

УДК 633.11«324»:631.5:620.9

Енергетична ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та технологічних факторів

Н. О. Кононюк 

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна

Автор для листування: Надія Кононюк, nadiyakononuk@ukr.net

Цитування: Кононюк Н. О. Енергетична ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та технологічних факторів. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 50–58. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp50-58>

Мета. Визначити енергетичну ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та впливу технологічних факторів. **Методи.** Польові дослідження проводили в умовах зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (50.023194, 30.173895) упродовж 2020–2024 рр. **Результати.** Загальні енерговитрати на вирощування пшениці озимої становили 53,0–83,0 ГДж/га залежно від інтенсивності технології. У структурі витрат домінували дві статті: виробництво та внесення добрив (44,5–51,1%) і сушіння зерна (37,6–39,9%), які сумарно становили 83,8–88,7% загальних енерговитрат. А підвищення рівня удобрення від мінімального (N₆₀P₄₀K₄₀) до максимального (N₁₈₀P₉₀K₉₀ + мікро) призводило до зростання енерговитрат на 57% при збільшенні врожайності лише на 31%. Коефіцієнт енергетичної ефективності (К_е) знижувався з 3,02 до 2,68 (–11,3%), енергоємність зростала з 9,91 до 11,11 ГДж/т (+12,1%). Причому, перехід від мінімального до середнього рівня удобрення практично не знижував К_е (від 3,02 до 3,01), тоді як подальше підвищення до максимального рівня спричиняло різке зниження ефективності (з 3,01 до 2,68). Середній рівень удобрення є енергетично оптимальним компромісом. **Висновки.** Реакція сортів на інтенсифікацію суттєво відрізнялася: сорт інтенсивного типу зберігав високий К_е навіть за максимального удобрення, тоді як універсальний сорт демонстрував різке зниження ефективності (–17% К_е). Це визначає диференційований підхід до вибору технології залежно від сорту. А системи захисту рослин (хімічний / біологічний) та ретарданти (МОДДУС 250 ЕС / Квантум-Аквасил) мали незначний вплив на енергетичну ефективність – різниця К_е становила 0,05–0,07, що знаходиться на межі достовірності. Оптимальним варіантом технології за енергетичною ефективністю є: сорт 'Легенда білоцерківська' + середній рівень удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) + хімічний захист + ретардант МОДДУС 250 ЕС, який забезпечує К_е 3,23, енергоємність 9,20 ГДж/т та приріст енергії 174,1 ГДж/га.

Ключові слова: сортовий склад; структура енерговитрат; К_е; біологічний захист; рівень удобрення.

Вступ

Пшениця озима є провідною продовольчою культурою України, яка займає близько 6–7 млн га посівних площ і забезпечує понад 50% валового збору зернових культур [1, 2]. В умовах сучасного аграрного виробництва, що характеризується зростанням вартості енергоносіїв та необхідністю адаптації до кліматичних змін, особливої актуальності набуває оптимізація технологій вирощування з урахуванням енергетичної ефективності [3, 4].

Енергетичний аналіз технологій вирощування сільськогосподарських культур є об'єктивним інструментом оцінки ефективності використання ресурсів, оскільки на відміну від еконо-

Одержано 05.02.2026 • Погоджено 28.03.2026 • Опубліковано онлайн 18.05.2026

© Автор(и), 2026. Видавець Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Це стаття відкритого доступу, що розповсюджується на умовах ліцензії CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), яка дозволяє використання, розповсюдження та відтворення на будь-яких носіях за умови належного цитування оригінальної роботи.



мічного аналізу не залежить від коливань ринкових цін [5, 6]. Водночас енергетична оцінка дозволяє виявити найбільш енергоємні елементи технології та визначити напрями оптимізації виробництва [7].

Виробництво мінеральних добрив, особливо азотних, є одним із найбільш енергоємних процесів у сільському господарстві. За даними Fertilizers Europe, на виробництво та внесення азотних добрив припадає близько 52% загальних енерговитрат при вирощуванні пшениці [8]. Процес Габера – Боша, що лежить в основі синтезу аміаку, потребує значних витрат природного газу – близько 35 ГДж на тонну азоту [9, 10].

