

ВПЛИВ СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ ГІБРИДІВ РІПАКУ ОЗИМОГО НА ЯКІСТЬ ОТРИМАНОЇ ОЛІЇ З НАСІННЯ ЗА КРИТЕРІЯМИ БІОПАЛИВНОГО ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

ЦИЦЮРА Я.Г. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент

orcid.org/0000-0002-9167-833X

Вінницький національний аграрний університет

ТОМЧУК О.М. – аспірант

orcid.org/0000-0002-9167-833X

Вінницький національний аграрний університет

Постановка проблеми. Ріпак озимий (*Brassica napus* L.) є однією з провідних олійних культур світу, що використовується як універсальна сировина для харчової, кормової та енергетичної галузей.

У сучасних умовах зростання попиту на відновлювані джерела енергії ріпак розглядається як одна з ключових культур для біоенергетики, особливо в країнах Європи [1, 2].

Особливе значення він має у виробництві біодизельного палива завдяки високому вмісту олії в насінні (до 40–50%) і сприятливому жирнокислотному складу [3]. Ріпакова олія характеризується високим вмістом мононенасичених жирних кислот (переважно олеїнової), що забезпечує оптимальні фізико-хімічні властивості біодизеля, зокрема високе цетанове число, хорошу текучість та окиснювальну стабільність [4]. Відмічається, що система удобрення є одним із головних факторів, яка визначає якість отриманої олії ріпаку озимого як з позиції її прямого господарчого використання, так і з позиції біоенергетичного подальшого за стосунку [1, 5]

У результатуючому підсумку, конструювання системи удобрення високо інтенсивних гібридів ріпаку озимого з огляду на потенціал їх біоенергетичного використання є питанням, яке потребує додаткового дослідження та узагальнення, особливо для умов України у зв'язку із національними викликами формування енергетичної безпеки держави на фоні виражених тенденцій світової кризи та дефіциту паливно-мастильних матеріалів на світових ринках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Якість ріпакової олії як сировини для біодизеля визначається комплексом показників, серед яких основними є: вміст олії в насінні, жирнокислотний склад, кислотне число, вміст фосфору, сірки та домішок, окиснювальна стабільність [1, 6]. Жирнокислотний склад є визначальним для придатності олії до виробництва біодизеля, оскільки він впливає на в'язкість, температуру застигання та екологічні характеристики пального [7]. Зокрема, підвищений вміст олеїнової кислоти покращує стабільність палива, тоді як надлишок поліненасичених кислот (лінолева, ліноленова) знижує його окиснювальну стійкість [2, 8].

Азот є одним із ключових елементів живлення ріпаку, який визначає як урожайність, так і якість продукції. Встановлено [9], що: підвищення доз азоту сприяє

збільшенню врожайності; надлишок азоту знижує вміст олії та підвищує вміст білка в насінні; змінюється жирнокислотний склад олії, зокрема зменшується вміст олеїнової кислоти при надмірному удобренні.

Крім того, азотне удобрення впливає на кислотне число та перекисне число олії, що визначає її придатність до трансестерифікації при виробництві біодизеля [5, 10]. На молекулярному рівні підвищені дози азоту змінюють експресю генів, пов'язаних із синтезом жирних кислот, що призводить до зменшення накопичення олії в насінні [11].

Сірка є важливим елементом, який бере участь у синтезі білків, ферментів та ліпідів. Її роль у формуванні якості насіння ріпаку полягає у: підвищенні вмісту олії, регуляції жирнокислотного складу, зниженні вмісту глюкозинолатів [7, 12–13]. Сучасні дослідження показують, що оптимальне поєднання азоту та сірки є необхідною умовою формування високоякісної олії [14].

Фосфор і калій забезпечують енергетичні процеси в рослинах та сприяють накопиченню запасних речовин у насінні. При цьому, комплексне застосування NPK: підвищує вміст олії, стабілізує жирнокислотний склад, покращує технологічні властивості сировини [7, 15]. Разом з тим, надмірні дози мінеральних добрив можуть знижувати ефективність вилучення олії та незначно впливати на її якість [16, 17].

Жирнокислотний склад ріпакової олії формується під впливом генотипу, умов вирощування та системи удобрення [18]. Зміна системи удобрення може призводити до: зниження вмісту олеїнової кислоти, збільшення частки поліненасичених кислот, зміни окиснювальної стабільності олії [19, 20].

Для біодизеля оптимальним є високий вміст мононенасичених жирних кислот, що забезпечує кращі експлуатаційні властивості пального [21].

Доведено, що реакція гібридів на удобрення є різною, що зумовлює необхідність індивідуального підходу до формування системи живлення [22–23]. Особливе значення мають сучасні високоолеїнові (НО) та низьколіноленові (HOLL) гібриди, які забезпечують підвищену стабільність біопалива [8].

Метою досліджень було оцінити оптимізований варіант удобрення ріпаку з комбінованим характером дробного основного живлення, бінарної ристрегуляції



та системи позакореневих підживлень на формування якісних показників олії з насіння вирощуваних гібридів з огляду на критерії її біопаливного використання.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження виконували у період 2022–2025 років на виробничій базі ТОВ «ВІН-АГРО ГРУП». Ґрунтові умови дослідної ділянки характеризувалися сірими лісовими ґрунтами з умістом гумусу на рівні 2,00 %. За агрохімічними показниками ґрунт містив 81 мг/кг лужногідролізованого азоту (визначення за Корнфілдом), 171,9 мг/кг рухомого фосфору (за Мачигінім) та 129 мг/кг обмінного калію (за Чиріковим). Реакція ґрунтового розчину становила рН 6,3.

Поставлені у дослідженні завдання реалізовували в межах багатофакторного польового експерименту (табл. 1). Площа облікової ділянки дорівнювала 50 м², загальна площа – 60 м².

Посів проводили у третій декаді серпня, використовуючи норму висіву 500 тис. схожих насінин на гектар. Ширина міжрядь становила 35 см, після сівби виконували коткування. У всіх варіантах досліду попередником була озима пшениця. Підготовка ґрунту включала лущення стерні у два проходи на глибину 6–8 см одразу після збирання попередньої культури, після чого проводили оранку на глибину 23–25 см.

У дослід було включено два гібриди ріпаку озимого різної групи стиглості: середньостиглий Абсолют та середньоранній Домінатор. Система догляду за посівами окрім чинників досліду була одно типовою для всіх варіантів досліду.

Щодобові та помісячні параметри гідротермічних умов за період досліджень послідовно представлено на рис. 1.

Аналіз гідротермічних умов показав, що вегетаційний період 2022/2023 рр. (вересень–березень) був найбільш сприятливим для перезимівлі рослин порівняно з іншими роками дослідження. Це підтверджується відносно стабільним зниженням середньодобової температури восени, яке характеризувалося градієнтом 0,057 °C/добу за умов рівномірного місячного зволоження. Найнижча температура повітря у цей період становила -11,7 °C у першій декаді січня 2023 року, а наступний мінімум -9,0 °C був зафіксований у другій декаді лютого (рис. 1).

Протягом січня–лютого частка днів із додатними температурами була незначною (10,17 % від загальної тривалості періоду до відновлення вегетації). Надалі спостерігалось поступове підвищення температури повітря у фазу весняного відновлення росту ріпаку, коли середньодобовий приріст становив 0,104 °C/добу. Такі умови, у поєднанні з незначним сніговим покривом, сприяли успішній перезимівлі та активізації ростових процесів наприкінці лютого – у середині березня.

Подальший період розвитку рослин до формування та наливу насіння характеризувався поступовим і рівномірним підвищенням температури. Максимальні значення у травні–червні досягали 17,7–22,0 °C.

Веgetаційний сезон 2023/2024 рр. відзначався високою мінливістю температурного режиму. У зимовий період фіксувалося зниження температури до -15 °C, тоді як кінець зими та початок березня характеризувалися аномально теплими умовами із середньодобовою температурою близько +5,8 °C. За відсутності достатнього снігового покриву та частих переходів через 0 °C сформувалися умови чергування замерзання і відтавання, що спричинило додаткове виснаження рослин і уповільнило їх відновлення навесні.

