



УДК 633.85:631.5:620.92

## Енергетична ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення

І. В. Царук\* , А. С. Риженко 

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Ніжинський агротехнічний інститут», вул. Шевченка, 10, м. Ніжин, Чернігівська обл., 16600, Україна

\*Автор для листування: Ілля Царук, [illik\\_94@ukr.net](mailto:illik_94@ukr.net)

**Цитування:** Царук І. В., Риженко А. С. Енергетична ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення. *Біоенергетика*. 2026. № 1. С. 84–91. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp84-91>

**Мета.** Установити енергетичну ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення в умовах Лівобережного Лісостепу України та обґрунтувати оптимальні варіанти технології з позицій енергетичного балансу і ресурсоощадності. **Методи.** Дослідження проводили у 2019–2023 рр. в умовах ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут» на чорноземі опідзоленому. Об'єктами дослідження були суріпиця озима сорту 'Оріана', ріпак озимий гібрида 'Мерседес' і тифон сорту 'Оракам'. Культури вирощували за трьох рівнів удобрення: без добрив, N80P60K60 та N120P90K90. Енергетичну ефективність оцінювали за методикою О. К. Медведовського та П. І. Іваненка з використанням стандартних технологічних карт. **Результати.** Сукупні енерговитрати істотно зростали зі збільшенням норм мінерального удобрення: від 16,5–19,7 ГДж/га на контролі до 38,0–41,2 ГДж/га за N80P60K60 і 54,2–57,4 ГДж/га за N120P90K90. Найвищу енергоємність урожаю насіння формували ріпак озимий – 102,1–117,1 ГДж/га, тоді як тифон забезпечував 91,9–103,6 ГДж/га, а суріпиця озима – 59,7–68,1 ГДж/га. Максимальний коефіцієнт енергетичної ефективності (К<sub>е</sub>) за врахування лише товарного насіння встановлено у тифону без удобрення – 5,57; у ріпаку він становив 5,18, у суріпиці – 3,45. За внесення N80P60K60 К<sub>е</sub> у тифону та ріпаку знижувався до 2,73, а у суріпиці – до 1,68. Подальше підвищення норми добрив до N120P90K90 зумовлювало зменшення К<sub>е</sub> до 1,75–2,04, що свідчить про енергетичну недоцільність надмірного удобрення. Найнижчу енергетичну собівартість насіння забезпечував тифон – 4,8 ГДж/т на контролі. За повного використання надземної біомаси К<sub>е</sub> тифону зростав до 20,17. **Висновки.** Оптимальним варіантом удобрення для озимого ріпаку 'Мерседес' і тифону 'Оракам' з позицій комплексної енергетичної ефективності є норма N80P60K60, яка забезпечує високий вихід енергії, прийнятний рівень К<sub>е</sub> та збереження родючості ґрунту. Підвищення норми удобрення до N120P90K90 є енергетично невиправданим. Тифон характеризується найвищою ресурсоощадністю та значним потенціалом використання в біоенергетичних системах за умови комплексної переробки насіння і соломи.

**Ключові слова:** тифон; ріпак озимий; суріпиця озима; енергетична ефективність; коефіцієнт енергетичної ефективності; енерговитрати; мінеральне удобрення; біоенергетика; Лісостеп України.

### Вступ

Сучасні умови ведення сільського господарства в Україні характеризуються нестабільністю цін на енергоносії, мінеральні добрива та сільськогосподарську продукцію, що ускладнює оцінку економічної ефективності технологій вирощування. У цьому контексті енергетичний аналіз

Одержано 26.02.2026 • Погоджено 24.03.2026 • 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.

набуває особливого значення, оскільки дозволяє оцінити баланс між енергією, що надходить у виробничий процес, та енергією, акумульованою в готовій продукції, без прив'язки до коливань ринкових цін [1–3].

Енергетична ефективність технологій вирощування культур родини *Brassicaceae* є особливо актуальним питанням з огляду на їхнє стратегічне значення для біоенергетичної галузі: ріпак озимий слугує сировиною для виробництва біодизелю, а тифон – перспективна культура комплексного використання, надземна маса якої придатна для виробництва твердого біопалива та біогазу. Європейський Союз послідовно посилює регуляторні вимоги щодо вуглецевого сліду продукції, тому енергетична оптимізація технологій вирощування експортно-орієнтованих культур стає не лише економічно, а й екологічно обґрунтованою [4–6].

Питанням енергетичної оцінки технологій вирощування сільськогосподарських культур присвячено фундаментальну роботу О. К. Медведовського та П. І. Іваненка [7]. Сучасні дослідження систем удобрення капустияних культур доводять, що збільшення норм мінерального удобрення зумовлює лінійне зростання врожайності лише до певного рівня, після чого її приріст стає несумірним з додатковими енерговитратами на добрива [8, 9]. Зокрема, В. А. Мазур та ін. [9] установили, що максимальний вихід олії з ріпаку озимого досягається за норми N<sub>240</sub>P<sub>120</sub>K<sub>240</sub>, проте енергетичний баланс таких технологій залишається суперечливим.