Численні дослідження свідчать, що підвищення доз азотних добрив не завжди супроводжується пропорційним зростанням урожайності, що призводить до зниження коефіцієнта енергетичної ефективності (К_е) [11, 12]. За даними Neugschwandtner et al. [13], при вирощуванні пшениці озимої в умовах Паннонського регіону (Австрія) система мінімального обробітку забезпечувала найвищу енергетичну ефективність порівняно з традиційною оранкою.

Важливим аспектом є врахування сортових особливостей реакції рослин на інтенсифікацію технології. Сорти інтенсивного типу характеризуються вищим потенціалом урожайності та здатністю ефективніше використовувати підвищені дози добрив, тоді як універсальні та посухостійкі сорти можуть демонструвати знижену віддачу від інтенсифікації [14, 15].

В Україні дослідження енергетичної ефективності вирощування зернових культур проводились Компанійцем В. О. зі співавторами [16], Центило Л. В. та ін. [17], Гангуром В. В. [18]. Однак комплексне вивчення енергетичної ефективності вирощування пшениці озимої залежно від сорту, системи удобрення, захисту рослин та застосування ретардантів залишається недостатньо дослідженим.

Сушіння зерна є ще одним енергоємним процесом, на який припадає 35–40% загальних енерговитрат при вирощуванні зернових культур [19, 20]. Впровадження енергоефективних технологій сушіння та збирання зерна при нижчій вологості може суттєво знизити енергоємність виробництва [21].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації технологій вирощування пшениці озимої з урахуванням енергетичних витрат в умовах зростання цін на енергоносії та добрива. Комплексний підхід до оцінки енергетичної ефективності різних варіантів технології дозволить обґрунтувати рекомендації для виробництва.

Мета дослідження – установити енергетичну ефективність вирощування пшениці м'якої озимої залежно від сорту та впливу технологічних факторів (рівня удобрення, системи захисту рослин, застосування ретардантів) в умовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження проводили в умовах зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (50.023194, 30.173895) упродовж 2020–2024 рр.

Методика енергетичної оцінки базувалася на визначенні сукупних витрат енергії на всі елементи технології вирощування пшениці озимої та зіставленні їх з енергією, накопиченою в урожаї. Енергетичні еквіваленти матеріальних ресурсів та технологічних операцій прийнято згідно з галузевими нормативами та методичними рекомендаціями [21, 22].

Для оцінки енергетичної ефективності використовували систему показників: загальні енерговитрати (ГДж/га), валова енергія врожаю (ГДж/га), коефіцієнт енергетичної ефективності (К_е), приріст енергії (ГДж/га) та енергоємність продукції (ГДж/т). К_е розраховували як відношення валової енергії врожаю до сукупних енерговитрат; значення К_е > 1 свідчить про енергетичну доцільність технології, К_е > 2 – про високу ефективність, К_е > 3 – про дуже високу ефективність.

Валову енергію врожаю визначали з урахуванням енергетичної цінності основної (зерно) та побічної (солома, полова) продукції. Енергетичний еквівалент зерна пшениці становить 14,5 МДж/кг, соломи – 14,0 МДж/кг (при співвідношенні зерно:солома = 1:1), полови – 12,5 МДж/кг (10% від маси зерна). Таким чином, валова енергія 1 т зерна з побічною продукцією становить близько 29,75 ГДж.

Результати дослідження

Виробництво мінеральних добрив є одним з найбільш енергоємних процесів у сільському господарстві. Особливо енергоємним є синтез азотних добрив, що базується на процесі Габера – Боша і потребує значних затрат природного газу. За нашими розрахунками, на виробництво та внесення добрив припадає 44–51% загальних енерговитрат на вирощування пшениці озимої залежно від схеми удобрення.

У дослідженнях застосовували три схеми удобрення різної інтенсивності, що відповідають різним рівням планової врожайності та інтенсивності технології загалом.