Таблиця 1

Схема досліду з вивчення впливу комбінованої системи удобрення ріпаку озимого на реалізацію показників біоенергетичного потенціалу якості насіння

Гібрид (чинник А)	Основний блок удобрення (чинник В)	Застосування фунгіцидів рїстрегуляторів (чинник С)	Позакореневе підживлення мікродобривами (чинник D)
Абсолют (Limagrain) (A ₁)	<p>Базовий (B₁): Діамофоска (N_{13,1}P_{34,1}K_{34,1} під оранку + N₁₀P₂₆K₂₆ при посіві) + ВВСН 20: карбамід (N_{76,9} весною по мерзлоталому ґрунту) Норма внесення для варіанту – N₁₀₀P₆₀K₆₀</p> <p>Поліпшений (B₂): Діамофоска + 1S (N_{14,4}P_{37,4}K_{37,4}S_{1,5} під оранку) + Росаферт 15-15-15 (N_{22,5}P_{22,5}K_{22,5}S_{22,5} при посіві) + ВВСН 20: КАС-32 (N_{60,5}) + Тіосульфат амонію (N_{2,6}S_{6,0}) (весною по мерзлоталому ґрунту) Норма внесення для варіанту – N₁₀₀P₆₀K₆₀S₃₀</p>	<p>Контроль (без ріст регуляції, обробка водою) (C₁)</p> <p>**ВВСН 14–16 + ВВСН 35–39: Карамба Турбо (0,65 л/га) + Букат (0,35 л/га) (C₂)</p>	<p>Без підживлень (контроль, обробка водою) (D₁)</p> <p>ВВСН 31–34: Розалік (В) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (D₂)</p> <p>ВВСН 51–53: Розасоль 18-18-18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (D₃)</p> <p>Комбінація варіантів D₂ та D₃ (D₄)</p>

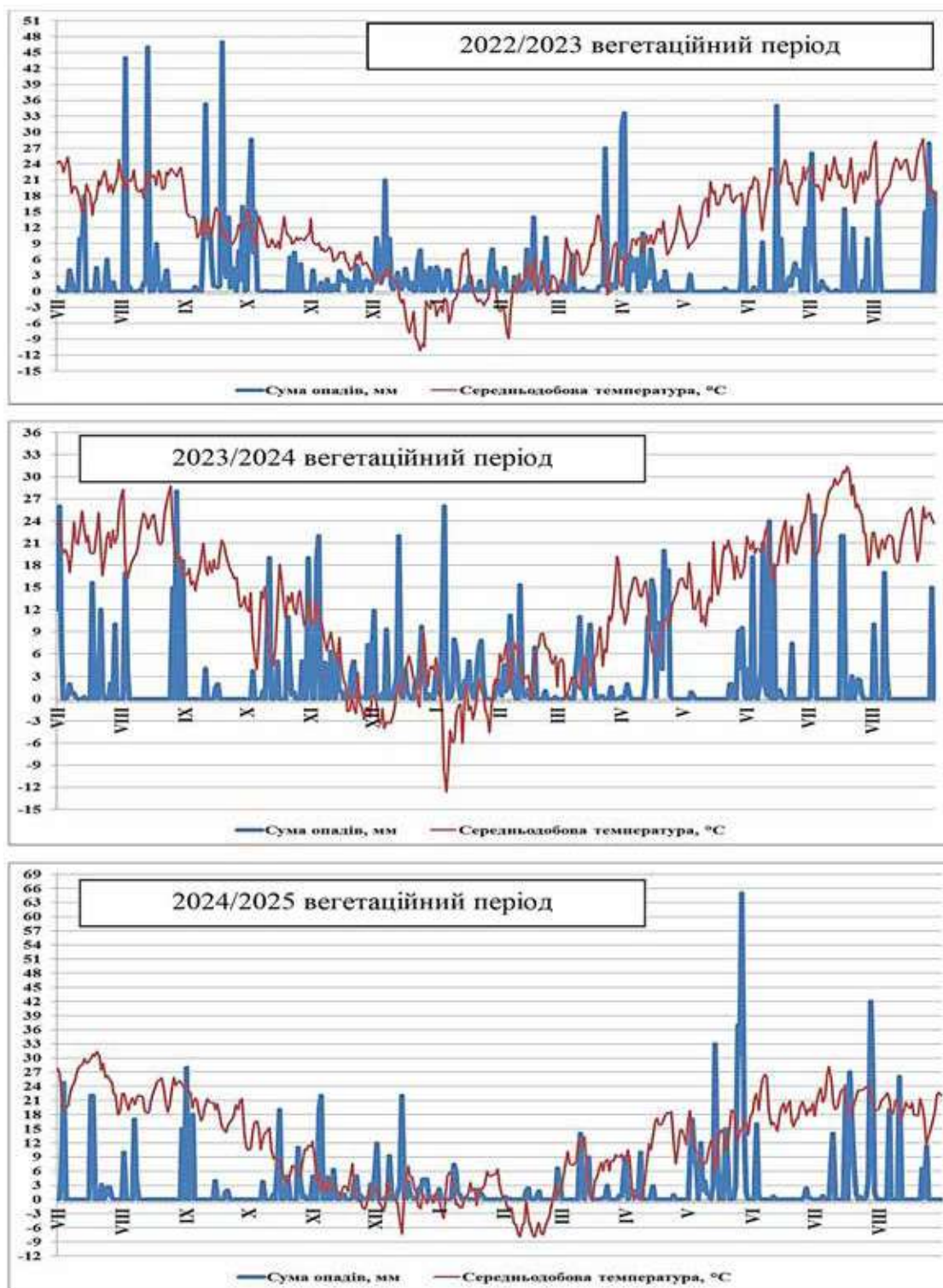


Рис. 1. Гідротермічний режим періодів вегетації ріпаку озимого за повний цикл досліджень, 2022–2025 рр. (за даними датчико-логерної метеостанції (WMO_ID=33562) (49°14'60" пн. ш. 28°31'60" сх. д. на висоті 295 метрів над рівнем моря))

У весняно-літній період цього року середня температура становила 18,2 °С, а відносна вологість повітря – 66,7 %. Водночас опади розподілялися нерівномірно (коефіцієнт варіації 36,9 %), а їх сума

за квітень – початок липня становила 268,7 мм. Така ситуація призвела до нестабільного водного режиму з короткочасними посушливими періодами тривалістю 5–8 діб, що створювало додатковий абіотичний стрес

для рослин та впливало на формування продуктивності.

Умови 2024/2025 вегетаційного періоду суттєво відрізнялися від попередніх років. Середньодобова температура у березні–травні була нижчою в середньому на 5,4 °С порівняно з 2022/2023 рр. і на 6,9 °С – порівняно з 2023/2024 рр. У першій декаді травня спостерігалися зниження температури до 0 °С та нічні приморозки, що спричинило ушкодження центрального стебла. У результаті врожайність у варіантах дослідів зменшилася на 0,5–0,7 т/га порівняно з 2022–2023 рр.

Якісні показники насіння та олії гібридів ріпаку озимого визначали у сертифікованій лабораторії ПрАТ «Вінницький ОЖК» відповідно до вимог ДСТУ 4966:2008 [24]. Для аналізу застосовували інфрачервоний аналізатор AgriCheck (Bruins Instruments, Німеччина). Жирнокислотний склад встановлювали методом газорідинної хроматографії згідно з ДСТУ EN ISO 12966-4:2019 [25] із використанням газового хроматографа Хроматек-Кристал 5000.

Оцінювання придатності олії, отриманої з різних варіантів дослідів, здійснювали за системою показників, наведених у [26]. До них належали: коефіцієнт подовження (ER), коефіцієнт десатурації (DR), коефіцієнт десатурації олеїнової кислоти (ODR), коефіцієнт десатурації лінолевої кислоти (LDR), співвідношення насичених і ненасичених жирних кислот (S/U) та співвідношення поліненасичених і мононенасичених жирних кислот (PU/MU).

$$ER = \frac{C_{20:1} + C_{22:1}}{C_{20:1} + C_{22:1} + C_{18:1} + C_{18:2} + C_{18:3}} \quad (1)$$

$$R = \frac{C_{18:2} + C_{18:3}}{C_{20:1} + C_{22:1} + C_{18:1} + C_{18:2} + C_{18:3}} \quad (2)$$

$$ODR = \frac{C_{18:2} + C_{18:3}}{C_{18:1} + C_{18:2} + C_{18:3}} \quad (3)$$

$$LDR = \frac{C_{18:3}}{C_{18:2} + C_{18:3}} \quad (4)$$

де: C18:1, C18:2...C22:1 – частка відповідних жирних кислот у структурі, %

$$\frac{S}{U} = \frac{\text{Частка насичених жирних кислот}(\%)}{\text{Частка ненасичених жирних кислот}(\%)} \quad (5)$$

$$\frac{PU}{MU} = \frac{\text{Частка поліненасичених жирних кислот}(\%)}{\text{Частка мононенасичених жирних кислот}(\%)} \quad (6)$$

Для прогнозного визначення показників якості біопалива, отриманого з олії насіння у різних варіантах дослідів, відповідно до вимог ДСТУ EN 14214:2019 [27], застосовували розрахункову програму Rapeseed_Biodiesel_Full_FA_Profile.

Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали із використанням загальноприйнятих методів дисперсійного аналізу. Розрахунки виконували за допомогою програмного пакета Statistica 10.0.

