

УДК 633.15:631.53.027

Структура енергетичних витрат за вирощування кукурудзи в моно- та бінарних посівах: комплексний аналіз

 В. А. Мокрієнко

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, *e-mail: mokrienko@ukr.net

Мета. Оцінити енергетичну ефективність вирощування кукурудзи в монокультурі та бінарних посівах із соєю за різних рівнів мінерального удобрення в умовах Лісостепу України. **Методи.** Дослідження проводили у 2021–2024 рр. у стаціонарному польовому досліді кафедри рослинництва ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» (Київська обл.). Порівнювали монокультурні та бінарні посіви кукурудзи і сої за трьох систем удобрення: без добрив, $N_{60}P_{45}K_{45}$ та $N_{90}P_{60}K_{60}$. Енергетичну ефективність оцінювали за виходом енергії з урожаєм, питомими енерговитратами, коефіцієнтом енергетичної ефективності (*K_{ee}*) та інтегральним індексом сталості. **Результати.** Установлено, що енергетичний профіль монокультури кукурудзи характеризується високою часткою витрат пального та експлуатації техніки (разом понад 70 %), які істотно зростають за інтенсифікації удобрення. Підвищення норм мінеральних добрив збільшувало вихід енергії з урожаєм кукурудзи на 43,3 %, однак супроводжувалося зростанням питомих енерговитрат на 25,2 % і зниженням *K_{ee}* з 4,94 до 3,95. Монокультура сої виявилася енергетично вразливою за високих норм удобрення: *K_{ee}* знижувався до 2,07–2,17, а питомі витрати зростали до 8147–8529 МДж/т. Бінарні посіви кукурудзи з соєю забезпечували синергетичний ефект: сумарні енерговитрати були на 9,6–16,4 % нижчими порівняно з монокультурою кукурудзи, тоді як вихід енергії зростав на 35–42 %. Коефіцієнт енергетичної ефективності бінарних систем досягав 8,17–8,34 на контролі та 6,16–6,21 за інтенсивного удобрення, що у 1,6–4,7 рази перевищувало показники монокультур. Виявлено зниження вуглецевого сліду бінарних посівів на 10,7–15,6 % та зростання інтегрального індексу сталості у 2,8–4,4 рази. **Висновки.** Бінарні посіви кукурудзи з соєю мають суттєву енергетичну та екологічну перевагу над монокультурами. Оптимальним з енергетичного погляду є помірний рівень удобрення ($N_{60}P_{45}K_{45}$), тоді як надмірна інтенсифікація, особливо для сої, є енергетично та економічно недоцільною.

Ключові слова: кукурудза; соя; бінарні посіви; енергетична ефективність; питомі енерговитрати; коефіцієнт енергетичної ефективності; вуглецевий слід; сталий розвиток.

Вступ

Оцінюючи ефективність вирощування кукурудзи, доцільно враховувати не лише агрономічні показники, а й енергетичний складник виробництва, орієнтуючись на впровадження ресурсо- та енергоощадних технологій. Сучасний соціально-економічний розвиток супроводжується сталим зростанням споживання енергії, у зв'язку з чим для формування високих урожаїв широко застосовують мінеральні добрива, пестициди, сучасну сільськогосподарську техніку та інші енергоємні ресурси [1, 2].

Енергетичні ресурси відіграють визначальну роль у виробництві сільськогосподарської продукції, проте їх висока вартість істотно впливає на собівартість вирощування культур. У цьому контексті раціональне використання енергії є необхідною умовою ефективного функціонування агровиробництва, а енергетичний баланс агроєкосистеми визначається структурою агротехнологій, рівнем застосування добрив і системами захисту рослин [3, 4].

Як цитувати: Мокрієнко В. А. Структура енергетичних витрат за вирощування кукурудзи в моно- та бінарних посівах: комплексний аналіз. *Новітні агротехнології*. 2025. Т. 13, № 3. <https://doi.org/10.47414/na.13.3.2025.347482>



© The Author(s) 2025. Published by Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. This is an open access article distributed under the terms of the license CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

За даними наукових досліджень, традиційні технології вирощування характеризуються значними енергетичними витратами, зумовленими передусім використанням азотних добрив. Зокрема встановлено, що у технологіях вирощування кукурудзи витрати пального та мінеральних добрив формують понад 75 % загальних енергетичних витрат [5–7].

Енергетичний аналіз агротехнологій є базовим інструментом оцінювання їх екологічної та економічної ефективності в контексті сталого розвитку аграрного виробництва. Структура енергетичних витрат відображає не лише рівень технологічної досконалості системи землеробства, а й ступінь її відповідності принципам ресурсозбереження та зниження антропогенного навантаження на довкілля. Особливої актуальності набуває порівняльний аналіз енергоємності монокультурних і бінарних посівів як альтернативних стратегій інтенсифікації рослинництва в умовах сучасних глобальних енергетичних викликів [8, 9].

Мета досліджень – оцінити енергетичну ефективність вирощування кукурудзи в монокультурі та бінарних посівах із соєю за різних рівнів мінерального удобрення в умовах Лісостепу України.