Таблиця 1. Енерговитрати на системи удобрення пшениці м'якої озимої

Препарат	Мінімальна	Середня	Максимальна
Нітроамофоска 16:16:16	11875	17813	–
Аміачна селітра	11715	–	–
Суперфосфат	–	–	5000
Калій хлористий	–	–	1350
Сульфат амонію	–	–	12 100
КАС-32 (сумарно)	–	9864	17 688
Карбамід (позакоренево)	–	2343	5467
Мікродобрива та стимулятори	–	240	850
Всього, МДж/га	23 590	30 260	42 455
Доза NPK	N ₆₀ P ₄₀ K ₄₀	N ₁₂₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₁₈₀ P ₉₀ K ₉₀

Мінімальна схема удобрення (N₆₀P₄₀K₄₀) передбачала внесення нітроамофоски (250 кг/га) під основний обробіток ґрунту та весняне підживлення аміачною селітрою (150 кг/га). Загальні енерговитрати на добрива становили 23 590 МДж/га, що є базовим рівнем для порівняння.

Середня схема удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) включала підвищену дозу нітроамофоски (375 кг/га), дробне внесення азоту у вигляді КАС-32 у два строки (рано весною та на початку виходу в трубку), позакореневе підживлення карбамідом та мікродобрива. Енерговитрати зросли до 30 260 МДж/га (+28% до мінімальної).

Максимальна схема удобрення (N₁₈₀P₉₀K₉₀ + мікроелементи) передбачала повну систему удобрення з роздільним внесенням фосфорних (суперфосфат) і калійних (калій хлористий) добрив, багаторазовим азотним підживленням (сульфат амонію + КАС-32 у три строки + карбамід позакоренево двічі), комплексом мікроелементів (Zn, Cu, B, Mn, Mo) та амінокислотними стимуляторами. Енерговитрати досягли 42 455 МДж/га (+80% до мінімальної схеми).

Аналіз структури енерговитрат на добрива показав, що найбільш енергоємними є азотні добрива, на які припадає 78–85% витрат енергії в системі удобрення. Це пояснюється високою енергоємністю виробництва аміаку (процес Габера – Боша потребує ~ 35 ГДж на тону азоту). Фосфорні добрива становлять 10–12%, калійні – 3–5% енерговитрат системи удобрення.

Окрім добрив, значні витрати енергії пов'язані з обробітком ґрунту, підготовкою та внесенням насіння, захистом рослин, збиранням урожаю та післязбиральною доробкою зерна. Систематизація цих витрат дозволяє визначити резерви енергозбереження на кожному етапі технології.

Загальні енерговитрати на обробіток ґрунту становили 1630 МДж/га, що складає лише 2–3% загальних витрат енергії. Найбільш енергоємною операцією є оранка (850 МДж/га, або 52% витрат на обробіток), що обумовлено значними тяговими зусиллями при обертанні скиби на глибину 20–22 см. Перехід на мінімальний або нульовий обробіток дозволив би зменшити ці витрати на 40–60%, проте в умовах досліду застосовували традиційну систему обробітку.

Виробництво насінневого матеріалу є досить енергоємним процесом – 4070 МДж/га при нормі висіву 220 кг/га (18,5 МДж/кг). Ця стаття включає витрати на вирощування, очищення, калібрування і зберігання насіння. Операція сівби (250 МДж/га) і протруювання (65 МДж/га) є менш енергоємними. Загалом насінневий комплекс становить 5–8% загальних енерговитрат.

Енерговитрати на захист рослин включають механічні операції обприскування (225–315 МДж/га залежно від кількості обробок) та енергію на виробництво пестицидів (990–1110 МДж/га). Загалом захист рослин становить 1,5–2,5% енерговитрат. Біологічний захист є

дещо менш енергоємним через нижчу енергоємність виробництва біопрепаратів порівняно з хімічними пестицидами.

Таблиця 2. Енерговитрати на елементи технології вирощування пшениці озимої

Елемент технології	МДж/га	Примітка
Обробіток ґрунту		
Лушення стерні	220	8–10 см
Оранка	850	20–22 см
Культивація передпосівна	320	6–8 см
Коткування	130	
Боронування весняне	110	
Разом обробіток	1630	
Сівба		
Операція сівби	250	
Насіння (виробництво)	4070	220 кг/га
Протруювання насіння	65	
Разом сівба	4385	
Захист рослин		
Обприскування (5–7 обробок)	225–315	45 МДж/обробка
Пестициди (виробництво)	990–1110	
Збирання та доробка		
Збирання комбайном	760–1330	190 МДж/т
Транспортування	270–408	54 МДж/т
Сушіння зерна	20 812–31 218	4450 МДж/т