Результати досліджень. Аналіз середніх значень показників якості олії, отриманої у різних варіантах дослідів, дозволив встановити вплив агротехнічних факторів на формування критеріїв придатності ріпакової олії для біоенергетичного використання.

Для гібриду Домінатор (табл. 2) порівняння варіантів із застосуванням регуляторів росту та дворазового позакореневого підживлення на фоні вдосконаленої системи основного удобрення показало збільшення вмісту насичених жирних кислот на 0,37 %, а також зростання частки мононенасичених на 2,0 %. Водночас відмічено зменшення частки поліненасичених жирних кислот на 2,4 %.

На цьому тлі простежується стабільне зниження середніх значень коефіцієнта десатурації лінолевої кислоти, співвідношення поліненасичених до мононенасичених жирних кислот, а також загального коефіцієнта десатурації. Це свідчить про певну перебудову жирнокислотного складу в напрямку більш стабільної біохімічної структури олії, що може позитивно впливати на її технологічні властивості та ефективність використання для виробництва біодизелю. Найбільш виражені відмінності спостерігалися між крайніми варіантами дослідної схеми.

Для гібриду Абсолют (табл. 3) загальна тенденція формування показників була подібною, за винятком частки насичених жирних кислот, яка, на відміну від Домінатора, демонструвала зростання.

Варто підкреслити, що, як зазначалося раніше, важливим є не лише рівень урожайності олії, але й оцінка її придатності для подальшого використання в біоенергетичних цілях відповідно до завдань дослідження.

Зокрема вважається, що жирнокислотний склад насіння олії ріпаку озимого визначає ряд важливих експлуатаційних властивостей майбутнього біодизеля, а саме: холодотекучість, цетанове число, окиснювальну стабільність і в'язкість [8, 12].

Встановлено, що насичені жирні кислоти – пальмітинова (C16:0), стеаринова (C18:0) та арахінова (C20:0) – позитивно впливають на підвищення цетанового числа біодизеля. Це, у свою чергу, забезпечує більш рівномірне згоряння палива, а також сприяє підвищенню його термічної та окиснювальної стабільності, що проявляється у сповільненні процесів біохімічного старіння [3]. Водночас збільшення їх частки у складі біопалива може призводити до погіршення низькотемпературних властивостей, зокрема підвищення схильності до кристалізації [8].

Мононенасичені жирні кислоти, до яких належать олеїнова (C18:1), ейкозенова (C20:1), гондоєва (C20:1) та ерукова (C22:1), є ключовим компонентом, що визначає експлуатаційні характеристики біодизеля. Вони сприяють оптимізації холодотекучості, підвищують окиснювальну стабільність, забезпечують належне цетанове число та регулюють в'язкість у межах вимог стандарту EN 14214 [27]. Особливо важливе значення має олеїнова кислота, яка вважається бажаним компонентом високоякісного біопалива, тому ріпакова олія з її

Таблиця 2

Показники біоенергетичної якості жирнокислотного складу олії з насіння гібриду ріпаку озимого Домінатор залежно від варіантів досліду поставлених на вивчення (2023–2025 рр.), %

Основний юлок удобрення (чинник В)	Регулятор росту (чинник С)	Підживлення (чинник D)	Частка насичених жирних кислот, %	Частка мононенасичених жирних кислот, %	Частка поліненасичених жирних кислот, %	Коефіцієнти якості					
						коефіцієнт подовження (ER)	коефіцієнт десатурації (DR)	коефіцієнт десатурації олеїнової кислоти (ODR)	коефіцієнт десатурації лінолевої кислоти (LDR)	коефіцієнт співвідношення насичених і ненасичених жирних кислот (S/U)	коефіцієнт співвідношення поліненасичених та мононенасичених жирних кислот (PU/MU)
Базовий (В ₁)	С ₁	D ₁	7,00	65,35	27,65	0,006	0,299	0,301	0,296	0,075	0,423
		D ₂	7,02	65,44	27,54	0,007	0,297	0,299	0,293	0,076	0,421
		D ₃	7,07	65,59	27,34	0,007	0,295	0,297	0,294	0,076	0,417
		D ₄	7,09	65,74	27,17	0,007	0,293	0,295	0,294	0,076	0,413
	С ₂	D ₁	7,01	65,34	27,65	0,006	0,299	0,300	0,294	0,075	0,423
		D ₂	7,02	65,53	27,45	0,007	0,296	0,298	0,295	0,076	0,419
		D ₃	7,01	65,52	27,47	0,007	0,296	0,298	0,295	0,075	0,419
		D ₄	7,03	65,59	27,38	0,007	0,295	0,297	0,293	0,076	0,417
Поліпшений (В ₂)	С ₁	D ₁	7,23	66,47	26,3	0,008	0,285	0,287	0,273	0,078	0,396
		D ₂	7,27	66,66	26,07	0,008	0,282	0,285	0,273	0,078	0,391
		D ₃	7,27	66,72	26,01	0,008	0,281	0,283	0,272	0,078	0,390
		D ₄	7,31	66,76	25,93	0,008	0,280	0,283	0,269	0,079	0,388
	С ₂	D ₁	7,16	66,99	25,85	0,008	0,279	0,282	0,276	0,077	0,386
		D ₂	7,27	67,09	25,64	0,008	0,277	0,280	0,277	0,078	0,382
		D ₃	7,25	67,26	25,49	0,008	0,275	0,277	0,276	0,078	0,379
		D ₄	7,37	67,37	25,26	0,008	0,273	0,275	0,277	0,080	0,375

Примітка. С₁, С₂ – варіанти відповідно без рістрегуляції та з нею. D₁ – Без підживлення; D₂ – ВВСН 31–34: Розалік (В) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га); D₃ – ВВСН 51–53: Розасоль 18-18-18+ME (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га); D₄ – комбінація варіантів D₂ та D₃.

підвищеним вмістом є більш придатною для біоенергетичного використання [17].

На відміну від попередньої групи, поліненасичені жирні кислоти (лінолева С18:2, ліноленова С18:3, ейкозадієнова С20:2 та інші, див. Додаток Я) негативно впливають на стабільність біопалива. Їх висока частка сприяє утворенню смолистих сполук, пероксидів і осадів, знижує цетанове число та прискорює процеси старіння пального, що скорочує термін його зберігання [4, 6, 8, 10, 12]. Зокрема, підвищений вміст ліноленової кислоти (С18:3) істотно збільшує ризик оксидативної полімеризації [13, 16]. Разом із тим ця група жирних кислот позитивно впливає на низькотемпературні властивості палива. Водночас відповідно до вимог стандарту EN 14214 вміст ліноленової кислоти обмежується рівнем ≤ 12 % з метою забезпечення стабільності біодизельної суміші [27].

За умов комбінованого впливу підвищеного рівня основного удобрення, застосування регуляторів росту та дворазового внесення мікродобрив у порівнянні з мінімальним варіантом (В1С1D1) встановлено закономірності зміни профілю жирних кислот, які наведено на рис. 2.

З урахуванням попередньо встановленого впливу окремих жирних кислот на прогнозовані властивості біопалива, результати проведених досліджень підтвердили можливість цілеспрямованого регулювання жирнокислотного складу ріпакової олії, а отже й характеристик біодизеля, отриманого з неї. Застосування найбільш інтенсивного варіанту технології вирощування ріпаку озимого для обох досліджуваних гібридів сприяло підвищенню частки олеїнової кислоти (С18:1) у середньому на 3,30–3,65 % залежно від генотипу. Одночасно спостерігалось зменшення вмісту лінолевої (С18:2) та ліноленової (С18:3) кислот відповідно на 2,3–6,4 % і 14,7–21,7 %.