За даними попередніх досліджень авторів [10], для нової в Україні культури – тифону сорту ‘Оракам’ – встановлено високу пластичність формування врожайності та виходу енергії з надземної маси за варіантів удобрення N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> та N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>, що відповідає інтенсивним умовам вирощування. Однак комплексний енергетичний аналіз вирощування цієї культури порівняно з традиційними капустияними культурами – ріпаком озимим та суріпицею озимою – у форматі окремого дослідження раніше не проводився.

*Мета дослідження* – установити енергетичну ефективність вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення в умовах Лівобережного Лісостепу України й обґрунтувати оптимальні варіанти технології з погляду енергетичного балансу.

## Матеріали та методи дослідження

Дослідження виконували впродовж 2019–2023 рр. в умовах ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут» (Чернігівська обл.) [10]. Ґрунт – чорнозем опідзолений з вмістом гумусу 3,38–3,76%, мінерального азоту (NH<sub>4</sub> + NO<sub>3</sub>) – 18,6–29,4 мг/кг, рухомого фосфору – 106,6–120,6 мг/кг (за Чириковим), обмінного калію – 50,04–72,2 мг/кг (за Чириковим); рН – 5,7–6,5.

Об'єктами дослідження були три культури родини *Brassicaceae*: суріпиця озима сорту ‘Оріана’, ріпак озимий гібрида ‘Мерседес’ та тифон сорту ‘Оракам’. Усі культури вирощували за ширини міжрядь 15 см на трьох варіантах удобрення: контроль (без добрив), N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> та N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>. Площа елементарної ділянки – 35 м<sup>2</sup>, облікової – 25 м<sup>2</sup>, повторність триразова.

Розрахунок енергетичної ефективності вирощування виконано за методикою О. К. Медведовського та П. І. Іваненка [7] з використанням типових технологічних карт вирощування озимих капустияних культур. Методика передбачає послідовний розрахунок таких показників:

– *Сукупні енерговитрати* (Евх, ГДж/га) – сума енергетичних витрат на всі технологічні операції (механізовані, хімічні, посівні матеріали), у тому числі енергоємність мінеральних добрив (ДЕ N – 86,8 МДж/кг д. р., P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 12,6 МДж/кг д. р., K<sub>2</sub>O – 8,3 МДж/кг д. р.), пального, насіння, засобів захисту рослин;

– *Енергоємність врожаю насіння* (Евих, ГДж/га) – розраховано як добуток урожайності насіння (т/га) на калорійність насіння (для суріпиці – 6280 ккал/кг, ріпаку – 6518 ккал/кг, тифону – 6360 ккал/кг) з перерахунком до ГДж/га;

– *Коефіцієнт енергетичної ефективності* (Кее) – відношення енергоємності врожаю до сукупних енерговитрат (Кее = Евих / Евх); значення Кее > 1 свідчить про енергетичну вигідність технології, Кее = 1 – про беззбитковість;

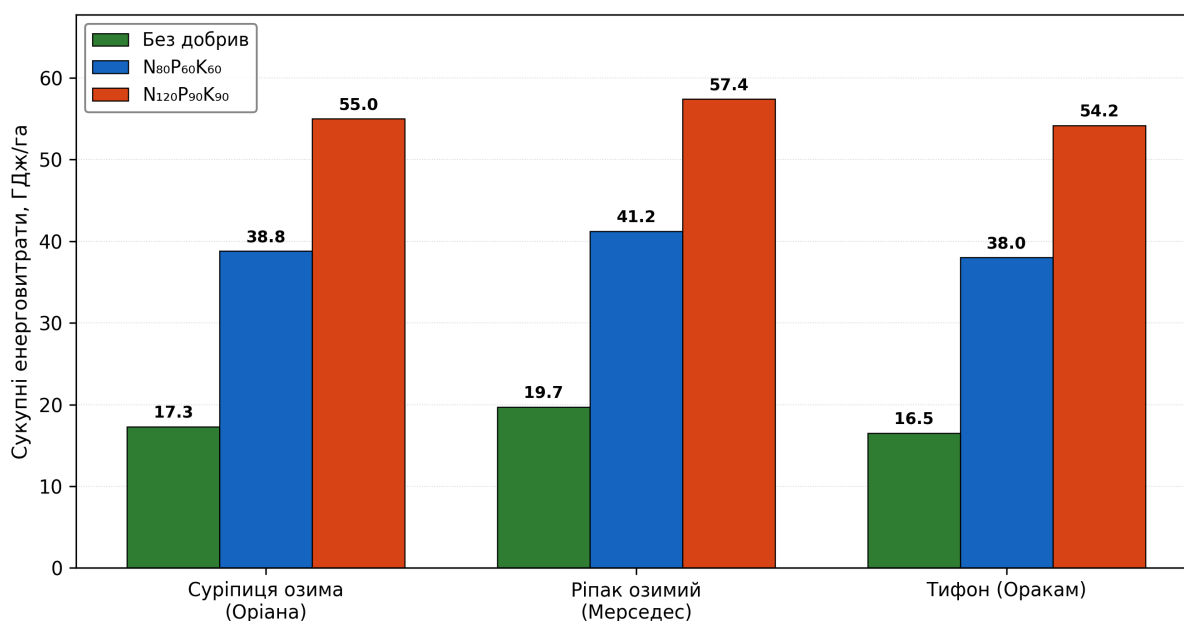
– *Енергоємність 1 т насіння* (ГДж/т) – відношення сукупних енерговитрат до урожайності насіння; характеризує енергетичну собівартість продукції;

