л/га) – 4,2–7,9 %, Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га) – 7,3–11,2 %, порівняно з контролем.

При розрахунку виробництва паливних пелет з побічної продукції кукурудзи враховано, що частина побічної продукції кукурудзи (20–25 %) залишається на полі. Розрахунковий вихід паливних пелет з побічної продукції кукурудзи в досліді 1 був в межах 4,93–6,66 т/га, або в середньому 0,57 т на 1 т побічної продукції кукурудзи.

Витрати енергії на виробництво паливних пелет на варіанті без мінеральних добрив були в межах 23,54–23,72 ГДж/га, а при їх застосуванні зростали до 24,12–25,46 ГДж/га. Це пояснюється збільшенням урожайності побічної продукції при використанні мінеральних добрив та відповідно збільшенням витрат енергії на пелетування цієї додаткової біомаси.

Відмічено підвищення коефіцієнта енергетичної ефективності при виробництві паливних пелет з побічної продукції кукурудзи до 5,30–6,62, порівняно з 2,88–3,32 при вирощуванні для отримання лише зерна.

Використання мінеральних добрив у технології вирощування кукурудзи дозволило підвищити коефіцієнт енергетичної ефективності на 0,62–0,86, а мікродобрив – на 0,22–0,61, порівняно з контрольними варіантами.

Висновки. Встановлено, що максимальна урожайність зерна кукурудзи отримана на варіанті $N_{90}P_{70}K_{70}$ у поєднанні із позакореневим підживленням Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) у фазі 3–4 листків кукурудзи

(ВВСН 13-14) + Ікар Фосто (0,5 л/га) у фазі 4–5 листків кукурудзи (ВВСН 15-16) + Ікар Зінто (0,5 л/га) у фазі 7–8 листків кукурудзи (ВВСН 17-18) – 9,41 т/га, що на 2,02 т/га більше, порівняно із контролем. На варіантах із використанням $N_{50}P_{30}K_{30}$ і $N_{70}P_{50}K_{50}$ урожайність зерна кукурудзи складала 8,80 і 9,08 т/га. Застосування мінеральних добрив дозволяє підвищити урожайність зерна на 11,3–18,8 %, а мікродобрив на 3,5–6,5 %, відповідно.

При застосуванні мінеральних добрив зростає вихід паливних пелет на 13,9–23,3 %, а мікродобрив на 3,6–11,2 %, порівняно з варіантами без їх використання. Найвищий розрахунковий вихід паливних пелет отримано при використанні мінеральних добрив $N_{90}P_{70}K_{70}$ у поєднанні із позакореневим підживленням Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га) – 6,66 т/га.

В структурі енергетичних витрат при вирощуванні кукурудзи на зерно найбільшу частку займають мінеральні добрива (48,2 %), пальне (18,3 %) та технічні засоби (17,0 %), а в структурі витрат для виробництва паливних пелет з побічної продукції кукурудзи – електрична енергія – 46,4 % та витрати на перероблення сировини – 31,4 %.

Максимальні значення коефіцієнта енергетичної ефективності при вирощуванні кукурудзи на зерно та при виробництві паливних пелет з побічної продукції кукурудзи отримано при внесенні мінеральних добрив $N_{90}P_{70}K_{70}$ та препаратів Ікар Біго Рутс (0,5 л/га) + Ікар Фосто (0,5 л/га) + Ікар Зінто (0,5 л/га) – 3,32 і 6,62. Використання мінеральних добрив у технології вирощування кукурудзи дозволило підвищити коефіцієнт енергетичної ефективності на 0,62–0,86, а мікродобрив – на 0,22–0,61, порівняно з контрольними варіантами.

Список використаної літератури

1. Білодід В. Д., Панасенко П. В. Деякі розрахунки щодо енергетичної ефективності біопалив. *System Research in Energy*. 2008. № 2 (18). С. 34–39.

References

1. Bilodid V. D., Panasenko P. V. Some calculations regarding the energy efficiency of biofuels. *System Research in Energy*. 2008. No. 2 (18). P. 34–39.
2. Bioenergy systems in agricultural production / H. A. Holub et al. Kyiv : NUBiP Ukraine, 2016. 226 p.

2. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві / Г. А. Голуб та ін. Київ : НУБіП України, 2016. 226 с.
3. Боярчук В., Фтома О., Боярчук О. Економічна та енергетична ефективність виробництва ріпаку озимого, пшениці озимої, кукурудзи, цукрового буряку та біопалива на їх основі. *Аграрна економіка*. 2012. Т. 5. № 1–2. С. 102–110.
4. Гелетука Г. Г., Желєзна Т. А. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. *Аналітична записка БАУ*. № 7. 2014. 31 с. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2014/02/position-paper-uabio-7-ukr-draft.pdf>.
5. Гелетука Г. Г., Желєзна Т. А., Драгнев С. В. Аналіз можливостей виробництва та використання брикетів з агробіомаси в Україні. *Аналітична записка БАУ* № 20. 2018. 48 с.
6. Грабовський М. Б., Степаненко М. В. Вихід біоетанолу та енергії у гібридів кукурудзи різних груп стиглості. Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «*Селекція агрокультур в умовах змін клімату: напрями та пріоритети*» (30 верес. 2022 р., м. Одеса). Одеса. С. 188–190.
7. Енергетична ефективність вирощування гібридів кукурудзи для виробництва біогазу за використання макро- і мікродобрив / М. Б. Грабовський та ін. *Зернові культури*. 2022. Том 6. № 1. С. 100–107. <https://journal-grain-crops.com/arhiv/view/63076c28cd0f0.pdf>.
8. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси / Г. Гелетука та ін. Київ : ТОВ «Науково-технічний центр «Біомаса», 2016. 336 с. https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/kompleksnii_analiz_ukrayins_kogo_rinku_pelet_z_biomasi.pdf.
9. Крестянінов Є. В., Єрмакова Л. М., Антал Т. В. Економічна та енергетична ефективність вирощування кукурудзи залежно від мінеральних добрив та позакореневого підживлення посівів. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2020. № 5 (87). https://scireports.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Vol1.%2087.%20No.%205.%202020.pdf.
10. Медведовський О. К., Іваненко П. І. Енергетичний аналіз інтенсивних технологій в сільськогосподарському виробництві. Київ : Урожай, 1988. 206 с.
11. Новітні технології біоенергоконверсії : монографія / Я. Б. Блюм та ін. Київ : «Аграр Медіа Груп», 2010. 326 с.
12. Степаненко М. В., Грабовський М. Б. Вплив способів сівби на формування маси 1000 зерен у гібридів кукурудзи. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 159–165. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.21>.
13. Balat M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Convers. Manag.* 2011. Vol. 52. Issue 2. P. 858–875. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>.
14. Comparative energy, economic, and environmental analyses of forage production systems for dairy farming / H. Fathollahi et al. *J. Clean. Prod.* 2018. Vol. 182. P. 852–862. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.073>.
3. Boiarchuk V., Ftoma O., Boiarchuk O. Economic and energy efficiency of the production of winter rapeseed, winter wheat, corn, sugar beet and biofuels based on them. *Ahrarna ekonomika*. 2012. Vol. 5. No. 1–2. P. 102–110.
4. Heletukha H. H., Zheliezna T. A. Prospects for using agricultural waste for energy production in Ukraine. *Analitichna zapyska BAU*. No. 7. 2014. 31 p. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2014/02/position-paper-uabio-7-ukr-draft.pdf>.
5. Heletukha H. H., Zheliezna T. A., Drahnev S. V. Analysis of the possibilities of production and use of briquettes from agrobiomass in Ukraine. *Analitichna zapyska BAU*. No. 20. 2018. 48 p.
6. Hrabovskyi M. B., Stepanenko M. V. Bioethanol and energy yield in corn hybrids of different maturity groups. Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «*Selektsiia ahrokultur v umovakh zmin klimatu: napriamy ta priorytety*» (30 veres. 2022 r., m. Odesa). Odesa. P. 188–190.
7. Energy efficiency of growing corn hybrids for biogas production using macro- and microfertilizers / M. B. Hrabovskyi et al. *Zernovi kultury*. 2022. Vol. 6. No. 1. P. 100–107. <https://journal-grain-crops.com/arhiv/view/63076c28cd0f0.pdf>.
8. Comprehensive analysis of the Ukrainian biomass pellet market / H. Heletukha et al. Kyiv : TOV «Naukovo-tekhnichnyi tsentr “Biomasa», 2016. 336 p. https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/kompleksnii_analiz_ukrayins_kogo_rinku_pelet_z_biomasi.pdf.
9. Krestianinov Ye. V., Yermakova L. M., Antal T. V. Economic and energy efficiency of corn cultivation depending on mineral fertilizers and foliar fertilization of crops. *Naukovi dopovidi Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy*. 2020. No. 5 (87). https://scireports.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Vol.%2087.%20No.%205.%202020.pdf.
10. Medvedovskyi O. K., Ivanenko P. I. Energy analysis of intensive technologies in agricultural production. Kyiv : Urozhai, 1988. 206 p.
11. The latest technologies of bioenergy conversion: monograph / Ya. B. Blum et al. Kyiv : “Ahrar Media Hrup”, 2010. 326 p.
12. Stepanenko M. V., Hrabovskyi M. B. The influence of sowing methods on the formation of 1000-grain weight in corn hybrids. *Tavriyskyi naukovyi visnyk*. 2023. No. 133. P. 159–165. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.21>.
13. Balat M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Convers. Manag.* 2011. Vol. 52. Issue 2. P. 858–875. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>.
14. Comparative energy, economic, and environmental analyses of forage production systems for dairy farming / H. Fathollahi et al. *J. Clean. Prod.* 2018. Vol. 182. P. 852–862. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.073>.