Сушіння зерна це найбільш енергоємна операція після системи удобрення. За нормативами, зниження вологості зерна на 1% потребує близько 1480 МДж/т. При типовому зниженні вологості на 3% (з 17 до 14%) та врожайності 4–7 т/га енерговитрати на сушіння становлять 20,8–31,2 ГДж/га, або 37–40% загальних витрат. Це обумовлено високими затратами теплової енергії на випаровування вологи та роботу вентиляційних систем сушарок.

Загальні енерговитрати на вирощування пшениці озимої формуються з витрат на всі елементи технології і суттєво залежать від рівня інтенсифікації. Аналіз структури витрат дозволяє визначити основні статті та напрями оптимізації енергоспоживання.

Таблиця 3. Структура загальних енерговитрат за схемами удобрення пшениці озимої

Стаття витрат	Мін.	%	Серед.	%	Макс.	%
Добрива	23 590	44,5	30 260	46,4	42 455	51,1
Обробіток ґрунту	1980	3,7	1980	3,0	1980	2,4
Насіння	4070	7,7	4070	6,2	4070	4,9
Сівба	315	0,6	315	0,5	315	0,4
Захист (операції)	225	0,4	225	0,4	315	0,4
Пестициди	990	1,9	990	1,5	1110	1,3
Збирання	760	1,4	950	1,5	1140	1,4
Транспортування	270	0,5	340	0,5	408	0,5
Сушіння	20 812	39,3	26 015	39,9	31 218	37,6
Всього, МДж/га	53 012	100	65 145	100	83 011	100

Загальні енерговитрати зростали від 53,0 ГДж/га за мінімальної схеми удобрення до 83,0 ГДж/га за максимальної, тобто на 57%. При цьому приріст урожайності становив лише 31% (з 6,0 до 7,9 т/га), що свідчить про зниження енергетичної віддачі при підвищенні інтенсивності технології.

У структурі енерговитрат за всіма схемами домінують дві статті: добрива (44,5–51,1%) та сушіння зерна (37,6–39,9%), які сумарно становлять 83,8–88,7% загальних витрат енергії. Частка добрив зростає з підвищенням інтенсивності удобрення, тоді як відносна частка сушіння дещо знижується, хоча в абсолютних величинах збільшується.

Виявлені закономірності визначають основні напрями енергозбереження: оптимізація доз азотних добрив з урахуванням реальної потреби рослин (використання ґрунтової та рослинної діагностики), застосування повільнодіючих форм добрив, впровадження енергоефективних технологій сушіння (рекуперація тепла, використання альтернативних джерел енергії), а також збирання зерна при нижчій вологості для зменшення потреби в сушінні.

Енергетичну ефективність технології оцінювали за коефіцієнтом енергетичної ефективності (K_{ee}), який показує, скільки одиниць енергії накопичується в урожаї на кожну одиницю витраченої енергії. Аналіз проведено для всіх 36 варіантів повнофакторного дослідження з урахуванням впливу сорту, рівня удобрення, системи захисту та ретарданту.

Таблиця 4. Енергетичні показники вирощування пшениці озимої залежно від рівня удобрення (середнє за 2020–2024 рр.)

Рівень удобрення	Урожайність, т/га	Енерговитрати, ГДж/га	Валова, ГДж/га	K_{ee}	Енергоємність, ГДж/т
Мінімальне (N ₆₀)	6,03	59,3	179,3	3,02	9,91
Середнє (N ₁₂₀)	7,25	71,6	215,8	3,01	9,97
Максимальне (N ₁₈₀)	7,91	87,9	235,2	2,68	11,11
$HP_{0,05}$	0,24	–	–	0,08	0,35

Підвищення інтенсивності удобрення від мінімального до максимального рівня призвело до закономірного зниження енергетичної ефективності. K_{ee} знижувався з 3,02 (мінімальне) до 2,68 (максимальне), тобто на 11,3%. Енергоємність виробництва 1 т зерна зростала з 9,91 до 11,11 ГДж/т (+12,1%). Це пояснюється тим, що приріст урожайності (+31%) не компенсував зростання енерговитрат (+48% на добрива, +57% загалом).