– *Чистий приріст енергії* (ΔЕ, ГДж/га) – різниця між енергоємністю врожаю та сукупними енерговитратами.

Базові показники енерговитрат на технологію за варіантами без удобрення взято з технологічних карт вирощування капустяних культур; додаткові енерговитрати від внесення мінеральних добрив розраховано за енергетичними еквівалентами діючої речовини:  $\Delta E$  для  $N_{80}P_{60}K_{60} = 21,5$  ГДж/га, для  $N_{120}P_{90}K_{90} = 37,7$  ГДж/га.

## Результати дослідження

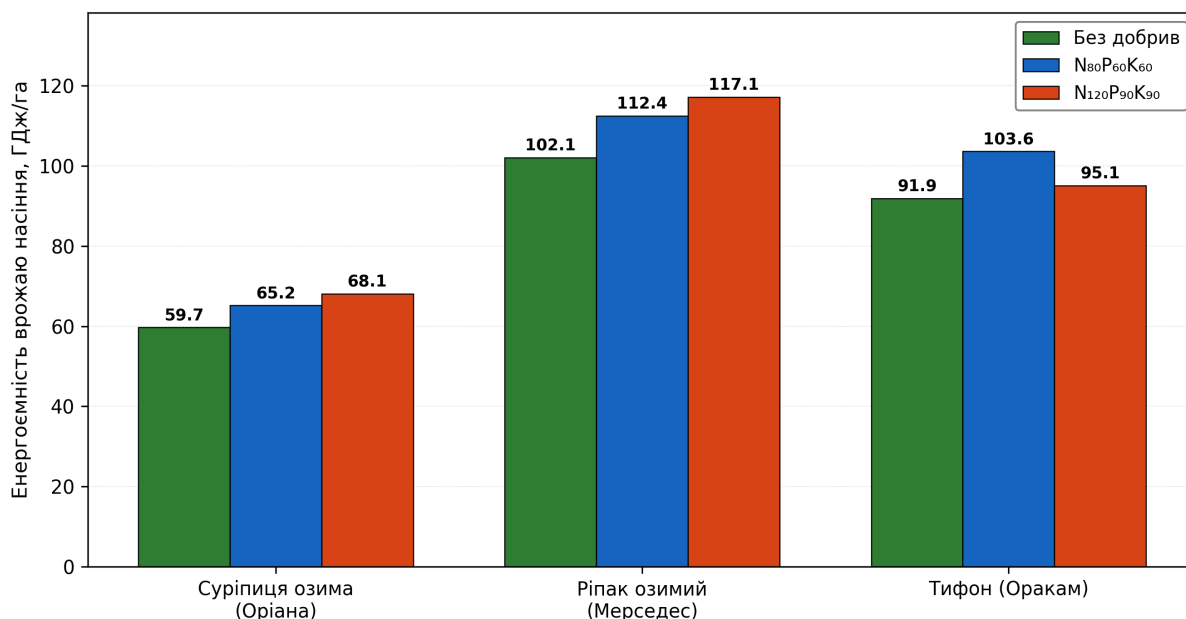
За результатами розрахунків встановлено, що сукупні енерговитрати на технологію вирощування озимих капустяних культур істотно залежать від рівня мінерального живлення (рис. 1). На контрольних варіантах без удобрення енерговитрати становили 16,5 ГДж/га для тифону, 17,3 ГДж/га для суріпиці та 19,7 ГДж/га для ріпаку озимого. Дещо вищий рівень енерговитрат на технології вирощування ріпаку зумовлений підвищеними нормами захисту рослин та насінного матеріалу.