Матеріали та методика досліджень

Дослідження проводили протягом 2021–2024 рр. у стаціонарному досліді кафедри рослинництва ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» (с. Пшеничне, Васильківський р-н, Київська обл.) у зоні Лісостепу України. Ґрунт дослідного поля – чорнозем типовий малогумусний, середньосуглинковий за механічним складом, сформований на лесових відкладеннях. Вміст гумусу в орному шарі становив 3,5 % (за Тюрнімом), забезпеченість елементами мінерального живлення – середня. Потужність гумусового горизонту – 25–30 см.

Схема сівби та норми висіву насіння культур відповідали проекту досліду (табл. 1). У одновидових посівах норма висіву культиварів сої та кукурудзи відповідала зональним рекомендаціям оригінатора. У сумісних посівах норма висіву насіння сої була зменшена на 50 %. Глибина загортання насіння кукурудзи становила 4–5 см, сої – 2–3 см.

Таблиця 1

Схема досліду: Фактор А – одновидові та сумісні посіви

Культура	Гібрид, сорти	ФАО / СНУ	Норма висіву насіння, тис. шт./га
Кукурудза	‘РЖТ Занетікс’	ФАО 340	70
Соя	‘Сірелія’	СНУ 2300	450
	‘РЖТ Сакуза’	СНУ 2600	450
Кукурудза + соя	‘РЖТ Занетікс’ + ‘Сірелія’		70 + 225
	‘РЖТ Занетікс’ + ‘РЖТ Сакуза’		70 + 225

Фактор В – удобрення, кг/га діючої речовини (д. р.):

1. Без добрив – контроль;
2. N₆₀P₄₅K₄₅;
3. N₉₀P₆₀K₆₀.

Енергетичні витрати оцінювали за шістьма основними компонентами: енерговитрати на експлуатацію тракторів та сільськогосподарських машин, енергоємність добрив і пестицидів, прями витрати пального, енергетичний еквівалент насінневого матеріалу та затрати живої праці, виражені в енергетичних одиницях (МДж) [11, 12]. Дослідження охоплювали весь спектр технологічних варіантів – від екстенсивного вирощування без внесення добрив до інтенсивних систем із високими нормами мінерального живлення.

Енергетична ефективність агросистем оцінювалася за трьома ключовими показниками: вихід енергії з урожаєм (МДж/га), питомі енерговитрати на формування одиниці продукції (МДж/т) та коефіцієнт енергетичної ефективності (*Кее*), який визначався як відношення енергії врожаю до сукупних антропогенних енерговитрат.

На основі отриманих енергетичних показників розраховувався інтегральний індекс сталості (ІС), що враховує продуктивність, ефективність та стабільність системи:

$$ІС = \frac{\text{Вихід енергії} \times \text{Кее}}{\text{Питомі витрати} \times \text{CV}}$$

де CV – коефіцієнт варіації врожайності.

Результати досліджень

Енергетичний профіль монокультури кукурудзи характеризувався домінуванням прямих витрат пального, які на контролі без добрив становили 7847 МДж/га, що відповідало 38,5 % від загальних енерговитрат (20 394 МДж/га). Другою за значимістю статтею були витрати на експлуатацію техніки – 6460 МДж/га (31,7 %), які разом із паливом формували 70,2 % енергетичного балансу технології (табл. 2).

Застосування мінеральних добрив суттєво змінювало енергетичну структуру. За системи N₆₀P₄₅K₄₅ загальні енерговитрати зросли до 32 428 МДж/га, при цьому частка добрив становила 19,9 % (6449 МДж/га). Інтенсивне удобрення N₉₀P₆₀K₆₀ підвищувало загальні витрати до 37 628 МДж/га, із часткою добрив 24,9 % (9366 МДж/га). При цьому абсолютні витрати пального також збільшувалися до 9613 та 10 400 МДж/га відповідно, що свідчить про зростання кількості технологічних операцій за інтенсифікації вирощування.

Таблиця 2

Структура витрат енергії на вирощування кукурудзи в моно- та бінарних посівах, МДж

Монокультура / бінарні посіви	Система удобрення	Структура витрат, МДж					
		трактори і с.-г. маш.	добрива	пестициди	пальне	насіння	затрати праці
'РЖТ Занетіккс'	Контроль без добрив	6460	0	1648	7847	352	4687
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8351	6449	1648	9613	352	6058
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	9193	9366	1648	10400	352	6669
'Сірелія'	Контроль без добрив	1335	0	1648	2067	1592	1456
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	1979	6449	1648	2431	1592	2158
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1657	9366	1648	2249	1592	1807
'РЖТ Сакуза'	Контроль без добрив	1520	0	1648	2171	1592	1658
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	2068	6449	1648	2481	1592	2256
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	1573	9366	1648	2202	1592	1716
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	5802	0	1342	3448	352	4209
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	7753	5196	1328	4351	352	5625
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	9176	7868	1384	5047	352	6657
'РЖТ 'Занетіккс' + 'Сірелія' (лише соя)	Контроль без добрив	301	0	306	308	796	218
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	451	1253	320	387	796	327
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	332	1498	263	300	796	241
'РЖТ Занетіккс' + Сірелія' (сумарно)	Контроль без добрив	6103	0	1648	3757	1148	4427
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8204	6449	1648	4738	1148	5952
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	9508	9366	1648	5347	1148	6898
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	5780	0	1326	3429	352	4193
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	7827	5159	1318	4381	352	5678
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	9132	7799	1372	5020	352	6625
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише соя)	Контроль без добрив	342	0	322	337	796	248
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	489	1290	330	410	796	355
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	369	1567	276	324	796	268
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (сумарно)	Контроль без добрив	6122	0	1648	3766	1148	4441
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	8317	6449	1648	4791	1148	6033
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	9501	9366	1648	5344	1148	6892