Найбільш суттєвим результатом стало зниження частки ліноленової кислоти (С18:3), що є позитивним чинником з точки зору підвищення стабільності біопалива [22, 28]. Крім того, оптимізація технологічних елементів вирощування забезпечила збільшення вмісту насичених жирних кислот – пальмітинової (С16:0), стеаринової (С18:0) та арахінової (С20:0) – у середньому на 13,5–14,8 %. У комплексі ці зміни свідчать про покращення загального жирнокислотного профілю олії за рахунок поєднання оптимізованої системи основного

Таблиця 3

Показники біоенергетичної якості жирнокислотного складу олії з насіння гібриду ріпаку озимого Абсолют залежно від варіантів досліду поставлених на вивчення (2023–2025 рр.), %

Основний юлок удобрення (чинник В)	Регулятор росту (чинник С)	Підживлення (чинник D)	Частка насичених жирних кислот, %	Частка мононенасичених жирних кислот, %	Частка поліненасичених жирних кислот, %	Коефіцієнти якості					
						коефіцієнт подовження (ER)	коефіцієнт десатурації (DR)	коефіцієнт десатурації олейнової кислоти (ODR)	коефіцієнт десатурації лінолевої кислоти (LDR)	коефіцієнт співвідношення насичених і ненасичених жирних кислот (S/U)	коефіцієнт співвідношення поліненасичених та мононенасичених жирних кислот (P/U/MU)
Базовий (В ₁)	С ₁	D ₁	6,84	65,94	27,22	0,009	0,293	0,296	0,326	0,073	0,413
		D ₂	6,75	66,11	27,14	0,009	0,292	0,295	0,325	0,072	0,411
		D ₃	6,75	66,16	27,09	0,010	0,292	0,294	0,324	0,072	0,409
		D ₄	6,76	66,24	27,00	0,010	0,290	0,293	0,323	0,073	0,408
	С ₂	D ₁	6,79	66,00	27,21	0,009	0,293	0,296	0,325	0,073	0,412
		D ₂	6,73	66,06	27,21	0,009	0,293	0,296	0,324	0,072	0,412
		D ₃	6,76	66,13	27,11	0,010	0,291	0,294	0,324	0,073	0,410
		D ₄	6,73	66,27	27,00	0,010	0,290	0,293	0,321	0,072	0,407
Поліпшений (В ₂)	С ₁	D ₁	6,72	67,77	25,51	0,009	0,274	0,277	0,304	0,072	0,376
		D ₂	6,72	67,89	25,39	0,010	0,273	0,276	0,295	0,072	0,374
		D ₃	6,72	67,96	25,32	0,010	0,272	0,274	0,293	0,072	0,373
		D ₄	6,64	68,05	25,31	0,010	0,271	0,274	0,288	0,071	0,372
	С ₂	D ₁	6,84	67,83	25,33	0,009	0,273	0,275	0,296	0,073	0,373
		D ₂	6,88	67,93	25,19	0,009	0,271	0,274	0,290	0,074	0,371
		D ₃	6,86	68,05	25,09	0,010	0,270	0,272	0,287	0,074	0,369
		D ₄	6,78	68,25	24,97	0,010	0,268	0,271	0,280	0,073	0,366

Примітка. С₁, С₂ – варіанти відповідно без рістрегуляції та з нею. D₁ – Без підживлення; D₂ – ВВСН 31–34: Розалік (В) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га); D₃ – ВВСН 51–53: Розасоль 18-18-18+ME (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га); D₄ – комбінація варіантів D₂ та D₃.

удобрення, застосування регуляторів росту та позакореневих підживлень (рис. 3). Це формує більш сприятливі передумови для отримання якіснішої сировини для біопаливного використання.

Для обох досліджуваних гібридів зафіксовано підвищення частки мононенасичених жирних кислот у середньому на 3,1–3,5 % у відносному вимірі. Саме ця група сполук має визначальне значення для формування якісних характеристик біопалива, отриманого з ріпакової олії [12, 27].

Додатково встановлено зменшення коефіцієнта співвідношення поліненасичених і мононенасичених жирних кислот (P/U/MU) на 11,3 % у однаковій мірі для обох гібридів. Це сприяє відносному зростанню частки насичених і мононенасичених кислот у загальному профілі олії. Відповідно до літературних даних [8, 16], такі зміни позитивно впливають на технологічні властивості як олії, так і біодизеля, отриманого з неї, підвищуючи його експлуатаційну якість. Результати розрахунку основних показників прогнозованого біодизеля, отриманого з олії дослідних варіантів згідно з вимогами європейського стандарту EN 14214 [27], для гібридів Домінатор та Абсолют наведено відповідно у таблицях 4–5.

Відповідно до вказаного стандарту EN 14214 [27] ідеальні показники для біодизеля з ріпакової олії є наступними: цетанове число 52–55 (оптимум 55), кінематична в'язкість 3,5–5,0 мм²/с в ідеальному варіанті 4,5 мм²/с, щільність 0,860–0,900 г/см³ (оптимальна на нижньому порозі в інтервалі 0,865–0,875 г/см³), теплота згорання 37–40 МДж/кг і з врахуванням, що цей показник для звичайного дизеля в інтервалі 42–45 МДж/кг – вище його значення в біодизеля є бажаним.

З урахуванням виявленої динаміки показників для обох гібридів встановлено, що отримана в досліді ріпакова олія за прогнозними оцінками відповідає параметрам класичного біодизеля, зокрема характеризується близьким до оптимального рівнем кінематичної в'язкості. При цьому простежується чітка тенденція до покращення основних енергетичних і експлуатаційних характеристик, таких як кінематична в'язкість, цетанове число та теплота згорання.

Хоча абсолютні зміни окремих показників можуть здаватися незначними, у порівнянні між крайніми варіантами технологічної схеми вони мають відчутний вплив на кінцеву якість біодизеля, отриманого з відповідної сировини. Найвищі значення комплексних показників

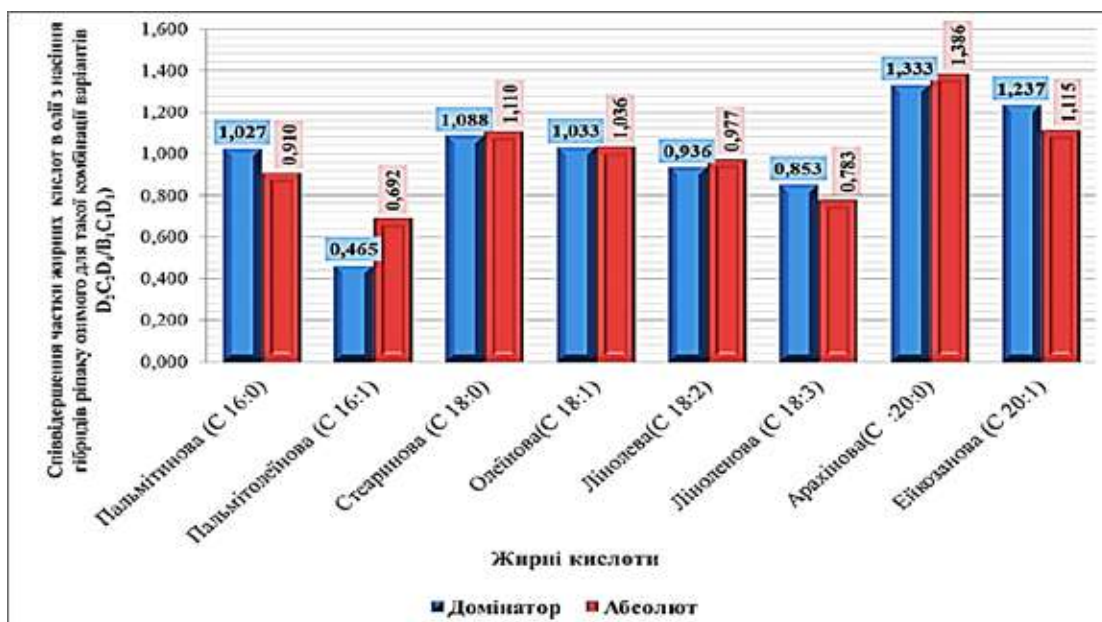


Рис. 2. Коефіцієнти співвідношення вмісту жирних кислот в олії з насіння гібридів ріпаку озимого при порівнянні варіантів дослід у комбінації факторів $V_2C_2D_4$ до $V_1C_1D_1$.

Примітка. V_1 – варіант базового основного блоку удобрення; V_2 – варіант поліпшеного основного блоку удобрення; C_1, C_2 – варіанти відповідно без рістрегуляції та з нею. D_1 – Без підживлення; D_4 – комбінація варіантів: D_2 – ВВСН 31–34: Розалік (В) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га); D_3 – ВВСН 51–53: Розасоль 18-18-18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га).

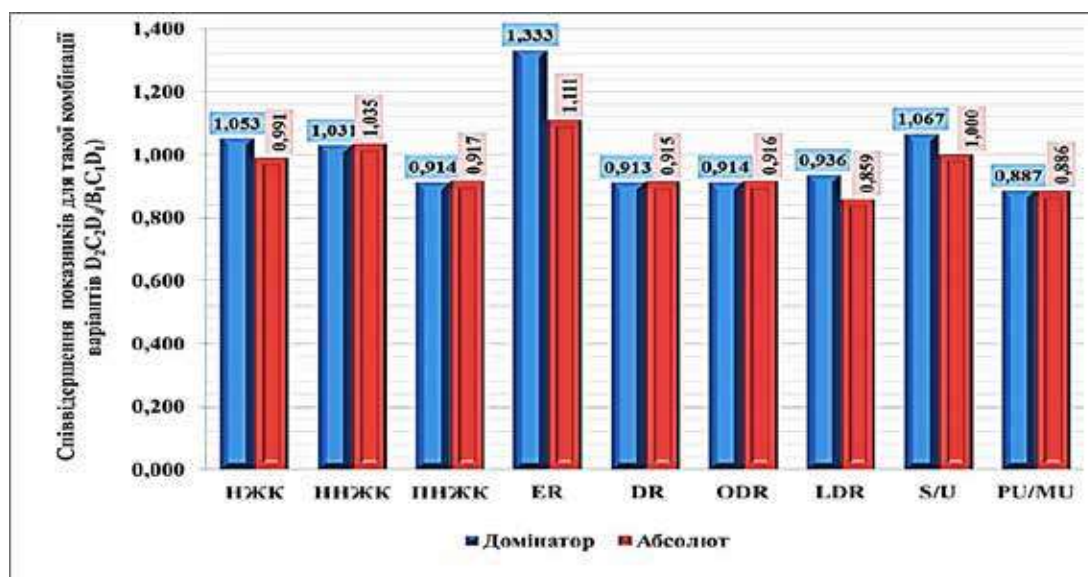


Рис. 3. Показники біоенергетичної якості жирнокислотного складу олії з насіння гібриду ріпаку при порівнянні варіантів дослід у комбінації факторів $V_2C_2D_4$ до $V_1C_1D_1$.