**Рис. 1.** Сукупні енерговитрати на технологію вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення

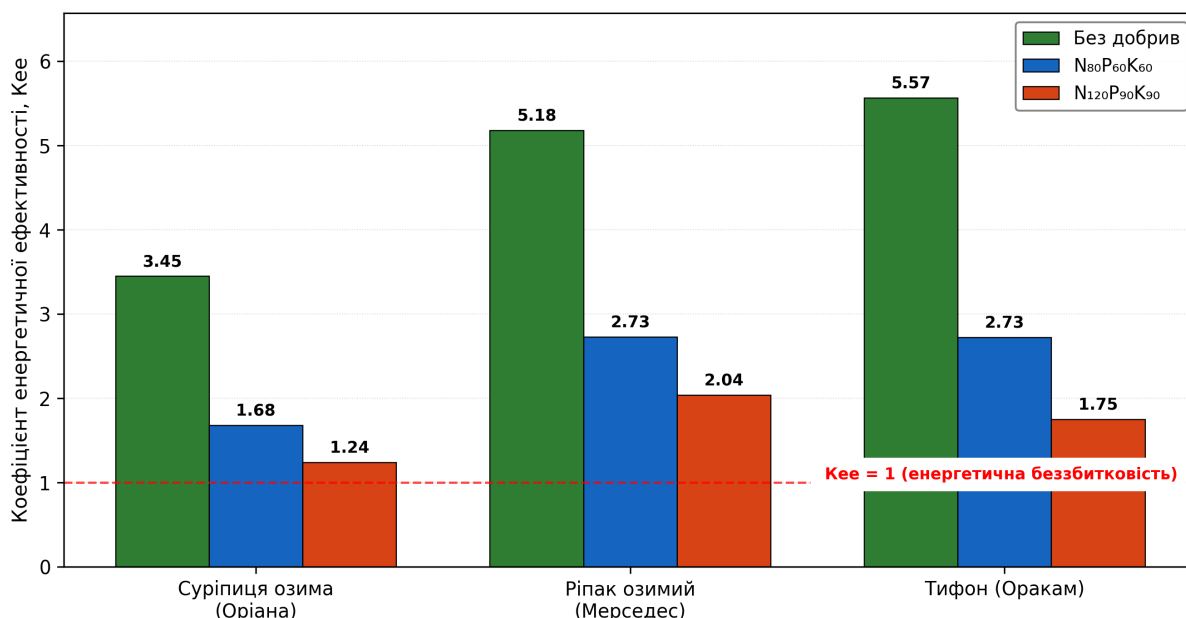
При застосуванні мінерального удобрення енерговитрати зростали в основному за рахунок енергоємної складової добрив. Зокрема, внесення  $N_{80}P_{60}K_{60}$  підвищувало сукупні енерговитрати у 2,1–2,4 раза до 38,0–41,2 ГДж/га, а застосування  $N_{120}P_{90}K_{90}$  – у 2,9–3,3 раза до 54,2–57,4 ГДж/га. Слід підкреслити, що серед усіх компонентів технології саме мінеральне удобрення є найбільш енергозатратним, що зумовлено високою енергоємністю синтетичного азоту (близько 86,8 МДж/кг д. р.). Ця обставина має ключове значення при формуванні рекомендацій щодо оптимальних варіантів удобрення з точки зору енергетичного балансу.

Аналіз енергоємності врожаю насіння (рис. 2) показав, що максимальний показник забезпечує ріпак озимий 'Мерседес' – 102,1; 112,4 та 117,1 ГДж/га на варіантах контролю,  $N_{80}P_{60}K_{60}$  та  $N_{120}P_{90}K_{90}$  відповідно. Тифон 'Оракам' займає друге місце з показниками 91,9; 103,6 та 95,1 ГДж/га, а мінімальну енергоємність врожаю формувала суріпиця озима – 59,7; 65,2 та 68,1 ГДж/га. Зниження енергоємності врожаю тифону при переході від  $N_{80}P_{60}K_{60}$  до  $N_{120}P_{90}K_{90}$  (з 103,6 до 95,1 ГДж/га) є наслідком зниження врожайності насіння на цьому варіанті, що раніше було пояснено особливостями кореневої системи культури [10].



**Рис. 2.** Енергоємність врожаю насіння озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення

Інтегральним показником, що поєднує дані енерговитрат та енергоємності врожаю, є коефіцієнт енергетичної ефективності ( $K_{ee}$ ). За результатами розрахунків (рис. 3) встановлено, що максимальний  $K_{ee}$  забезпечує тифон ‘Оракам’ без застосування добрив – 5,57. Високі показники  $K_{ee}$  на контрольних варіантах характерні і для ріпаку озимого (5,18) та суріпиці озимої (3,45). Це пояснюється тим, що на варіантах без добрив виключається найбільш енергомістка стаття витрат – мінеральне удобрення, тоді як рослини використовують природну родючість ґрунту.