Енергоємність насінневого матеріалу залишалася стабільною – 352 МДж/га, що становило лише 1,7 % на контролі та знижувалося до 0,9 % за максимального удобрення через збільшення загальних енергетичних витрат. Затрати живої праці демонстрували позитивну кореляцію з рівнем інтенсифікації: від 4687 МДж/га на контролі до 6669 МДж/га у разі внесення N₉₀P₆₀K₆₀, що відображає деяке підвищення трудомісткості інтенсивних технологій.

Енергетичний профіль сої суттєво відрізнявся від кукурудзи значно нижчими абсолютними показниками та іншою структурою розподілу. Загальні енерговитрати на контролі становили 8098 МДж/га для 'Сірелія' та 8589 МДж/га для 'РЖТ Сакуза', що в 2,4–2,5 раза нижче, ніж у кукурудзи.

Найбільшу частку в структурі енерговитрат сої на контролі займали прямі витрати пального (25,5 % для 'Сірелія') та пестициди (20,4 %), що відображає специфіку технології з інтенсивним хімічним захистом за відносно низької енергоємності механічних обробітків. Енергетичний еквівалент насіння сої був значно вищим – 1592 МДж/га, що становило 19,7 % загальних витрат на контролі.

Особливістю інтенсивної системи вирощування сої виявилось зниження витрат на техніку та пальне: для сорту 'Сірелія' ці показники змінювалися з 1335 до 1657 МДж/га та з 2067 до 2249 МДж/га відповідно в разі переходу від контролю до $N_{90}P_{60}K_{60}$. Це може пояснюватися оптимізацією технологічних операцій та підвищенням їх ефективності в умовах комплексного застосування мінеральних добрив.

Енергетичні витрати в бінарних посівах демонстрували нерівномірний розподіл між культурами-компонентами. У системі 'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' на кукурудзу припадало 15 153 МДж/га на контролі (88,6 % сумарних витрат), тоді як на сою – лише 1929 МДж/га (11,4 %). Така диспропорція зберігалася на всіх рівнях удобрення, хоча абсолютна різниця дещо зменшувалася.

Структура енерговитрат кукурудзи в бінарних посівах характеризувалася зниженням витрат на техніку (5802 МДж/га проти 6460 МДж/га у монокультурі) та пальне (3448 МДж/га проти 7847 МДж/га). Таке суттєве зниження витрат пального на 56,1 % свідчить про синергетичний ефект сумісного вирощування та оптимізацію технологічних операцій.

Соевий компонент бінарних посівів мав специфічну енергетичну структуру з мінімальними витратами на всі компоненти, крім насіння. Витрати на техніку становили лише 301–369 МДж/га, пальне – 300–387 МДж/га, що в 6–7 разів менше, ніж у монокультурі сої. Це пояснюється використанням спільних технологічних операцій для обох культур.

Сумарні енерговитрати бінарних посівів на контролі становили 17 082–17 125 МДж/га, що на 16,2–16,4 % нижче показників монокультури кукурудзи, незважаючи на додаткове вирощування сої. У разі застосування мінеральних добрив енергетична ефективність бінарних систем зберігалася: у системі $N_{60}P_{45}K_{45}$ загальні витрати становили 30 139–30 353 МДж/га (на 7,0–6,4 % нижче монокультури кукурудзи), а $N_{90}P_{60}K_{60}$ – 33 915–33 999 МДж/га (на 9,8–9,6 % нижче).

Структура енерговитрат бінарних посівів демонструвала оптимальний баланс. На контролі частка техніки становила 35,7 %, пального – 22,0 %, затрат праці – 25,9 %. За інтенсивного удобрення структура змінювалася: добрива – 27,6 %, техніка – 28,0 %, затрати праці – 20,3 %, пальне – 15,7 %, що свідчить про більш рівномірний розподіл енергетичного навантаження.

Аналіз структури енерговитрат дав змогу визначити основні напрями енергозбереження. Найбільший потенціал економії пов'язаний зі зниженням витрат пального через впровадження технологій мінімального та нульового обробітку ґрунту. Потенційна економія може досягати 30–40 % від поточних витрат пального, що еквівалентно 2354–4160 МДж/га для монокультури кукурудзи. Оптимізація системи удобрення шляхом використання біологічного азоту, локального внесення добрив та застосування мікродобрив може знизити енергоємність мінерального живлення на 20–25 %. Для інтенсивних технологій це забезпечує економію 1873–2342 МДж/га.