Примітка. V_1 – варіант базового основного блоку удобрення; V_2 – варіант поліпшеного основного блоку удобрення; C_1, C_2 – варіанти відповідно без рістрегуляції та з нею. D_1 – Без підживлення; D_4 – комбінація варіантів: D_2 – ВВСН 31–34: Розалік (В) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га); D_3 – ВВСН 51–53: Розасоль 18-18-18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га). НЖК – частка насичених жирних кислот, %; ННЖК – частка мононенасичених жирних кислот, %; ПНЖК – частка поліненасичених жирних кислот, % ER – коефіцієнт подовження; DR – коефіцієнт десатурації; ODR – коефіцієнт десатурації олеїнової кислоти; LDR – коефіцієнт десатурації лінолевої кислоти S/U – коефіцієнт співвідношення насичених і ненасичених жирних кислот; PU/MU – коефіцієнт співвідношення поліненасичених та мононенасичених жирних кислот.

Таблиця 5

Прогнозовані показники якості біодизелю отриманого з олії гібриду ріпаку озимого Абсолют залежно від варіантів досліду поставлених на вивчення (середнє за 2023–2025 рр.)*

Основний блок удобрення (В)	Регулятор росту (С)	Позакореневе підживлення (D)	Щільність, г/см ³	Кінематична в'язкість, мм ² /с	Цетанове число	Теплота згоряння, МДж/кг	
Базовий (В ₁): (Діамофоска 231 кг/га (131 кг/га під оранку + ВВСН 00: 100 кг/га при посіві) ВВСН 20: карбамід (167 кг/га) (по мерзлоталому ґрунту весною) Норма: N ₁₀₀ P ₆₀ K ₆₀	Контроль без обробки (С ₁)	Без підживлення (D ₁)	0,879	4,212	53,658	39,506	
		ВВСН 31–34: Розалік (В) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (D ₂)	0,878	4,220	53,715	39,503	
		ВВСН 51–53: Розасоль 18-18- 18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (D ₃)	0,878	4,222	53,736	39,506	
		Комбінація варіантів D ₂ та D ₃ (D ₄)	0,878	4,224	53,773	39,508	
	ВВСН 14–16 + ВВСН 35–39: Карамба Турбо (0,65 л/га) + Букат (0,35 л/га) (С ₂)	D ₁	0,878	4,218	53,692	39,505	
		D ₂	0,878	4,220	53,698	39,505	
		D ₃	0,878	4,221	53,733	39,506	
		D ₄	0,878	4,224	53,772	39,508	
	Поліпшений (В ₂): (Діамофоска +1S (144 кг/га під оранку) + ВВСН 00: Росаферт 15-15-15 (150 кг/га при посіві); ВВСН 20: КАС-32 (189 л/га) + Тіосульфат амонію (22 л/га)) (по мерзлоталому ґрунту весною) Норма: N ₁₀₀ P ₆₀ K ₆₀ S ₃₀	С ₁	D ₁	0,877	4,243	54,204	39,623
			D ₂	0,877	4,247	54,274	39,625
D ₃			0,877	4,249	54,302	39,626	
D ₄			0,877	4,251	54,314	39,626	
С ₂		D ₁	0,877	4,247	54,301	39,626	
		D ₂	0,876	4,251	54,377	39,629	
		D ₃	0,876	4,253	54,412	39,630	
		D ₄	0,875	4,257	54,461	39,638	

Примітка. Розраховано за використання Excel Rapeseed_Biodiesel_Full_FA_Profile на підставі структури жирнокислотного складу

якості були досягнуті у варіанті максимального поєднання елементів оптимізації технології вирощування ріпаку озимого (комбінація В₂С₂Д₄). Саме цей підхід забезпечив формування найбільш якісного та енергетично цінного біопалива.

У порівнянні з мінімальним варіантом інтенсифікації (В₁С₁Д₁) встановлено підвищення цетанового числа в середньому на 0,761 у гібриду Домінатор та на 0,803 у гібриду Абсолют. Також зафіксовано зниження кінематичної в'язкості відповідно на 0,033 і 0,045 мм²/с, а також збільшення теплоти згоряння на 0,126 та 0,132 МДж/кг.

Висновок. Доведено, що жирнокислотний склад ріпакової олії істотно залежить від агротехнологічних факторів. Порівняно з мінімальним варіантом досліду, застосування регуляторів росту, дворазових

позакореневих підживлень та оптимізованої системи основного удобрення призводило до збільшення частки насичених жирних кислот на 0,37 %, мононенасичених – на 2,0 %, при одночасному зменшенні поліненасичених – на 2,4 %. Також спостерігалося зниження коефіцієнтів десатурації лінолевої кислоти, співвідношення поліненасичених до мононенасичених жирних кислот та загального коефіцієнта десатурації.

Встановлено покращення якості ріпакової олії як сировини для біопалива у варіанті максимальної оптимізації технології вирощування. Це проявлялося у зростанні цетанового числа на 0,761–0,803 одиниці, зниженні кінематичної в'язкості на 0,033–0,045 мм²/с та підвищенні теплоти згоряння на 0,126–0,132 МДж/кг залежно від гібриду.

Таблиця 4

Прогнозовані показники якості біодизелю отриманого з олії гібриду ріпаку озимого Домінатор залежно від варіантів досліду поставлених на вивчення (середнє за 2023–2025 рр.)*

Основний блок удобрення (В)	Регулятор росту (С)	Позакореневе підживлення (D)	Щільність, г/см ³	Кінематична в'язкість, мм ² /с	Цетанове число	Теплота згоряння, МДж/кг	
Базовий (В ₁): (Діамофоска 231 кг/га (131 кг/га під оранку + ВВСН 00: 100 кг/га при посіві) ВВСН 20: карбамід (167 кг/га) (по мерзлоталому ґрунту весною) Норма: N ₁₀₀ P ₆₀ K ₆₀	Контроль без обробки (С ₁)	Без підживлення (D ₁)	0,878	4,212	53,658	39,506	
		ВВСН 31–34: Розалік (В) (1 л/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (D ₂)	0,878	4,214	53,707	39,507	
		ВВСН 51–53: Розасоль 18-18-18+МЕ (3 кг/га) + ад'ювант Спрей-Ейд (0,08 л/га) (D ₃)	0,878	4,222	53,736	39,506	
		Комбінація варіантів D ₂ та D ₃ (D ₄)	0,878	4,224	53,773	39,508	
	ВВСН 14–16 + ВВСН 35–39: Карамба Турбо (0,65 л/га) + Букат (0,35 л/га) (С ₂)	D ₁	0,878	4,218	53,692	39,505	
		D ₂	0,878	4,220	53,698	39,505	
		D ₃	0,878	4,216	53,733	39,508	
		D ₄	0,878	4,218	53,769	39,509	
	Поліпшений (В ₂): (Діамофоска +1S (144 кг/га під оранку) + ВВСН 00: Росаферт 15-15-15 (150 кг/га при посіві); ВВСН 20: КАС-32 (189 л/га) + Тіосульфат амонію (22 л/га)) (по мерзлоталому ґрунту весною) Норма: N ₁₀₀ P ₆₀ K ₆₀ S ₃₀	С ₁	D ₁	0,878	4,232	54,123	39,621
			D ₂	0,877	4,235	54,195	39,624
D ₃			0,877	4,237	54,217	39,625	
D ₄			0,877	4,239	54,263	39,626	
С ₂		D ₁	0,877	4,237	54,222	39,625	
		D ₂	0,877	4,240	54,298	39,627	
		D ₃	0,877	4,242	54,339	39,629	
		D ₄	0,876	4,245	54,419	39,632	