**Рис. 3.** Коефіцієнт енергетичної ефективності ( $K_{ee}$ ) вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* з урахуванням лише товарного насіння

Однак висока енергетична ефективність на контролі досягається ціною поступового виснаження ґрунту, оскільки культури родини *Brassicaceae* характеризуються високим виносом макроелементів з надземною біомасою (тифон – 119,7 кг/га азоту, 50,7 кг/га фосфору, 137,3 кг/га калію та 31,8 кг/га кальцію [10]). Тому довготривале вирощування цих культур без застосу-

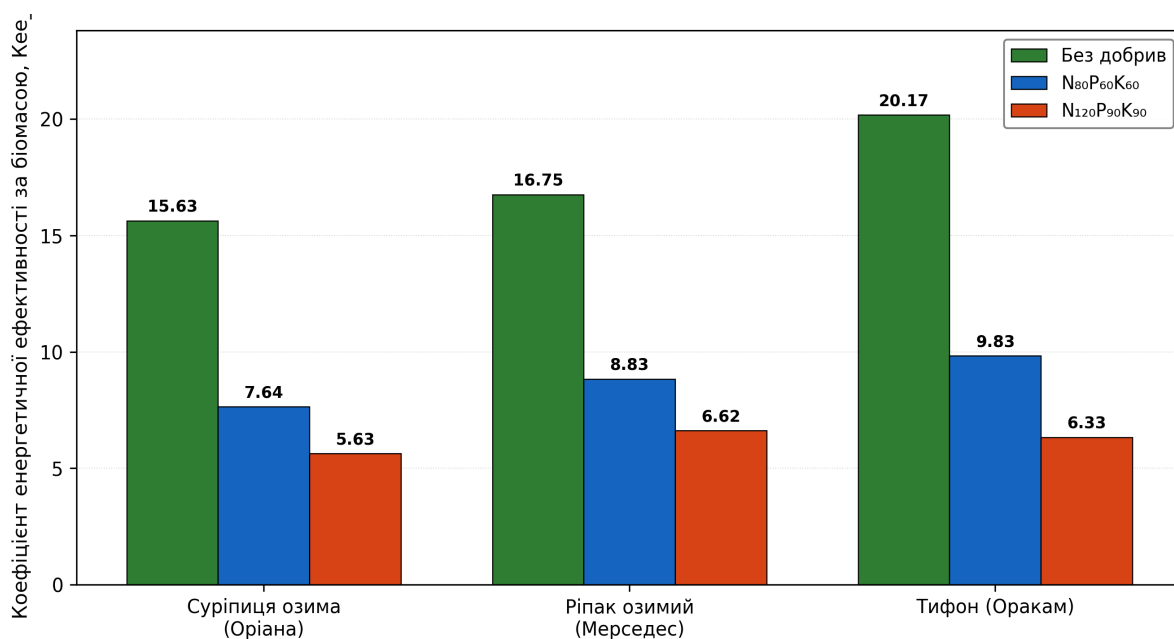
вання мінерального удобрення є неприйнятним з точки зору раціонального природокористування та сталого розвитку аграрного виробництва.

За застосування мінерального удобрення в нормі  $N_{80}P_{60}K_{60}$  Кее тифону та ріпаку озимого виявився практично однаковим – 2,73 в обох випадках, що значно перевищує показник беззбитковості ( $K_{ee} = 1$ ) і свідчить про енергетичну доцільність такого варіанту. Суріпиця озима за аналогічного варіанту удобрення мала Кее лише 1,68, що пов'язано з її нижчою врожайністю та меншою калорійністю насіння.

Підвищення норми мінерального удобрення до  $N_{120}P_{90}K_{90}$  закономірно знижувало Кее в усіх досліджуваних культур: для тифону – до 1,75, для ріпаку – до 2,04, а для суріпиці – до критично низького рівня 1,24, що наближається до межі енергетичної беззбитковості. Цей результат однозначно вказує на те, що застосування підвищених норм добрив під суріпицю озиму є енергетично невиправданим.