Бінарні посіви реалізують природні механізми енергозбереження завдяки біологічній азотфіксації, алелопатичній взаємодії культур та оптимізації використання сонячної енергії. Енергетичний еквівалент біологічно фіксованого азоту в бінарних посівах оцінюється на рівні 2500–3500 МДж/га, що дає змогу частково компенсувати витрати, пов'язані із застосуванням мінеральних добрив.

Поліпшення фітосанітарного стану агроценозів у змішаних посівах сприяє зниженню енерговитрат на пестициди на 18–20 % (296–330 МДж/га). Додатковий енергетичний ефект формується також за рахунок зменшення витрат на протиерозійні заходи та підтримання родючості ґрунту.

Енергетичні витрати агротехнологій безпосередньо корелюють із рівнем викидів парникових газів. Монокультура кукурудзи за умов інтенсивного удобрення формує вуглецевий слід на рівні 2,8–3,2 т CO_2 /га, тоді як у бінарних посівах цей показник знижується до 2,5–2,7 т CO_2 /га. Скорочення вуглецевого сліду на 10,7–15,6 % у бінарних агроценозах має суттєве значення для пом'якшення наслідків кліматичних змін та підвищення екологічної сталості виробництва.

Додаткова секвестрація вуглецю в ґрунті за рахунок кореневих решток сої та поліпшення гумусового стану ґрунту оцінюється на рівні 0,4–0,6 т С/га на рік, що еквівалентно зв'язуванню 1,5–2,2 т CO_2 . Це дає змогу частково компенсувати емісії, пов'язані з виробничими процесами, та підсилює кліматорегулювальну функцію бінарних посівів.

У структурі собівартості продукції енергетичний складник становив 42–48 % для монокультури кукурудзи та 35–40 % для бінарних посівів. Зниження цієї частки через оптимізацію енерговитрат є ключовим чинником підвищення конкурентоспроможності продукції.

Монокультура кукурудзи (гібрид 'РЖТ Занетіккс', ФАО 340) характеризувалася високим виходом енергії з урожаєм, який зростав від 103 775 МДж/га на контролі без внесення добрив до 148 621 МДж/га за інтенсивного удобрення, що відповідало приросту на 43,3 %. Водночас інтенсифікація супроводжувалася непропорційним зростанням питомих енерговитрат: з 3560 МДж/т на контролі до 4456 МДж/т у разі застосування N₉₀P₆₀K₆₀, тобто на 25,2 % (табл. 3).

Таблиця 3

Енергетична ефективність вирощування кукурудзи в моно- та бінарних посівах, МДж

Монокультура / бінарні посіви	Система удобрення	Вихід енергії з урожаєм, МДж	Затрати на 1 т	<i>K_{ee}</i>
'РЖТ Занетіккс'	Контроль без добрив	103 775	3560	4,94
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	133 631	4276	4,12
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	148 621	4456	3,95
'Сірелія'	Контроль без добрив	31 950	4484	3,95
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	47 845	6010	2,94
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	39 775	8147	2,17
'РЖТ Сакуза'	Контроль без добрив	36 251	4191	4,22
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	49 761	5863	3,02
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	37 537	8529	2,07
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	113 635	2347	7,50
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	154 218	2808	6,27
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	175 848	3051	5,77
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (лише соя)	Контроль без добрив	25 949	1315	13,45
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	37 055	1687	10,49
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	32 967	1841	9,61
'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' (сумарно)	Контроль без добрив	139 583	2152	8,17
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	191 273	2586	6,80
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	208 815	2831	6,16
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише кукурудза)	Контроль без добрив	115 041	2307	7,63
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	157 884	2755	6,39
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	175 340	3041	5,79
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (лише соя)	Контроль без добрив	27 842	1299	13,62
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	38 976	1665	10,62
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	35 214	1808	9,78
'РЖТ Занетіккс' + 'РЖТ Сакуза' (сумарно)	Контроль без добрив	142 883	2104	8,34
	N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅	196 861	2571	6,94
	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	210 555	2806	6,21

Коефіцієнт енергетичної ефективності демонстрував негативну динаміку зі зростанням рівня інтенсифікації: його значення знижувалося з 4,94 на контролі до 3,95 за максимального удобрення, що відповідало падінню на 20,0 %. Це свідчить про досягнення межі ефективності інтенсифікації, після якої додаткові енерговитрати не компенсуються пропорційним приростом продуктивності. Оптимальним з енергетичного погляду виявився варіант помірної інтенсифікації (N₆₀P₄₅K₄₅) з *K_{ee}* 4,12, який забезпечував найбільш збалансоване співвідношення між виходом продукції та енерговитратами.

Енергетична продуктивність сої в монокультурі характеризувалася значно нижчими абсолютними показниками та нелінійною реакцією на рівень мінерального живлення. Сорт 'Сірелія' (CHU 2300) демонстрував зниження виходу енергії за умов інтенсивного удобрення: з 31 950 МДж/га на контролі до 39 775 МДж/га в разі застосування N₉₀P₆₀K₆₀, за наявності проміжного максимуму 47 845 МДж/га у варіанті N₆₀P₄₅K₄₅. Аналогічна нелінійна динаміка показників енергетичної продуктивності відмічалася і для сорту 'РЖТ Сакуза'.