Характерно, що перехід від мінімального до середнього рівня удобрення практично не знижував K_{ee} (від 3,02 до 3,01), тоді як подальше підвищення до максимального рівня спричиняло різке зниження ефективності (від 3,01 до 2,68). Це підтверджує енергетичну доцільність середнього рівня удобрення як оптимального компромісу між продуктивністю та ефективністю використання ресурсів.

Таблиця 5. Енергетичні показники вирощування пшениці озимої залежно від сорту (середнє за 2020–2024 рр.)

Сорт (тип)	Урожайність, т/га	Енерговитрати, ГДж/га	K_{ee}	Приріст, ГДж/га	Енергоємність, ГДж/т
‘Легенда білоцерківська’ (інтенс.)	7,93	77,0	3,08	159,0	9,68
‘Воздвиженка’ (посухостійкий)	6,73	71,4	2,82	128,8	10,57
‘Манера одеська’ (універс.)	6,53	70,4	2,78	125,2	10,75
$HP_{0,05}$	0,24	–	0,07	–	0,31

Найвищу енергетичну ефективність забезпечував сорт інтенсивного типу ‘Легенда білоцерківська’ з K_{ee} 3,08 та енергоємністю 9,68 ГДж/т. Перевага цього сорту над іншими становила 9–11% за K_{ee} , що є статистично достовірним ($HP_{0,05} = 0,07$). Високий K_{ee} сорту ‘Легенда білоцерківська’ формувався завдяки найвищій урожайності (7,93 т/га), яка забезпечувала більший вихід енергії при порівнянних витратах.

Посухостійкий сорт ‘Воздвиженка’ та універсальний сорт ‘Манера одеська’ мали близькі показники K_{ee} (2,82 та 2,78 відповідно), різниця між ними недостовірна. Нижча енергетична ефективність цих сортів пояснюється меншою врожайністю при порівнянних енерговитратах. Приріст енергії на 1 га у сорту ‘Легенда білоцерківська’ становив 159,0 ГДж, що на 23–27% більше, ніж у інших сортів.

Біологічний захист з використанням біофунгіциду ТАЕГРО характеризувався нижчими енерговитратами (71,9 проти 74,0 ГДж/га), проте через меншу врожайність K_{ee} був дещо нижчим (2,86 проти 2,93). Різниця K_{ee} становила 0,07, що знаходиться на межі достовірності. Таким чином, з енергетичної точки зору обидві системи захисту є практично рівноцінними.

Таблиця 6. Енергетичні показники залежно від системи захисту та ретарданту

Фактор / варіант	Енерговитрати, ГДж/га	Кее	Енергоємність, ГДж/т	± до контролю
Система захисту				
Хімічний захист (контроль)	74,0	2,93	10,20	–
Біологічний захист (ТАЕГРО)	71,9	2,86	10,46	–0,07
Ретарданти				
МОДДУС 250 ЕС (контроль)	73,5	2,92	10,28	–
Квантум-Аквазил	72,4	2,87	10,38	–0,05

Застосування біологічного препарату Квантум-Аквазил порівняно з хімічним ретардантом МОДДУС 250 ЕС зменшувало енерговитрати на 1,1 ГДж/га, проте дещо знижувало Кее (2,87 проти 2,92) через меншу ефективність у запобіганні вилягання та, відповідно, нижчу врожайність. Різниця є несуттєвою (0,05), що свідчить про можливість заміни хімічного ретарданту біологічним без значних втрат енергетичної ефективності.

Реакція сортів різних біологічних типів на інтенсифікацію технології суттєво відрізнялася, що визначало оптимальні варіанти для кожного сорту з енергетичної точки зору.