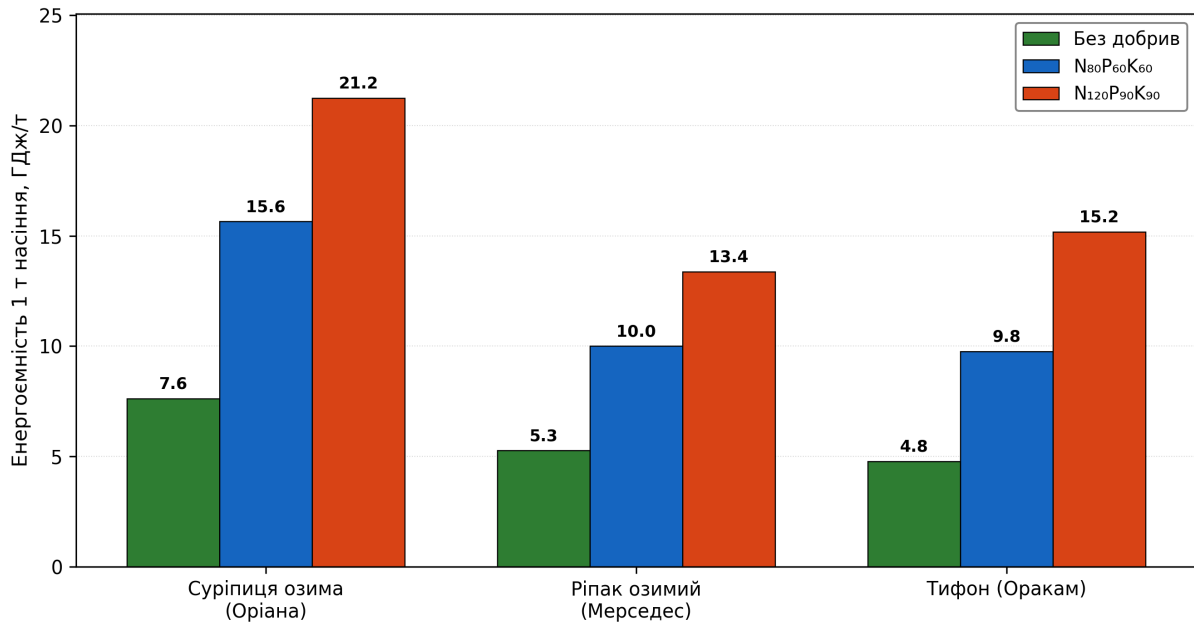
Щодо ріпаку та тифону, то вони демонструють збереження енергетичної вигідності навіть за високих норм удобрення, проте з істотним зниженням Кее, що ставить під сумнів агрономічну доцільність такого підходу.

Цікавим аспектом енергетичного аналізу є оцінка потенціалу комплексного використання надземної біомаси, коли на енергетичні цілі переробляється не лише товарне насіння, а й солома (рис. 4). За такого підходу Кее зростає в кратному обсязі: для тифону на контрольному варіанті він складає 20,17, для ріпаку – 16,75, для суріпиці – 15,63. Навіть при застосуванні  $N_{120}P_{90}K_{90}$  Кее тифону за повного використання біомаси становить 6,33, що демонструє високий біоенергетичний потенціал цієї культури за відповідної організації переробки.



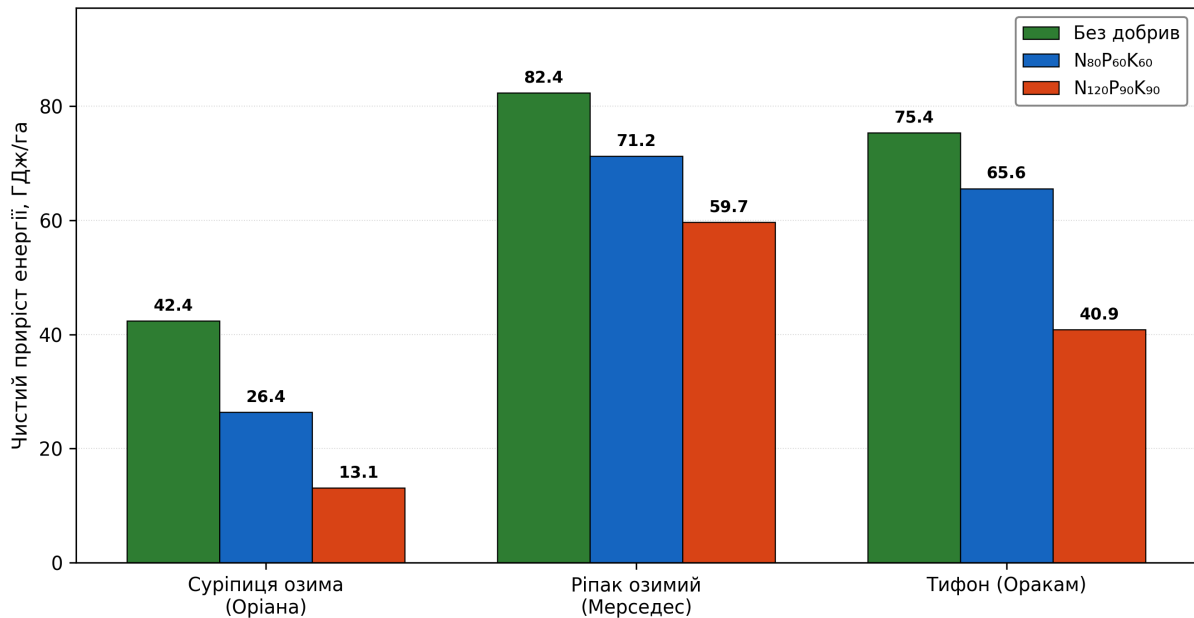
**Рис. 4.** Коефіцієнт енергетичної ефективності (Кее) вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* за повного використання надземної біомаси (насіння + солома) на біоенергетичні цілі

Енергетична собівартість виробництва 1 т насіння (рис. 5) є зворотним показником продуктивності праці та ресурсоощадності. Найнижчу енергетичну собівартість насіння забезпечує тифон 'Оракам' без удобрення – 4,8 ГДж/т, що пояснюється поєднанням високої врожайності з мінімальними енерговитратами. На варіанті  $N_{80}P_{60}K_{60}$  ця величина зростає для тифону до 9,8 ГДж/т, для ріпаку – до 10,0 ГДж/т, а для суріпиці – до 15,6 ГДж/т. Подвоєна норма удобрення  $N_{120}P_{90}K_{90}$  призводить до енергетичної собівартості 13,4–21,2 ГДж/т, причому максимальне значення характерне для суріпиці озимой.