Питомі енерговитрати сої зростали зі збільшенням рівня інтенсифікації. Для сорту 'Сірелія' цей показник підвищувався з 4484 МДж/т на контролі до 8147 МДж/т за умов застосування $N_{90}P_{60}K_{60}$, що відповідало зростанню на 81,7 %. Унаслідок цього коефіцієнт енергетичної ефективності знижувався з 3,95 до 2,17, тобто на 45,1 %.

Сорт 'РЖТ Сакуза' характеризувався дещо кращими показниками енергетичної ефективності, зокрема K_{ee} становив 4,22 на контролі та 2,07 за максимального удобрення, однак загальна тенденція до зниження енергетичної ефективності за інтенсифікації залишалася незмінною.

Бінарні посіви демонстрували виражений ефект енергетичної синергії, за якого сумарна енергопродуктивність системи перевищувала суму показників окремих її компонентів. У системі 'РЖТ Занетіккс' + 'Сірелія' вихід енергії з кукурудзового компонента на контролі становив 113 635 МДж/га, що лише на 9,5 % поступалося монокультурі. Водночас додатковий вихід енергії із сої (25 949 МДж/га) забезпечував сумарну енергопродуктивність 139 583 МДж/га, що на 34,5 % перевищувало показник монокультури кукурудзи.

Показники питомих енерговитрат у бінарних посівах також суттєво знижувалися. Для кукурудзи вони становили 2347 МДж/т на контролі, що на 34,1 % менше порівняно з монокультурою. Для сої ефект був ще більш вираженим: 1315 МДж/т проти 4484 МДж/т у монокультурі, тобто зниження на 70,7 %. Це свідчить про ефективне використання спільних технологічних операцій і ресурсів у змішаних агроценозах.

Коефіцієнт енергетичної ефективності бінарних посівів досягав високих значень. На контролі без внесення добрив K_{ee} становив 8,17–8,34 залежно від поєднання культур, що в 1,65–1,69 раза перевищувало показники монокультури кукурудзи та у 2,07–2,11 раза – монокультури сої. Навіть за умов інтенсивного удобрення K_{ee} бінарних посівів (6,16–6,21) залишався вищим за відповідні показники монокультур на контролі.

Компонентний аналіз коефіцієнта енергетичної ефективності виявив надзвичайно високі показники для окремих культур у складі бінарних посівів. Кукурудза характеризувалася значеннями K_{ee} 7,50–7,63 на контролі та 5,77–5,79 за умов застосування $N_{90}P_{60}K_{60}$. Соя у бінарних агроценозах досягала ще вищих значень K_{ee} – 13,45–13,62 на контролі та 9,61–9,78 за максимального удобрення, що в 3,4–4,7 раза перевищувало відповідні показники монокультури.

Аналіз динаміки виходу енергії з урожаєм за зростання норм добрив засвідчив різні типи реакції агросистем. Монокультура кукурудзи демонструвала лінійне зростання енергопродуктивності з високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,99$), що свідчить про стабільний і прогнозований відгук на мінеральне живлення. Приріст виходу енергії на одиницю додатково внесеного азоту становив 498 МДж/кг N.

Монокультура сої характеризувалася нелінійною реакцією на удобрення з максимумом за помірного рівня мінерального живлення. Регресійний аналіз виявив параболічну залежність ($R^2 = 0,87$) із точкою оптимуму на рівні $N_{55}P_{42}K_{42}$, що пояснюється пригніченням симбіотичної азотфіксації за високих доз мінерального азоту.

Бінарні посіви демонстрували проміжний тип реакції, для якого характерним було уповільнення приросту енергопродуктивності за високих норм добрив. Гранична ефективність додаткового кілограма азоту знижувалася з 742 МДж при переході від контролю до $N_{60}P_{45}K_{45}$ до 294 МДж за подальшої інтенсифікації до $N_{90}P_{60}K_{60}$, що свідчить про наближення системи до межі енергетичної доцільності удобрення.

Динаміка коефіцієнта енергетичної ефективності за умов інтенсифікації підпорядковувалася загальній закономірності зниження ефективності зі зростанням антропогенного навантаження. Для всіх досліджуваних систем виявлено тісну негативну кореляцію між нормами мінеральних добрив і значеннями K_{ee} ($r = -0,92 \dots -0,97$). Найвищі темпи зниження K_{ee} були характерні для монокультури сої (45,1–51,0 %), помірні – для монокультури кукурудзи (20,0 %), тоді як найменше зниження спостерігалось у бінарних посівах (24,6–25,5 %).

Математичне моделювання дало змогу визначити критичні рівні інтенсифікації, після яких коефіцієнт енергетичної ефективності знижується нижче економічно обґрунтованого порогового значення 3,0. Для монокультури кукурудзи така межа досягалася за рівня удобрення $N_{120}P_{90}K_{90}$, для монокультури сої – уже в разі $N_{70}P_{53}K_{53}$, тоді як бінарні посіви зберігали прийнятний рівень енергоефективності навіть за умов застосування $N_{150}P_{113}K_{113}$.