- A review. *Energy Convers. Manag.* 2011. Vol. 52. Issue 2. P. 858–875. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>.
14. Comparative energy, economic, and environmental analyses of forage production systems for dairy farming / H. Fathollahi et al. *J. Clean. Prod.* 2018. Vol. 182. P. 852–862. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.073>.
15. Determining efficiency of energy input for silage corn production: An econometric approach / E. Houshyar et al. *Energy*. 2015. No. 93. P. 2166–2174. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.105>.
16. Economic and energy efficiency of primary tillage and fertilisation systems in five-field crop rotation of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine / I. Prymak et al. *Scientific Papers. Series "Management, Economic Engineering in Agriculture and rural development"*. 2024. Vol. 24. Issue 3. P. 717–726. https://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol.24_3/Art77.pdf.
17. Economic and energy efficiency of the use of biologized agrotechnologies for corn cultivation / Y. Hadzalo et al. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture & Rural Development*. 2023. Vol. 23. Issue 4. P. 375–382. https://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol.23_4/Art36.pdf.
18. Emission saving opportunities for corn cultivation for ethanol in Poland / E. Krasuska et al. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. Vol. 11 (3 & 4): 2050–2053. https://www.researchgate.net/publication/259203354_Emission_saving_opportunities_for_corn_cultivation_for_ethanol_in_Poland.
19. Energy balance, costs and CO₂ analysis of tillage technologies in maize cultivation / E. Šarauski et al. *Energy*. 2014. No. 69. P. 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.090>.
20. Energy efficiency of maize production technology: Evidence from Polish farms / A. Konieczna et al. *Energies*. 2020. No. 14 (1). 170. <https://doi.org/10.3390/en14010170>.
21. Green mass to biogas in Ukraine – bioenergy potential of corn and sweet sorghum / M. Grabovskyi et al. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. No. 13. P. 3309–3317. https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01316-0?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article.
22. Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment international*. 2004. Vol. 30. Issue 7. P. 981–990. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005>.
23. Mousavi-Avval S. H., Rafiee S., Mohammadi A. Optimization of energy consumption and input costs for apple production in Iran using data envelopment analysis. *Energy*. 2011. № 36 (2). P. 909–916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.020>.
24. Roman K.K., Konieczna A. Evaluation of a different fertilisation in technology of corn for silage, 15. Determining efficiency of energy input for silage corn production: An econometric approach / E. Houshyar et al. *Energy*. 2015. No. 93. P. 2166–2174. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.105>.
16. Economic and energy efficiency of primary tillage and fertilisation systems in five-field crop rotation of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine / I. Prymak et al. *Scientific Papers. Series "Management, Economic Engineering in Agriculture and rural development"*. 2024. Vol. 24. Issue 3. P. 717–726. https://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol.24_3/Art77.pdf.
17. Economic and energy efficiency of the use of biologized agrotechnologies for corn cultivation / Y. Hadzalo et al. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture & Rural Development*. 2023. Vol. 23. Issue 4. P. 375–382. https://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol.23_4/Art36.pdf.
18. Emission saving opportunities for corn cultivation for ethanol in Poland / E. Krasuska et al. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. Vol. 11 (3 & 4): 2050–2053. https://www.researchgate.net/publication/259203354_Emission_saving_opportunities_for_corn_cultivation_for_ethanol_in_Poland.
19. Energy balance, costs and CO₂ analysis of tillage technologies in maize cultivation / E. Šarauski et al. *Energy*. 2014. No. 69. P. 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.090>.
20. Energy efficiency of maize production technology: Evidence from Polish farms / A. Konieczna et al. *Energies*. 2020. No. 14 (1). 170. <https://doi.org/10.3390/en14010170>.
21. Green mass to biogas in Ukraine – bioenergy potential of corn and sweet sorghum / M. Grabovskyi et al. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. No. 13. P. 3309–3317. https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01316-0?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article.
22. Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment international*. 2004. Vol. 30. Issue 7. P. 981–990. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005>.
23. Mousavi-Avval S. H., Rafiee S., Mohammadi A. Optimization of energy consumption and input costs for apple production in Iran using data envelopment analysis. *Energy*. 2011. No. 36 (2). P. 909–916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.020>.
24. Roman K.K., Konieczna A. Evaluation of a different fertilisation in technology of corn for silage, 25. Shynkaruk L., Lykhochvor V. Influence of fertilization and foliar feeding on maize grain qualitative indicators. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 113–116.