Таблиця 7. Енергетичні показники сорту інтенсивного типу 'Легенда білоцерківська'

Удобрення	Захист	Рет.	Урож.	Енерговитр.	Кее	Енергоємн.
Мінімальне	Хім	КВ	6,73	63,0	3,18	9,36
Мінімальне	Хім	МОД	6,94	64,0	3,22	9,23
Середнє	Хім	КВ	8,14	76,3	3,17	9,38
Середнє	Хім	МОД	8,47	77,9	3,23	9,20
Максимальне	Хім	КВ	9,11	93,0	2,91	10,22
Максимальне	Хім	МОД	9,50	94,9	2,98	9,99

Сорт інтенсивного типу 'Легенда білоцерківська' характеризувався найвищими показниками Кее серед досліджуваних сортів при всіх рівнях удобрення. Діапазон Кее становив 2,85–3,23 залежно від варіанту технології. Найвищий Кее (3,23) зафіксовано за середнього рівня удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) з хімічним захистом та ретардантом МОДДУС 250 ЕС при урожайності 8,47 т/га.

Особливістю сорту є відносно помірне зниження КЕЕ при переході до максимального удобрення (–8% порівняно з середнім), що свідчить про здатність сорту ефективно використовувати підвищені дози добрив. Приріст урожайності від середнього до максимального рівня удобрення (+12%) частково компенсував зростання енерговитрат (+22%), що робить максимальне удобрення енергетично прийнятним для цього сорту в умовах високих цін на зерно.

Сорт універсальний високопластичний 'Манера одеська' показав найнижчу енергетичну ефективність серед досліджуваних сортів. Кее коливався від 2,49 до 2,96. Характерною особливістю є різке зниження Кее при максимальному удобренні – на 13–17% порівняно з середнім рівнем. Це свідчить про те, що сорт не здатний ефективно реалізувати підвищений рівень живлення, і максимальне удобрення є енергетично недоцільним.

Найнижчий Кее (2,49) зафіксовано за максимального удобрення з біологічним захистом, що є абсолютним мінімумом по досліді. Оптимальним для цього сорту є мінімальний рівень удобрення (Кее 2,88–2,96), який забезпечує найвищу енергетичну ефективність при прийнятній врожайності.

Посухостійкий сорт 'Воздвиженка' займав проміжне положення між інтенсивним і універсальним сортами. Кее становив 2,54–2,99. Характерною особливістю є помірна реакція на інтенсифікацію – зниження Кее від мінімального до максимального удобрення становило 10–12%, що менше, ніж у 'Манери одеської', але більше, ніж у 'Легенди білоцерківської'. Оптимальним для 'Воздвиженка' є середній рівень удобрення (Кее 2,87–2,96), який забезпечує баланс між продуктивністю та енергоефективністю. Максимальне удобрення призводить до невиправданого зростання енергоємності (до 11,7 ГДж/т) без адекватного приросту врожаю.

Висновки

Загальні енерговитрати на вирощування пшениці озимої становили 53,0–83,0 ГДж/га залежно від інтенсивності технології. У структурі витрат домінували дві статті: виробництво та внесення добрив (44,5–51,1%) і сушіння зерна (37,6–39,9%), які сумарно становили 83,8–88,7% загальних енерговитрат.

Підвищення рівня удобрення від мінімального (N₆₀P₄₀K₄₀) до максимального (N₁₈₀P₉₀K₉₀ + мікро) призводило до зростання енерговитрат на 57% при збільшенні врожайності лише на 31%. К_{ее} знижувався з 3,02 до 2,68 (–11,3%), енергоємність зростала з 9,91 до 11,11 ГДж/т (+12,1%).

Перехід від мінімального до середнього рівня удобрення практично не знижував К_{ее} (від 3,02 до 3,01), тоді як подальше підвищення до максимального рівня спричинило різке зниження ефективності (від 3,01 до 2,68). Середній рівень удобрення є енергетично оптимальним компромісом.

Сорт інтенсивного типу ‘Легенда білоцерківська’ забезпечував найвищу енергетичну ефективність (К_{ее} 3,08, енергоємність 9,68 ГДж/т), що на 9–11% вище за інші сорти. Перевага формувалася завдяки найвищій урожайності при порівнянних енерговитратах.

Реакція сортів на інтенсифікацію суттєво відрізнялася: сорт інтенсивного типу зберігав високий К_{ее} навіть за максимального удобрення, тоді як універсальний сорт демонстрував різке зниження ефективності (–17% К_{ее}). Це визначає диференційований підхід до вибору технології залежно від сорту.