Декомпозиція варіації K_{ee} методом головних компонент показала, що 47,3 % загальної варіабельності пояснюється фактором «система вирощування» (монокультурні та бінарні посіви),

31,8 % – рівнем удобрення, 12,4 % – видовим і сортовим складом та 8,5 % – взаємодією факторів. Отримані результати підтверджують визначальну роль архітектури агросистеми у формуванні її енергетичної ефективності.

Кореляційний аналіз засвідчив наявність тісного позитивного зв'язку між коефіцієнтом енергетичної ефективності та ефективністю використання фотосинтетично активної радіації ($r = 0,84$), а також рівнем біологічної активності ґрунту ($r = 0,76$). Водночас встановлено сильну негативну кореляцію між K_{ee} та антропогенним навантаженням ($r = -0,89$), що вказує на визначальну роль оптимізації природних процесів у підвищенні енергоефективності агросистем.

Високі значення K_{ee} у бінарних посівах зумовлені комплексом взаємопов'язаних біологічних механізмів. Комплементарне використання ресурсів світла, води та елементів живлення забезпечує підвищення ефективності трансформації сонячної енергії на 18–22 %. Біологічна азотфіксація соєю еквівалентна енергетичному внеску 2800–3200 МДж/га, що становить 16–19 % загального енергетичного виходу агроценозу.

Алелопатична взаємодія компонентів бінарних посівів і покращення фітосанітарного стану сприяють зменшенню непродуктивних втрат енергії на 12–15 %. Додатково, модифікація мікроклімату в таких посівах оптимізує температурний і водний режими, що підвищує ефективність фотосинтетичних процесів на 8–10 % порівняно з монокультурами. Просторове розміщення листового апарату рослин у різних ярусах забезпечує повніше перехоплення фотосинтетично активної радіації та її більш раціональне використання впродовж вегетації.

На основі енергетичних показників розраховано інтегральний індекс сталості (ІС), який узагальнює продуктивність, енергетичну ефективність та стабільність функціонування агросистем. Найвищі значення ІС отримано для бінарних посівів на контролі (487–502), що у 2,8–3,1 раза перевищує відповідні показники монокультури кукурудзи (161) та у 3,9–4,4 раза – монокультури сої (114–128). За умов інтенсивного удобрення перевага бінарних посівів зберігається, хоча абсолютні значення ІС знижуються для всіх систем.

Переведення енергетичних показників в економічні еквіваленти з урахуванням поточних цін на енергоносії (12,5 грн/кВт·год, що відповідає $\approx 3,47$ грн/МДж) дало змогу оцінити енергетичний складник рентабельності виробництва. Установлено, що за значень $K_{ee} < 3,0$ енергетичні витрати перевищують 33 % вартості валової продукції, що робить систему виробництва економічно вразливою. Монокультура сої за інтенсивного удобрення ($K_{ee} = 2,07$ – $2,17$) наближається до межі збитковості вже за умови зростання цін на енергоносії на 40–45 %.

Натомість бінарні посіви з K_{ee} 6,16–8,34 забезпечують енергетичну рентабельність на рівні 516–734 %, що гарантує високу стійкість виробництва навіть за подвоєння вартості енергоресурсів. При цьому кожне збільшення K_{ee} на одну умовну одиницю еквівалентне зниженню собівартості продукції на 8,5–9,2 % за рахунок скорочення енергетичного складника витрат.

Високі показники енергетичної ефективності бінарних посівів створюють основу для впровадження стратегій низьковуглецевого землеробства. Оптимізація структури посівних площ із урахуванням енергетичного потенціалу, зокрема збільшення частки бінарних посівів до 30–40 %, може підвищити енергетичну незалежність аграрного сектору на 25–30 % та знизити його вразливість до коливань цін на енергоносії.

Висновки

Комплексний аналіз структури енергетичних витрат за вирощування кукурудзи в різних системах засвідчив, що бінарні посіви мають явну енергетичну перевагу. Сумарні енерговитрати зменшуються на 9,6–16,4 % порівняно з монокультурою кукурудзи, при цьому продуктивність системи зростає, що забезпечує підвищення K_{ee} на 43,6–44,2 %.

Структурна оптимізація енерговитрат у бінарних посівах проявляється у зниженні частки пального з 38,5 до 22,0 % та рівномірнішому розподілі енергетичного навантаження між технологічними компонентами. Встановлено, що критична енергоемність мінеральних добрив за інтенсивного удобрення (24,9–27,6 % загальних витрат) ставить під сумнів економічну доцільність високих норм мінерального живлення та актуалізує пошук альтернативних систем удобрення.

Синергетичний ефект сумісного вирощування кукурудзи та сої проявляється у зниженні питомих енерговитрат на 10,2–63,9 % залежно від культури та рівня інтенсифікації. Екологічні переваги енергоефективних технологій включають зниження вуглецевого сліду на 10,7–15,6 %, підвищення стійкості агроecosystem і покращення енергетичного балансу агроландшафтів.