**Рис. 5.** Енергоємність виробництва 1 тонни насіння озимих культур родини *Brassicaceae* залежно від рівня мінерального удобрення

Чистий приріст енергії, який характеризує абсолютну величину енергетичного прибутку з одиниці площі за вирахуванням всіх енерговитрат (рис. 6), є важливим показником, особливо при плануванні великих обсягів виробництва біоенергетичної сировини. За цим показником лідером є тифон 'Оракам' за варіанту удобрення N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> з показником 65,6 ГДж/га (за умови врахування лише товарного насіння). Ріпак озимий за аналогічного варіанту удобрення забезпечує 71,2 ГДж/га, а суріпиця – лише 26,4 ГДж/га.



**Рис. 6.** Чистий приріст енергії за вирощування озимих культур родини *Brassicaceae*

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що з погляду комплексної енергетичної ефективності оптимальним варіантом технології вирощування досліджуваних культур родини *Brassicaceae* в умовах Лівобережного Лісостепу є застосування мінерального удобрення в нормі N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>. Цей варіант поєднує помірний рівень енерговитрат, високий вихід енергії з урожаєм, прийнятний рівень Кеє (2,73 для тифону та ріпаку) та забезпечує підтримку родючості ґрунту. Підвищення норми удобрення до N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> є енергетично невигідним для всіх досліджуваних культур, а особливо критично – для суріпиці озимої.

## Висновки

Сукупні енерговитрати на технологію вирощування озимих культур родини *Brassicaceae* істотно залежать від рівня мінерального удобрення: на варіантах без добрив вони становлять 16,5–19,7 ГДж/га, за внесення N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> зростають до 38,0–41,2 ГДж/га (у 2,1–2,4 раза), а за N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> – до 54,2–57,4 ГДж/га (у 2,9–3,3 раза). Найбільш енергомісткою статтею витрат є мінеральні добрива, насамперед азотні.

Найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності за врахування лише товарного насіння забезпечує тифон ‘Оракам’ без застосування добрив (К<sub>е</sub>е = 5,57); при застосуванні N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> показник знижується до 2,73, а за N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> – до 1,75. Аналогічна тенденція зниження К<sub>е</sub>е зі зростанням рівня удобрення характерна для всіх досліджуваних культур.

Оптимальним варіантом мінерального удобрення з позицій комплексної енергетичної ефективності для тифону ‘Оракам’ та ріпаку озимого ‘Мерседес’ є норма N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> (К<sub>е</sub>е = 2,73 для обох культур, чистий приріст енергії 65,6 та 71,2 ГДж/га відповідно). Для суріпиці озимої ‘Оріана’ навіть помірне удобрення N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> забезпечує лише К<sub>е</sub>е = 1,68, а застосування N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> призводить до критичного зниження ефективності (К<sub>е</sub>е = 1,24).

Енергетична собівартість виробництва 1 т насіння є мінімальною для тифону ‘Оракам’ (4,8 ГДж/т на контролі та 9,8 ГДж/т за N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>), що підтверджує його перспективність як ресурсоощадної біоенергетичної культури для умов Лівобережного Лісостепу України.

За повного використання надземної біомаси (насіння + солома) на біоенергетичні цілі коефіцієнт енергетичної ефективності тифону ‘Оракам’ зростає до 20,17 (контроль) та 9,83 (N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>), що обґрунтовує доцільність розробки комплексних технологій переробки культур родини *Brassicaceae* з утилізацією побічної продукції.