Системи захисту рослин (хімічний / біологічний) та ретарданти (МОДДУС 250 ЕС / Квантум-Аквасил) мали незначний вплив на енергетичну ефективність – різниця К_{ее} становила 0,05–0,07, що знаходиться на межі достовірності.

Оптимальним варіантом технології за енергетичною ефективністю є: сорт ‘Легенда білоцерківська’ + середній рівень удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) + хімічний захист + ретардант МОДДУС 250 ЕС, який забезпечує К_{ее} 3,23, енергоємність 9,20 ГДж/т та приріст енергії 174,1 ГДж/га.

Отже, основними напрямками енергозбереження є: оптимізація доз азотних добрив з урахуванням реальної потреби рослин (до 50% економії на добривах), впровадження енергоефективних технологій сушіння, збирання зерна при нижчій вологості, а також вибір високоврожайних сортів інтенсивного типу.

Список використаних джерел

1. State Statistics Service of Ukraine. (2024). *Crop production of Ukraine 2023: Statistical collection*. Kyiv, Ukraine. [In Ukrainian]
2. Bazhal, M., & Koutchma, T. (2022). Ukraine as a food and grain hub: Impact of science and technology development on food security in the world. *Frontiers in Food Science and Technology*, 2, Article 1040396. <https://doi.org/10.3389/frfst.2022.1040396>
3. Halecki, W., & Bedla, D. (2022). Global wheat production and threats to supply chains in a volatile climate change and energy crisis. *Resources*, 11(12), 1–11. <https://doi.org/10.3390/resources11120118>
4. Skrypnyk, A., Klymenko, N., Tuzhyk, K., Galaieva, L., & Rohoza, K. (2021). Prerequisites and prospects for sustainable development of grain production in Ukraine. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 7(2), 50–70. <https://doi.org/10.51599/are.2021.07.03.06> [In Ukrainian]
5. Ashraf, M., Mahmood, M., Sultan, M., et al. (2020). Investigation of input and output energy for wheat production: A comprehensive study for Tehsil Mailsi (Pakistan). *Sustainability*, 12(17), Article 6884. <https://doi.org/10.3390/su12176884>
6. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29(1), 39–51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6)
7. Smil, V. (2008). *Energy in nature and society: General energetics of complex systems*. MIT Press.
8. Fertilizers Europe. (2019). *Harvesting energy with fertilizers: Sustainable agriculture in Europe*. Fertilizers Europe. <https://www.fertilizerseurope.com>
9. Küsters, J., & Lammel, J. (1999). Investigations of the energy efficiency of the production of winter wheat and sugar beet in Europe. *European Journal of Agronomy*, 11(1), 35–43. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(99\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00015-5)
10. Gellings, C. W., & Parmenter, K. E. (2004). Energy efficiency in fertilizer production and use. In *Efficient use and conservation of energy. Encyclopedia of life support systems (EOLSS)* (pp. 123–136). EOLSS Publishers.