Енергетична перевага бінарних посівів є беззаперечною: *K_{ee}* становить 8,17–8,34 на контролі та 6,16–6,21 за інтенсивного удобрення, що перевищує показники монокультур у 1,6–4,7 раза, свідчаючи про фундаментальну ефективність принципу агробіоценотичної диверсифікації. Оптимум інтенсифікації з енергетичного погляду досягається за помірного удобрення (N₆₀P₄₅K₄₅), що забезпечує баланс між продуктивністю та енерговитратами: *K_{ee}* 4,12 для кукурудзи та 6,80–6,94 для бінарних посівів.

Критична неефективність інтенсивного удобрення сої проявляється в катастрофічному зниженні *K_{ee}* до 2,07–2,17 та зростанні питомих витрат до 8147–8529 МДж/т, що ставить під сумнів доцільність високих норм мінерального живлення для бобових культур.

Синергетичний ефект бінарних посівів реалізується через зниження питомих енерговитрат на 34–71 % та підвищення виходу енергії на 35–42 % порівняно з монокультурами, що створює основу для енергоощадного землеробства. Екологічна валідність високої енергетичної ефективності підтверджується зниженням вуглецевого сліду на 47–72 %, підвищенням інтегрального індексу сталості в 2,8–4,4 раза та поліпшенням біорізноманіття агроценозів.

Отримані результати формують наукову основу для розроблення енергоощадних технологій вирощування кукурудзи, оптимізації структури енерговитрат та переходу до сталих систем землеробства з мінімальним антропогенним навантаженням на довкілля. Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією відновлюваних джерел енергії в технологічні процеси та розробленням адаптивних систем управління енергетичними потоками в агроєкосистемах.

Використана література

1. Дудка М. І., Якунін О. П., Пустовий С. І. Агроекономічна ефективність вирощування зерна кукурудзи залежно від фону удобрення та позакореневого підживлення. *Зернові культури*. 2020. Т. 4, № 2. С. 313–318. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0140>
2. Єрмакова Л. М., Антал Т. В. Економічна та енергетична ефективність вирощування кукурудзи залежно від мінеральних добрив та позакореневого підживлення посівів. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2020. № 5. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2020.05.006>
3. Каменщук Б. Д. Шляхи підвищення ефективності вирощування кукурудзи на зерно. *Корми і кормовиробництво*. 2020. № 89. С. 85–92. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202089-08>
4. Камінський В. Ф., Асанішвілі Н. М. Формування якості зерна кукурудзи різних напрямів використання залежно від технології вирощування в Лісостепу. *Корми і кормовиробництво*. 2020. № 89. С. 74–84. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202089-07>
5. Камінський В. Ф., Асанішвілі Н. М. Економічна ефективність технологій вирощування кукурудзи різного рівня інтенсивності. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2020. Вип. 3. С. 27–34. [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2020-3\(107\)](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2020-3(107))
6. Коковіхін С. В., Біляєва І. М. Продуктивність та економічна ефективність вирощування гібридів кукурудзи залежно від способів поливу та захисту рослин в умовах півдня України. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2017. № 4. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/203234>
7. Шпикуляк О. Г., Шеленко Д. І., Суховій А. Г. Організаційно-економічні засади розвитку сільськогосподарської діяльності комунальних підприємств у формуванні місцевої продовольчої безпеки. *Актуальні проблеми розвитку економіки регіону*. 2024. Вип. 20, Т. 1. С. 380–390. <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.380-390>
8. Месель-Веселяк В. Я. Виробництво зернових культур в Україні: потенційні можливості. *Економіка АПК*. 2018. № 5. С. 5–14.
9. Саверин І. В., Качмар О. Й. Продуктивність кукурудзи за різних систем удобрення в короткочасних сівозмінах. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2023. Вип. 73 (2). С. 91–109. [https://doi.org/10.32636/01308521.2023-\(73\)-2-7](https://doi.org/10.32636/01308521.2023-(73)-2-7)
10. Шпикуляк О. Г. Інститут витрат в економічній теорії і практиці господарювання. *Економічні науки. Серія економічна теорія та економічна історія*. 2008. Вип. 5, Ч. 2. С. 323–329.
11. Шпикуляк О. Г. Ефективність управління аграрним підприємством. *Економіка АПК*. 2005. № 3. С. 22–25.
12. Шубравська О. В., Прокопенко К. О. Розвиток аграрного ринку України в умовах дії інноваційних чинників. *Економіка і прогнозування*. 2011. № 2. С. 118–129.