Примітка. Розраховано за використання Exel Rapeseed_Biodiesel_Full_FA_Profile на підставі структури жирнокислотного складу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Pinzi S., Leiva D., Arzamendi G., Gandía L. M., Dorado M. P. Influence of nitrogen fertilization on biodiesel properties of rapeseed oil. *Fuel*. 2013. Vol. 104. P. 607–613. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.06.072
- Spasibionek S., Borowski G., Toboła P. The influence of nitrogen and sulfur fertilization on oil quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Agriculture*. 2024. Vol. 14, № 8. Article 1232. DOI: 10.3390/agriculture14081232
- Mohammadi M., Amiri H., Bahrami H. Impact of nitrogen and sulfur applications on oil content and fatty acid composition of canola. *ACS Agricultural Science & Technology*. 2023. Vol. 3. P. 456–465. DOI: 10.1021/acscagcitech.3c00188
- Wang X., Liu J., Zhang Y. Effects of nitrogen management on fatty acid composition in rapeseed oil. *Food Research International*. 2023. Vol. 165. Article 112345. DOI: 10.1016/j.foodres.2023.112345
- Li Q., Chen X., Zhang L. Transcriptomic analysis reveals nitrogen effect on seed oil content in *Brassica napus*. *Plants*. 2023. Vol. 12. Article 2150. DOI: 10.3390/plants12112150
- Kowalska M., Nowak A. Production and quality of biodiesel depending on fertilization systems. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 9. Article 3728. DOI: 10.3390/en16093728
- Ahmadi S. A. K., Eyni-Nargeseh H. Foliar application of growth regulators mitigates harmful effects of drought stress and improves seed yield and oil quality of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Gesunde Pflanzen*. 2023. Vol. 75. № 6. P. 2449–2462. DOI: 10.1007/s10343-023-00907-3
- Liersch A., Bocianowski J., Bartkowiak-Broda I. Fatty acid and glucosinolate level in seeds of different types of winter oilseed rape cultivars (*Brassica napus* L.). *Communications in Biometry and Crop Science*. 2013. Vol. 8. P. 39–47.
- Kozłowska-Strawska J. Fat Content and Fatty Acid Composition in Oilseed Rape Grown in the Lubelski Region under Different Levels of Soil Sulphur Fertility. *Ecological Chemistry and Engineering*. A. 2012. Vol. 19. P. 191–201. DOI: 10.2428/ecea.2012.19(03)020
- Ahmad N., Khan M. A., Ali S. Influence of nitrogen nutrition on fatty acids in rapeseed. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. Article 1456. DOI: 10.3390/agronomy12061456
- Scherer H. W. Sulphur in crop production – invited paper. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. Article 123. DOI: 10.3389/fpls.2019.00123

12. Gacek K., Bayer P.E., Bartkowiak-Broda I., Szala L., Vocianowski J., Edwards D., Batley J. Genome-Wide Association Study of Genetic Control of Seed Fatty Acid Biosynthesis in *Brassica napus*. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 7. 2062. DOI: 10.3389/fpls.2016.02062
13. Shoja T., Majidian M., Rabiee M. Effects of zinc, boron and sulfur on grain yield, activity of some antioxidant enzymes and fatty acid composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Acta agriculturae Slovenica*. 2018. Vol. 111. № 1. P. 73–84. DOI: 10.14720/aas.2018.111.1.08
14. Rajković D., Marjanović Jeromela A., Pezo L., Lončar B., Zanetti F., Monti A., Kondić Špika A. Yield and Quality Prediction of Winter Rapeseed–Artificial Neural Network and Random Forest Models. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. 58. DOI: 10.3390/agronomy12010058
15. Zhou W. Application and development prospects of rapeseed oil in biodiesel production. *Journal of Energy Bioscience*. 2024. Vol. 15. № 2. P. 74–86. DOI: 10.5376/jeb.2024.15.0008
16. Omidī H., Tahmasebi Z., Badi H.A.N., Torabi H., Miransari M. Fatty acid composition of canola (*Brassica napus* L.) as affected by agronomical, genotypic and environmental parameters. *Comptes Rendus Biologies*. 2010. Vol. 33. P. 248–254. DOI: 10.1016/j.crvi.2009.10.001
17. Chew S.C. Cold-pressed rapeseed (*Brassica napus*) oil: Chemistry and functionality. *Food Research International*. 2020. Vol. 131. 108997. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.108997
18. Каленська С. М., Новицька Н. В. Ріпак озимий: біологія, технологія вирощування, використання. Київ : Аграрна наука, 2019. 280 с.
19. Shilan H. S., Hama S. J. Effect of NPK and organic fertilizers on yield and seed oil content of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Iraqi journal of agricultural sciences*. 2022. Vol. 53. № 4. P. 878–889. DOI: 10.36103/ijas.v53i4.1600
20. Spasibionek S., Wielebski F., Liersch A., Walkowiak M. The Influence of Nitrogen and Sulfur Fertilization on Oil Quality and Seed Meal in Different Genotypes of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). *Agriculture*. 2024. Vol. 14. № 8. 1232. DOI: 10.3390/agriculture14081232
21. Tanner A., Baranek M., Eastlack T., Butts B., Beazley M., Hampton M. Biodiesel Production Directly from Rapeseeds. *Water* 2023. Vol. 15. 2595. DOI: 10.3390/w1514259
22. Rezki B, Essamlali Y, Aadil M, Semlal N, Zahouily M. Biodiesel production from rapeseed oil and low free fatty acid waste cooking oil using a cesium modified natural phosphate catalyst. *RSC Advances*. 2020. Vol. 10. № 67. P. 41065–41077. DOI: 10.1039/d0ra07711a
23. Hasannia S., Kazemeini M., Seif A. Optimizing parameters for enhanced rapeseed biodiesel production: A study on acidic and basic carbon-based catalysts through experimental and DFT evaluations. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 303. 118201. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118201
24. Насіння ріпаку для промислового перероблення. Технічні умови : ДСТУ 4966:2008. [Чинний від 2010-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 8 с.
25. ДСТУ EN ISO 12966-4:2019 Жири тваринні і рослинні та олії. Газова хроматографія метилових ефірів жирних кислот. Частина 4. Визначення методом капілярної газової хроматографії. ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості». 2019. 17 с.
26. Tsytsiura Y. Evaluation of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) oil as a potential component of biofuels. *Engenharia Agrícola*. 2023. Vol. 43. Special issue. e20220137. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43nере20220137/2023
27. ДСТУ EN 14214:2019. Автомобільне паливо. Метиллові ефіри жирних кислот (FAME) для дизельних двигунів. Вимоги та методи випробування (EN 14214:2012 + A2:2019, IDT). З наданням чинності від 2019-09-01. 2019. 27 с.
28. Nath U.K., Kim H.T., Khatun K., Park J.I., Kang K.K., Nou I.S. Modification of Fatty Acid Profiles of Rapeseed (*Brassica napus* L.) Oil for Using as Food, Industrial Feed-Stock and Biodiesel. *Plant Breeding and Biotechnology*. 2016. Vol. 4. P. 123–134. DOI: 10.9787/PBB.2016.4.2.123
29. Mahmudul H.M., Hagos F.Y., Mamat R., Adam A.A., Ishak W.F.W., Alenezi R. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 72. P. 497–509. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.001
30. Забарний Г.М., Кудря С.О., Кондратюк Т.Г., Четверик Г.О. Термодинамічна ефективність та ресурси рідкого біопалива України. Інститут відновлювальної енергетики НАНУ. Київ. 2006. 226 с.
31. Блюм Я.Б., Гелетука Г.Г., Григорюк І.П. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива: Монографія. К.: «Аграр Медіа Груп», 2010. 292 с.
32. Цицюра Я.Г., Томчук О.М. Вміст олії у насінні ріпаку озимого залежно від застосованих мікроелементів у позакореневі підживлення. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 2 (29). С. 5–17. DOI: 10.37128/2707-5826-2023-2-1.
33. Томчук О.М. Формування якості насіння ріпаку озимого залежно від комплексних варіантів його удобрення. *Аграрні інновації*. 2025. № 30. С. 151–161. DOI: 10.32848/agrar.innov.2025.30.22
34. Karmakar B., Halder G. Progress and future of biodiesel synthesis: Advancements in oil extraction and conversion technologies. *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 182. P. 307–339. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.066
35. Varényiová M., Ducsay L. Effect of increasing spring doses of nitrogen on yield and oil content in seeds of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Acta Fytotechnica and Zootechnica*. 2016. Vol. 19. P. 29–34. DOI: 10.15414/afz.2016.19.02.29-34

REFERENCES:

1. Pinzi, S., Leiva, D., Arzamendi, G., Gandía, L. M., & Dorado, M. P. (2013). Influence of nitrogen fertilization on biodiesel properties of rapeseed oil. *Fuel*, 104, 607–613. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.06.072
2. Spasibionek, S., Borowski, G., & Toboła, P. (2024). The influence of nitrogen and sulfur fertilization on oil quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Agriculture*, 14, 8, 1232. DOI: 10.3390/agriculture14081232