11. Fadavi, R., Keyhani, A., & Mohtasebi, S. S. (2011). An analysis of energy use, input costs and relation between energy inputs and yield of apple orchard. *Research in Agricultural Engineering*, 57(3), 88–96. <https://doi.org/10.17221/0/2010-RAE>
12. Conforti, P., & Giampietro, M. (1997). Fossil energy use in agriculture: An international comparison. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 65(3), 231–243. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00048-0)
13. Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H.-P., & Wagentristl, H. (2019). Energy efficiency of winter wheat in a long-term tillage experiment under Pannonian climate conditions. *European Journal of Agronomy*, 103, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.11.002>
14. Korkhova, M., Panfilova, A., Domaratskiy, Y., & Smirnova, I. (2023). Productivity of winter wheat (*T. aestivum*, *T. durum*, *T. spelta*) depending on varietal characteristics in the context of climate change. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24, 236–244. <https://doi.org/10.12912/27197050/163124>
15. Vozhegova, R. A., & Serhieiev, L. A. (2018). Photosynthetic activity of seed wheat sows of winter dependence on fertilization and protection of plants under the conditions of the south of Ukraine. *Scientific Reports of NULES of Ukraine*, 2(72). https://scireports.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Vol.%2072,%20No.%202,%202018.pdf [In Ukrainian]
16. Kompaniiets, V. O., Zheliazkov, O. I., & Kulyk, A. O. (2014). Methodology of energy evaluation of grain production technologies. *Bulletin of the Institute of Agriculture of the Steppe Zone of NAAS of Ukraine*, 6, 118–124. [In Ukrainian]
17. Tsentylo, L. V., Tsiuk, O. A., & Melnyk, V. I. (2019). Energy efficiency of growth transport and processing systems. *Bioresources and Nature Management*, 11(3–4), 90–96. <https://doi.org/10.31548/bio2019.03.010>
18. Hangur, V. V., & Kosminskiy, O. O. (2024). Bioenergetic assessment of the efficiency of different levels of mineral nutrition in sunflower cultivation technology. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 1, 55–64. [In Ukrainian]
19. Pimentel, D. (2009). Energy inputs in food crop production in developing and developed nations. *Energies*, 2(1), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en20100001>
20. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133(3–4), 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
21. Tarariko, O. Yu. (Ed.). (2005). *Bioenergetic evaluation of agricultural production*. Agrarna nauka [In Ukrainian]
22. Hülsbergen, K. J., Feil, B., Biermann, S., Rathke, G. W., Kalk, W. D., & Diepenbrock, W. (2001). A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 86(3), 303–321. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00286-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00286-3)

Energy efficiency of winter bread wheat cultivation depending on variety and technological factors

N. O. Kononiuk

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine
Corresponding author: Nadiia Kononiuk, nadiyakononuk@ukr.net

Citation: Kononiuk, N. O. (2026). Energy efficiency of winter bread wheat cultivation depending on variety and technological factors. *Bioenergy*, 1, 50–58. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp50-58>

Aim. To assess the energy efficiency of winter bread wheat cultivation depending on varietal characteristics and the influence of technological factors. **Methods.** Field experiments were conducted in 2020–2024 in the zone of unstable moisture of the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine at the experimental field of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (50.023194, 30.173895). Energy efficiency indicators were calculated under different levels of fertilisation and agronomic management. **Results.** Total energy inputs for winter wheat cultivation ranged from 53.0 to 83.0 GJ/ha, depending on technology intensity. The cost structure was dominated by two components: fertiliser production and application (44.5–51.1%) and grain drying (37.6–39.9%), which together accounted for 83.8–88.7% of total energy input. Increasing the fertilisation rates from the minimum (N₆₀P₄₀K₄₀) to the maximum (N₁₈₀P₉₀K₉₀ + micronutrients) resulted in a 57% increase in energy inputs, while grain yield increased by only 31%. Energy efficiency declined from 3.02 to 2.68 (–11.3%), while energy intensity increased from 9.91 to 11.11 GJ/t (+12.1%). The transition from the minimum to the medium fertilisation rates had virtually no effect on energy efficiency (3.02 to 3.01); however, further intensification to the maximum rates caused a pronounced decline in energy efficiency (from 3.01 to 2.68). Thus, the medium fertilisation rates represent an energetically optimal compromise. **Conclusions.** Cultivar response to

intensification differed markedly. An intensive-type cultivar maintained a high energy efficiency even under maximum fertilisation rates, whereas a universal-type cultivar showed a sharp reduction in efficiency (–17%), indicating the need for a differentiated, variety-specific technological approach. Plant protection systems (chemical vs biological) and the use of growth retardants (Moddus 250 EC/ Quantum-AquaSil) had only a minor effect on energy efficiency, with the differences of 0.05–0.07, which is close to the threshold of statistical significance. The optimal technological option in terms of energy efficiency was identified as the combination of the cultivar ‘Lehenda Bilotserkivska’ with medium fertilisation rates (N₁₂₀P₆₀K₆₀), chemical crop protection, and application of the growth retardant Moddus 250 EC. This variant achieved an energy efficiency of 3.23, an energy intensity of 9.20 GJ/t, and an energy gain of 174.1 GJ/ha.

Keywords: varietal composition; structure of energy inputs; energy efficiency; biological crop protection; fertilisation rates.

ORCID

Надія Кононюк / Nadiia Kononiuk

<https://orcid.org/0000-0002-5313-4999>