sugar beet and meadow grasses production and their impact on the environment in Poland. *Afr. J. Agric. Res.* 2015. Vol. 10. No. 12. P. 1351–1358. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9574>.

25. Shynkaruk L., Lykhochvor V. Influence of fertilization and foliar feeding on maize grain qualitative indicators. *Ukrainian Journal of Ecology.* 2021. Vol. 11. No. 6. P. 113–116. <https://www.ujecology.com/articles/influence-of-fertilization-and-foliar-feeding-on-maize-grain-qualitative-indicators.pdf>.

26. Tokarchuk D., Pryshliak N., Palamarenko Y. Methodology for calculating the economic efficiency of waste use for the production of biofuels in comparison with their traditional use. *Slovak international scientific journal.* 2020. No. 47. Vol. 3. P. 24–34. <https://sis-journal.com/wp-content/uploads/2020/12/Slovak-international-scientific-journal-%E2%84%9647-2020-VOL.3.pdf>.

27. Wang X., Shen J., Zhang W. Emergy evaluation of agricultural sustainability of Northwest China before and after the grain-for-green policy. *Energy Policy.* 2014. Vol. 67. P. 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.060>.

<https://www.ujecology.com/articles/influence-of-fertilization-and-foliar-feeding-on-maize-grain-qualitative-indicators.pdf>.

26. Tokarchuk D., Pryshliak N., Palamarenko Y. Methodology for calculating the economic efficiency of waste use for the production of biofuels in comparison with their traditional use. *Slovak international scientific journal.* 2020. No. 47. Vol. 3. P. 24–34. <https://sis-journal.com/wp-content/uploads/2020/12/Slovak-international-scientific-journal-%E2%84%9647-2020-VOL.3.pdf>.

27. Wang X., Shen J., Zhang W. Emergy evaluation of agricultural sustainability of Northwest China before and after the grain-for-green policy. *Energy Policy.* 2014. Vol. 67. P. 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.060>.