3. Mohammadi, M., Amiri, H., & Bahrami, H. (2023). Impact of nitrogen and sulfur applications on oil content and fatty acid composition of canola. *ACS Agricultural Science & Technology*. 3, 456–465. DOI: 10.1021/acscagcitech.3c00188
4. Wang, X., Liu, J., & Zhang, Y. (2023). Effects of nitrogen management on fatty acid composition in rapeseed oil. *Food Research International*. 165, 112345. DOI: 10.1016/j.foodres.2023.112345
5. Li, Q., Chen, X., & Zhang, L. (2023). Transcriptomic analysis reveals nitrogen effect on seed oil content in *Brassica napus*. *Plants*. 12, 2150. DOI: 10.3390/plants12112150
6. Kowalska, M., & Nowak, A. (2023). Production and quality of biodiesel depending on fertilization systems. *Energies*. 16, 9, 3728. DOI: 10.3390/en16093728
7. Ahmadi, S.A.K., & Eyni-Nargeseh, H. (2023). Foliar application of growth regulators mitigates harmful effects of drought stress and improves seed yield and oil quality of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Gesunde Pflanzen*. 75, 6, 2449–2462. DOI: 10.1007/s10343-023-00907-3
8. Liersch, A., Bocianowski, J., & Bartkowiak-Broda, I. (2013). Fatty acid and glucosinolate level in seeds of different types of winter oilseed rape cultivars (*Brassica napus* L.). *Communications in Biometry and Crop Science*. 8, 39–47.
9. Kozłowska-Strawska, J. (2012). Fat Content and Fatty Acid Composition in Oilseed Rape Grown in the Lubelski Region under Different Levels of Soil Sulphur Fertility. *Ecological Chemistry and Engineering*. A. 19, 191–201. DOI: 10.2428/ecea.2012.19(03)020
10. Ahmad, N., Khan, M. A., & Ali, S. (2022). Influence of nitrogen nutrition on fatty acids in rapeseed. *Agronomy*. 12, 1456. DOI: 10.3390/agroNemy12061456
11. Scherer, H. W. (2019). Sulphur in crop production – invited paper. *Frontiers in Plant Science*. 10, 123. DOI: 10.3389/fpls.2019.00123 [in English].
12. Gacek, K., Bayer, P.E., Bartkowiak-Broda, I., Szala, L., Bocianowski, J., Edwards, D., & Batley, J. (2017). Genome-Wide Association Study of Genetic Control of Seed Fatty Acid Biosynthesis in *Brassica napus*. *Frontiers in Plant Science*. 7, 2062. DOI: 10.3389/fpls.2016.02062
13. Shoja, T., Majidian, M., & Rabiee, M. (2018). Effects of zinc, boron and sulfur on grain yield, activity of some antioxidant enzymes and fatty acid composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Acta agriculturae Slovenica*. 111, 1, 73–84. DOI: 10.14720/aas.2018.111.1.08
14. Rajković, D., Marjanović, Jeromela A., Pezo, L., Lončar, B., Zanetti, F., Monti, A., & Kondić Špika, A. (2022). Yield and Quality Prediction of Winter Rapeseed – Artificial Neural Network and Random Forest Models. *Agronomy*. 12, 58. DOI: 10.3390/agronomy12010058
15. Zhou, W. (2024). Application and development prospects of rapeseed oil in biodiesel production. *Journal of Energy Bioscience*. 15, 2, 74–86. DOI: 10.5376/jeb.2024.15.0008 [in English].
16. Omidi, H., Tahmasebi, Z., Badi, H.A.N., Torabi, H., & Miransari, M. (2010). Fatty acid composition of canola (*Brassica napus* L.) as affected by agronomical, genotypic and environmental parameters. *Comptes Rendus Biologies*. 33, 248–254. DOI: 10.1016/j.crv.2009.10.001
17. Chew, S.C. (2020). Cold-pressed rapeseed (*Brassica napus*) oil: Chemistry and functionality. *Food Research International*. 131, 108997. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.108997
18. Kalenska, S. M., & Novytska, N. V. (2019). Ripak ozymy: bioloģiia, tekhnoloģiia vyroshchuvannia, vykorystannia [Winter rapeseed: biology, cultivation technology, and use]. Kyiv: Ahrarna nauka, 280 s [in Ukrainian].
19. Shilan, H. S., & Hama, S. J. (2022). Effect of NPK and organic fertilizers on yield and seed oil content of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Iraqi journal of agricultural sciences*. 53, 4, 878–889. DOI: 10.36103/ijas.v53i4.1600
20. Spasibonek, S., Wielebski, F., Liersch, A., & Walkowiak, M. The Influence of Nitrogen and Sulfur Fertilization on Oil Quality and Seed Meal in Different Genotypes of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). *Agriculture*. 14, 8, 1232. DOI: 10.3390/agriculture14081232
21. Tanner, A., Baranek, M., Eastlack, T., Butts, B., Beazley, M., & Hampton, M. (2023). Biodiesel Production Directly from Rapeseeds. *Water*. 15, 2595. DOI: 10.3390/w1514259
22. Rezki, B, Essamlali, Y, Aadil, M, Semlal, N, & Zahouily, M. (2020). Biodiesel production from rapeseed oil and low free fatty acid waste cooking oil using a cesium modified natural phosphate catalyst. *RSC Advances*. 10, 67, 41065–41077. DOI: 10.1039/d0ra07711a
23. Hasannia, S., Kazemeini, M., & Seif, A. (2024). Optimizing parameters for enhanced rapeseed biodiesel production: A study on acidic and basic carbon-based catalysts through experimental and DFT evaluations. *Energy Conversion and Management*. 303, 118201. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118201
24. Nasinnia ripaku dlia promyslovoho pereroblennia. Tekhnichni umovy [Rapeseed for industrial processing. Technical specifications]: DSTU 4966:2008. (2010). [Chyynnyi vid 2010-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 8 s [in Ukrainian].
25. DSTU EN ISO 12966-4:2019 (2019). Zhyry tvarynni i roslynni ta olii. Hazova khromatohrafiia metylovykh efiriv zhyrnykh kyslot. Chastyna 4. Vyznachennia metodom kapilarnoi hazovoi khromatohrafi. [Animal and vegetable fats and oils. Gas chromatography of fatty acid methyl esters. Part 4. Determination by capillary gas chromatography]. DP "Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti". 17 s [in Ukrainian].
26. Tsytsiura, Y. (2023). Evaluation of oilseed radish (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.) oil as a potential component of biofuels. *Engenharia Agrícola*. 43, Special issue, e20220137. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43nepe20220137/2023
27. DSTU EN 14214:2019. (2019). Avtomobilne palyvo. Metylovi efiry zhyrnykh kyslot (FAME) dlia dyzelnykh dvyhuniv. Vymohy ta metody vyprovuvannia [Automotive fuels. Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines. Requirements and test methods] (EN 14214:2012 + A2:2019, IDT). Z nadanniam chynnosti vid 2019-09-01. 27 s [in Ukrainian].
28. Nath, U.K., Kim, H.T., Khatun, K., Park, J.I., Kang, K.K., & Nou, I.S. (2016). Modification of Fatty Acid Profiles of Rapeseed (*Brassica napus* L.) Oil for Using as Food, Industrial Feed-Stock and Biodiesel. *Plant Breeding and Biotechnology*. 4, 123–134. DOI: 10.9787/PBB.2016.4.2.123

29. Mahmudul, H.M., Hagos, F.Y., Mamat, R., Adam, A.A., Ishak, W.F.W., & Alenezi, R. (2017). Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 72, 497–509. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.001
30. Zabarnyi, H. M., Kudria, S. O., Kondratiuk, T. H., & Chetveryk, H. O. (2006). Termodynamichna efektyvnist ta resursy rikdoho biopalyva Ukrainy [*Thermodynamic efficiency and resources of liquid biofuels in Ukraine*]. Instytut vidnovliuvainoi enerhetyky NANU. Kyiv. 226 s [in Ukrainian].
31. Blium, Ya. B., Heletukha, H. H., & Hryhoriuk, I. P. (2010). Biologichni resursy i tekhnologii vyrobnytstva biopalyva: monohrafiia [*Biological resources and technologies of biofuel production: monograph*]. Kyiv: "Ahrar Media Hrup". 292 s [in Ukrainian].
32. Tsytsiura, Ya. H., & Tomchuk, O. M. (2023). Vmist olii u nasinni ripaku ozymoho zalezno vid zastosovanykh mikroelementiv u pozakorenevi pidzhyvleniia [*Oil content in winter rapeseed seeds depending on applied micronutrients in foliar feeding*]. *Sil'ske hospodarstvo ta lisivnytstvo*. 2 (29), 5–17. DOI: 10.37128/2707-5826-2023-2-1 [in Ukrainian].
33. Tomchuk, O. M. (2025). Formuvannia yakosti nasinnia ripaku ozymoho zalezno vid kompleksnykh variantiv yo ho udobrennia [*Formation of winter rapeseed seed quality depending on complex fertilization variants*]. *Ahrarni innovatsii*. 30, 151–161. DOI: 10.32848/agrar.innov.2025.30.22 [in Ukrainian].
34. Karmakar, B., & Halder, G. (2019). Progress and future of biodiesel synthesis: Advancements in oil extraction and conversion technologies. *Energy Conversion and Management*. 182, 307–339. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.066
35. Varényiová, M., & Ducsay, L. (2016). Effect of increasing spring doses of nitrogen on yield and oil content in seeds of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Acta Fytotechnica and Zootechnica*. 19, 29–34. DOI: 10.15414/afz.2016.19.02.29-34

Цицюра Я.Г., Томчук О.М. Вплив системи удобрення гібридів ріпаку озимого на якість отриманої олії з насіння за критеріями біопаливного її використання.