References

1. Dudka, M. I., Yakunin, O. P., & Pustovyi, S. I. (2020). Agro-economic efficiency of maize grain growing depending on the background of fertilization and foliar top dressing. *Grain Crops*, 4(2), 313–318. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0140> [In Ukrainian]

2. Krestyaninov, Ye., Ermakova, L., & Antal, T. (2020). Economic and energy efficiency of maize cultivation depending on mineral fertilizers and foliar fertilization. *Scientific Reports of NULES of Ukraine*, 5. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2020.05.006> [In Ukrainian]
3. Kamenshchuk, B. D. (2020). Ways of grain corn growing improvement. *Feeds and Feed Production*, 89, 85–92. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202089-08> [In Ukrainian]
4. Kaminskyi, V. F., & Asanishvili, N. M. (2020). Formation of corn grain quality in different directions of use depending on the technology of growing in the Forest-steppe. *Feeds and Feed Production*, 89, 74–84 <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202089-07> [In Ukrainian]
5. Kaminskyi, V. F., & Asanishvili, N. M. (2020). Economic efficiency of maize growing technologies of different levels of intensity. *Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Region*, 3, 27–34. [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2020-3\(107\)-4](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2020-3(107)-4) [In Ukrainian]
6. Kokovikhin, S. V., & Bilyaeva, I. M. (2017). Productivity and economic efficiency of growing of hybrids of the corn depending on the methods of watering and protection of plants in the south of Ukraine. *Scientific Reports of NULES of Ukraine*, 4. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewById/203234> [In Ukrainian]
7. Shpykulak, O. H., Shelenko, D. I., & Sukhovii, A. H. (2024). Organizational and economic principles of the development of agricultural activities of communal enterprises in the formation of local food security. *Actual Problems of Regional Economic Development*, 20(1), 380–390. <https://doi.org/10.15330/apred.1.20.380-390> [In Ukrainian]
8. Mesel-Veselyak, V. Ya. (2018). Cereal crop production in Ukraine: potential opportunities. *Economics of Agro-Industrial Complex*, 5, 5–14. [In Ukrainian]
9. Saveryn, I., & Kachmar, O. (2023). Corn productivity under different fertilizer systems in short-rotation crop rotations. *Foothill and Mountain Agriculture and Stockbreeding*, 73(2), 91–109. [https://doi.org/10.32636/01308521.2023-\(73\)-2-7](https://doi.org/10.32636/01308521.2023-(73)-2-7) [In Ukrainian]
10. Shpykulak, O. H. (2008). Cost institute in economic theory and management practice. *Economic Sciences. Series: Economic Theory and Economic History*, 5(2), 323–329. [In Ukrainian]
11. Shpykulak, O. H. (2005). Efficiency of agribusiness management. *Economics of Agro-Industrial Complex*, 3, 22–25. [In Ukrainian]
12. Shubravskaya, O. V., & Prokopenko, K. O. (2011). Development of the agrarian market of Ukraine under the influence of innovative factors. *Economics and Forecasting*, 2, 118–129. [In Ukrainian]

UDC 633.11:631.811.98

Mokriienko, V. A. (2025). Structure of Energy Costs in Maize Cultivation in Mono and Mixed Cropping: a Comprehensive Analysis. *Advanced Agritechnologies*, 13(3). <https://doi.org/10.47414/na.13.3.2025.347482> [In Ukrainian]

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine, *e-mail: mokriienko@ukr.net

Purpose. To evaluate the energy efficiency of maize cultivation in monocropping and mixed cropping with soybean under different rates of mineral fertilisers in the Forest Steppe zone of Ukraine. **Methods.** The study was conducted in 2021–2024 in a stationary field experiment at the Department of Crop Production, Agronomic Research Station of NULES of Ukraine (Kyiv region), on typical low-humus chernozem. Mono- and mixed cropping systems were compared under three fertilisation regimes: no fertilisers, N₆₀P₄₅K₄₅, and N₉₀P₆₀K₆₀. Energy efficiency was assessed by crop energy output, specific energy inputs, the energy efficiency, and the integral sustainability index. **Results.** The energy profile of maize monocropping was characterized by a high share of fuel and machinery costs (together exceeding 70%), which increased substantially with fertilisation intensity. Higher fertiliser rates raised maize energy output by 43.3%, but also increased specific energy inputs by 25.2% and reduced energy efficiency from 4.94 to 3.95. Soybean monocropping proved energetically vulnerable under high fertilisation rates: energy efficiency decreased to 2.07–2.17, while specific energy inputs rose to 8147–8529 MJ/t. Mixed maize–soybean cropping provided a synergistic effect: total energy inputs were 9.6–16.4% lower compared with maize monocropping, while energy output increased by 35–42%. The energy efficiency of mixed cropping reached 8.17–8.34 under control and 6.16–6.21 under intensive fertilisation, 1.6–4.7 times exceeding monocropping. Mixed cropping also reduced the carbon footprint by 10.7–15.6% and increased the integral sustainability index by 2.8–4.4 times. **Conclusions.** Mixed maize–soybean cropping demonstrates significant energy and ecological advantages over monocropping. From an energy perspective, moderate fertilisation (N₆₀P₄₅K₄₅) is optimal, whereas excessive intensification, particularly for soybean, is energetically and economically unjustified.

Keywords: Maize; soybean; mixed cropping; energy efficiency; specific energy inputs; energy efficiency coefficient; carbon footprint; sustainable development.

Надійшла / Received 14.11.2025
Погоджено до друку / Accepted 19.12.2025