## Список використаних джерел

1. Kalinichenko, O. V. (2018). Theoretical essence of the categories “energy efficiency” and “energy efficiency in crop production”. *Economics of Agro-Industrial Complex*, 10, 86–95. [In Ukrainian]
2. Vozhehova, R., Halchenko, N., Kotelnikov, D., & Maliarchuk, V. (2021). Energy efficiency of technology of cultivation of agricultural crops on the irrigated lands of the South of Ukraine. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine*, 28, 272–281. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28\(42\)-23](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28(42)-23) [In Ukrainian]
3. Humentyk, M. Ya., & Bondar, V. S. (2018). Economic efficiency of high-yielding bioenergy crops for biofuel production. *Bioenergy*, 1, 16–19. [In Ukrainian]
4. Lykhochvor, V. V., & Petrychenko, V. F. (2020). *Crop production. Modern intensive technologies for growing major field crops* (5th ed., rev.). Ukrainian Technologies. [In Ukrainian]
5. Rakhmetov, D. B. (2011). *Theoretical and applied aspects of plant introduction in Ukraine*. Agrar Media Group. [In Ukrainian]
6. Tsaruk, I. V., & Rakhmetov, D. B. (2020). Typhon is a new plant of multifunctional importance. *Taurian Scientific Bulletin*, 112, 157–160. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.112.22> [In Ukrainian]
7. Medvedovskyi, O. K., & Ivanenko, P. I. (1988). *Energy analysis of intensive technologies in agricultural production*. Urozhai. [In Ukrainian]
8. Ren, T., Zou, J., Wang, Y., Li, X. K., Cong, R. H., & Lu, J. W. (2016). Estimating nutrient requirements for winter oilseed rape based on QUEFTS analysis. *The Journal of Agricultural Science*, 154(3), 425–437. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000301>
9. Mazur, V. A., Matsera, O. O., Shkatula, Yu. M., & Zabarnyi, O. S. (2025). *Influence of cultivation technology elements on productivity and seed quality of winter oilseed rape under conditions of the Right-Bank Forest-Steppe*. Vinnytsia National Agrarian University. [In Ukrainian]
10. Tsaruk, I. V., Ryzhenko, A., Kucher, L., Panchuk, T., Moroz, S., Bordyuzha, N., & Bordiuzha, I. (2025). Ecological characteristics of productivity formation in winter *Brassicaceae* crops under different fertilization rates. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(7), 384–391. <https://doi.org/10.12912/27197050/205573>

## Energy efficiency of winter *Brassicaceae* crops under different mineral fertiliser rates

I. V. Tsaruk\*, A. S. Ryzhenko

Separate Structural Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine “Nizhyn Agrotechnical Institute”, 10 Shevchenka St., Nizhyn, Chernihiv Region, 16600, Ukraine

\*Corresponding author: Illia Tsaruk, [illik\\_94@ukr.net](mailto:illik_94@ukr.net)

---

**Citation:** Tsaruk, I. V., & Ryzhenko, A. S. (2026). Energy efficiency of winter *Brassicaceae* crops under different mineral fertiliser rates. *Bioenergy*, 1, 84–91. <https://doi.org/10.47414/be.2026.No1.pp84-91>

---

**Aim.** Evaluate energy efficiency of winter crops belonging to the *Brassicaceae* family under different rates of mineral fertilisers in the Left-Bank Forest Steppe zone of Ukraine. **Methods.** Field experiments were carried out in 2019–2023 at the Nizhyn Agrotechnical Institute of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine on podzolised chernozem soil. The study focused on winter cress (*Brassica rapa* var. *oleifera*) cv. ‘Oriiana’, winter oilseed rape (*Brassica napus*) hybrid ‘Mercedes’, and typhon (*Brassica rapa* × *B. napus*) cv. ‘Orakam’. Three fertiliser treatments were applied: no fertiliser (control), N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> and N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>. Energy efficiency was evaluated using the method developed by Medvedovskiy and Ivanenko based on standard technological charts. **Results.** Total energy inputs increased substantially with increasing fertiliser rates, ranging from 16.5–19.7 GJ/ha in the control to 38.0–41.2 GJ/ha under N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> and 54.2–57.4 GJ/ha under N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>. Winter oilseed rape produced the highest energy output from seed yield (102.1–117.1 GJ/ha), followed by typhon (91.9–103.6 GJ/ha), whereas winter cress produced 59.7–68.1 GJ/ha. The highest energy efficiency, calculated considering only marketable seed, was observed in unfertilised typhon (5.57); corresponding values for winter oilseed rape and winter cress were 5.18 and 3.45, respectively. Application of N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> reduced energy efficiency to 2.73 in typhon and winter oilseed rape and to 1.68 in winter cress. Further increases in fertiliser rates to N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> resulted in a decline in energy efficiency to 1.75–2.04, indicating the energetic inefficiency of excessive fertiliser application. Typhon exhibited the lowest energy cost of seed production, amounting to 4.8 GJ/t in the control treatment. **Conclusions.** When the entire above-ground biomass was utilised, energy efficiency of typhon increased to 20.17. The fertiliser rate N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> was identified as optimal for winter cress ‘Mercedes’ and typhon ‘Orakam’ in terms of overall energy efficiency, providing high energy output while maintaining soil fertility. Increasing fertiliser application to N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> is energetically unjustified. Typhon is characterised by the highest level of resource-use efficiency and demonstrates considerable potential for bioenergy systems when both seed and straw are utilised.

**Keywords:** typhon; winter oilseed rape; winter cress; energy efficiency; energy input; mineral fertiliser; bioenergy; Forest Steppe of Ukraine.

---

### ORCID

Ілля Царук / Illia Tsaruk

<https://orcid.org/0000-0002-7383-1919>

Анатолій Риженко / Anatolii Ryzhenko

<https://orcid.org/0000-0001-7850-9171>