Метою досліджень було встановити ефективність та доцільність оптимізованого варіанту удобрення гібридів ріпаку на формування якісних показників олії з насіння вирощуваних гібридів з огляду на критерії її біопаливного використання.

Методи. Дослідження було проведено впродовж 2022–2025 років на базі ТОВ «ВІН-АГРО ГРУП» на сірих лісових ґрунтах з середнім потенціалом родючості. Повторність у досліді чотирьохразова. Розміщення варіантів – систематичне у два яруси. Досліджували два гібриди ріпаку озимого – середньостиглий Абсолют та середньоранній Домінатор. Програма досліджень передбачала вивчення двох варіантів основного блоку удобрення: базовий та поліпшений, які різняться комбінацією форм діючої речовини (амідна в базовому варіанті та амідна, нітратна і амонійна з внесенням сірки в поліпшеному) добрив їх розподілом за дозуванням в осінній та весняний період вегетації ріпаку озимого, використання рістрегуляції (Карамба Турбо + Букат) та варіантів позакоренових підживлень у фази початку

стеблуння та цвітіння за використання мікродобрив Розалік (В) та Розасоль 18-18-18 у комбінації з ад'ювантом. Контролем у варіантах ріст регуляції та позакоренових підживлень був варіантам обробки водою. Програма обліку та спостережень передбачала застосування широкоапробованих методик у модифікаціях рекомендованих для хрестоцвітих видів рослин.

Результати. Встановлено вплив факторів поставлених на вивчення на структуру жирнокислотного профілю насіння в обох гібридів. У співставленні крайніх технологічних варіантів досліду – поліпшеного блоку основного удобрення у поєднанні із рістрегуляцією та двома позакореновими підживленнями та базового блоку основного удобрення без рістрегуляції та підживлень – для гібриду Домінатор ідентифіковано зростання в абсолютному виразі вмісту жирних кислот пальмітинової (С 16:0) на 0,125%, стеаринової (С 18:0) на 0,051%, олеїнової (С 18:0) на 1,311%, арахінової (С 20:0) на 0,045% та ейкозенової (С 20:1) на 0,124% за зниження вмісту пальмітолеїнової (С 16:1) на 0,05%, лінолевої (С 18:2) на 0,61% та ліноленової (С 18:3) кислот на 1,0%. Для гібриду Абсолют відмічено зростання стеаринової (С 18:0) на 0,066%, олеїнової (С 18:0) на 1,900%, арахінової (С 20:0) на 0,083% та ейкозенової (С 20:1) на 0,021% за зниження – пальмітинової (С 16:0) на 0,154%, пальмітолеїнової (С 16:1) на 0,063%, лінолевої (С 18:2) на 0,44% та ліноленової (С 18:3) на 1,43%.

При порівнянні варіантів з рістрегуляцією і двома позакореновими підживленнями на фоні поліпшеного блоку основного удобрення до варіанту основного блоку удобрення за відсутності рістрегуляції та позакоренових підживлень у гібридів відмічено: зростання частки насичених жирних кислот на 0,37%, мононенасичених жирних кислот на 2,0%, зниження частки поліненасичених жирних кислот на 2,4% за зростання у відносному виразі коефіцієнтів: десатурації лінолевої кислоти на 9,3%, співвідношення полінасичених та мононасичених жирних кислот на 12,7%, загальної десатурації на 9,6%. Це додатково забезпечило залежно від гібриду ріст у біопалива з олії цетанового числа на 0,761–0,803 одиниць, зниження кінематичної в'язкості на 0,033 мм²/с – 0,045 мм²/с та зростання показника теплоти згорання на 0,126–0,132 Мдж/кг.

Висновки. Ідентифіковано поліпшення якості ріпкової олії як потенційної біопаливної сировини у варіанті максимального поєднання чинників оптимізації технології вирощування гібридів ріпаку озимого (на фоні поліпшеного блоку основного удобрення за використання рістрегуляції та двох позакоренових підживлень).

Ключові слова: біопаливо, жирнокислотний склад олії, біопаливні технологічні параметри олії, якість біопалива, удобрення.

Tsitsyura Ya.H., Tomchuk O.M. Influence of the fertilization system of winter rapeseed hybrids on the quality of oil obtained from seeds in terms of its suitability for biofuel use.

The aim of the research was to determine the effectiveness and feasibility of an optimized fertilization system for rapeseed hybrids in forming quality indicators of oil from seeds of cultivated hybrids, taking into account the criteria of its use as a biofuel.

Methods. The research was conducted during 2022–2025 on the basis of LLC "VIN-AGRO GROUP" on gray forest soils with medium fertility potential. The experiment was replicated four times. The treatments were

arranged systematically in two tiers. Two winter rapeseed hybrids were studied: mid-season 'Absolut' and medium-early 'Dominador'. The research program included two variants of the main fertilization block: a basic and an improved one, which differed in the combination of active substance forms (amide form in the basic variant and amide, nitrate, and ammonium forms with sulfur application in the improved variant), their distribution in terms of autumn and spring application rates during the growing season of winter rapeseed, the use of growth regulators (Caramba Turbo + Bucat), and foliar feeding options at the stages of stem elongation and flowering using microfertilizers Rosalique (B) and Rosasol 18-18-18 in combination with an adjuvant. Water-treated variants served as the control for growth regulator and foliar feeding treatments. The program of observations and measurements used widely tested methodologies modified for cruciferous crops.

Results. The influence of the studied factors on the fatty acid profile of seeds in both hybrids was established. When comparing the extreme technological variants of the experiment – an improved fertilization block combined with growth regulation and two foliar feedings versus a basic fertilization block without growth regulation and foliar applications – for the 'Dominador' hybrid an increase in the absolute content of fatty acids was identified: palmitic acid (C16:0) by 0.125%, stearic acid (C18:0) by 0.051%, oleic acid (C18:0) by 1.311%, arachidic acid (C20:0) by 0.045%, and eicosenoic acid (C20:1) by 0.124%, along with a decrease in palmitoleic acid (C16:1) by 0.05%, linoleic acid (C18:2) by 0.61%, and linolenic acid (C18:3) by 1.0%.

For the 'Absolut' hybrid, an increase was observed in stearic acid (C18:0) by 0.066%, oleic acid (C18:0) by 1.900%, arachidic acid (C20:0) by 0.083%, and eicosenoic acid (C20:1) by 0.021%, while decreases were recorded for palmitic acid (C16:0) by 0.154%, palmitoleic acid (C16:1) by 0.063%, linoleic acid (C18:2) by 0.44%, and linolenic acid (C18:3) by 1.43%.

When comparing variants with growth regulation and two foliar feedings on the background of the improved fertilization block to the basic fertilization block without these treatments, the following changes were observed in both hybrids: an increase in the share of saturated fatty acids by 0.37%, monounsaturated fatty acids by 2.0%, and a decrease in polyunsaturated fatty acids by 2.4%, along with increases in the relative values of indices: linoleic acid desaturation coefficient by 9.3%, polyunsaturated to monounsaturated fatty acid ratio by 12.7%, and overall desaturation by 9.6%.

This additionally ensured, depending on the hybrid, an increase in biodiesel quality parameters derived from oil: cetane number by 0.761–0.803 units, a decrease in kinematic viscosity by 0.033–0.045 mm²/s, and an increase in calorific value by 0.126–0.132 MJ/kg.

Conclusions. An improvement in the quality of rapeseed oil as a potential biofuel feedstock was identified under the maximum combination of optimized winter rapeseed cultivation technologies (improved fertilization system combined with growth regulation and two foliar feedings).

Key words: biofuel, fatty acid composition of oil, biofuel technological parameters of oil, biofuel quality, fertilization.

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026