

<https://doi.org/10.15407/frg2025.06.497>

УДК 581.132:632.954:633.15

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ТА ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕРБІЦИДУ ТОЛПІРАЛАТУ У СУМІШІ ІЗ ГЕРБІЦИДОМ БЕНТАЗОНОМ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПОСІВІВ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ

В.О. СТОРОЖЕНКО, В.В. ЮХИМУК, М.В. ТАРАСЮК, Є.Ю. МОРДЕРЕР

*Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17
e-mail: vstoro@ukr.net*

Розповсюдження резистентних біотипів бур'янів загрожує втратами врожаю та збільшенням негативного впливу на агроценози внаслідок додаткових обробок посівних площ гербіцидами. Головну загрозу становлять біотиби бур'янів, стійкі до гербіцидів інгібіторів ацетолактатсинтази (АЛС). Загалом проблему контролювання цих бур'янів вирішують чергуванням гербіцидів інгібіторів АЛС із комбінаціями гербіцидів, що мають інші механізми фітотоксичності. Для розробки альтернативних гербіцидам інгібіторам АЛС комбінацій гербіцидів, ефективних для захисту посівів пшениці озимої, в польових і вегетаційному досліді досліджували ефект взаємодії у суміші гербіциду інгібітора 4-гідроксифенілпіруватдіоксигенази (ГФПД) толпіралату з гербіцидом інгібітором транспорту електронів (ТЕ) у фотосистемі II (ФС II) хлоропластів бентазоном. Також визначали селективність суміші цих гербіцидів щодо пшениці озимої. Встановлено, що за норми внесення толпіралату 20 г/га, яка є максимальною рекомендованою для посівів зернових колосових, та нормах внесення бентазону 480, 720 і 960 г/га суміш є селективною щодо культури. Показано, що за норми внесення толпіралату 20 г/га його взаємодія з бентазоном є адитивною. За ефективністю контролювання однорічних дводольних бур'янів суміш толпіралату з бентазоном не поступалася гербіцидам інгібіторам АЛС. З огляду на отримані дані зроблено висновок, що застосування суміші толпіралату з бентазоном в посівах пшениці озимої є можливим і доцільним.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., гербіциди, толпіралат, бентазон, взаємодія.

Головною проблемою сучасного хімічного методу захисту посівів є виникнення та розповсюдження резистентних до гербіцидів біотипів бур'янів, спричинене масовим застосуванням гербіцидів і селекційним тиском [1–3]. З огляду на це для запобігання виникнення резистентності необхідно здійснювати ротацію гербіцидів упродовж сівозміни та чергувати застосування гербіцидів різних класів для захисту окремих культур. Крім того, найефективнішим засобом боротьби з резистентністю є комплексне застосування гербіцидів з різними механізмами фітотоксичності [4–6].

Цитування: Стороженко В.О., Юхимук В.В., Тарасюк М.В., Мордерер Є.Ю. Оцінка можливості та доцільності застосування гербіциду толпіралату у суміші із гербіцидом бентазоном для захисту посівів пшениці озимої. *Фізіологія рослин і генетика*. 2025. 57, № 6. С. 497–509. <https://doi.org/10.15407/frg2025.06.497>

Сьогодні для захисту посівів озимої пшениці здебільшого застосовують гербіциди інгібітори АЛС, які є одним з найефективніших класів сучасних гербіцидів. Водночас, резистентність бур'янів до гербіцидів цього класу є найпоширенішою [7]. В тому числі серед всіх 5 випадків резистентності, які були зареєстровані в Україні, має місце саме резистентність до інгібіторів АЛС [7, 8]. Саме тому актуальним завданням є пошук альтернативних варіантів захисту цієї культури від бур'янів, які б за ефективністю не поступалися інгібіторам АЛС.

Високою ефективністю контролювання бур'янів відзначаються гербіциди-інгібітори ГФПД [9]. Однак в Україні гербіциди цього класу використовують винятково для захисту посівів кукурудзи. А втім було встановлено, що відносно нова діюча речовина цього класу толпіралат за зменшення норми внесення у ґрунт селективна щодо зернових колосових. Останнє дало змогу компанії «Кортева» зареєструвати в США та Канаді цей гербіцид у суміші з інгібітором ТЕ у ФС II хлоропластів бромксинілом для захисту посівів пшениці та ячменю [10].

Добре відомо, що в разі застосування в посівах кукурудзи інгібіторів ГФПД у сумішах з інгібіторами ТЕ у ФС II фітотоксична дія синергічно збільшується [11–13]. Водночас, було встановлено, що характер взаємодії інгібіторів ГФПД з інгібіторами ТЕ у ФС II може залежати від стійкості рослин. Якщо для чутливих видів рослин взаємодія синергічна, то для стійкіших видів характер взаємодії може змінюватися на адитивний [14]. Зважаючи на можливість досягнення синергічного посилення фітотоксичної дії логічно, що для комплексного застосування в посівах пшениці озимої партнер толпіралату має обиратися серед гербіцидів з класу інгібіторів ТЕ у ФС II. В Україні серед гербіцидів цього класу для застосування в посівах пшениці зареєстровано препарат базагран, діючою речовиною якого є бентазон. З огляду на дані щодо залежності характеру взаємодії інгібіторів ГФПД з інгібіторами ТЕ у ФС II від стійкості рослин [14], і те, що для забезпечення селективності норма внесення толпіралату в посівах пшениці має істотно зменшуватися порівняно з посівами кукурудзи [10], невідомо, якою буде взаємодія у суміші толпіралату з бентазоном при застосуванні в посіві пшениці озимої. Для більшої ефективності контролювання бур'янів і попередження виникнення у бур'янів резистентності до гербіцидів взаємодія має бути синергічною або хоча б адитивною. Проте синергічна взаємодія може призвести до негативного впливу на культуру. Отже, метою даного дослідження є перевірка селективності суміші гербіцидів толпіралату та бентазону щодо пшениці озимої і визначення характеру взаємодії компонентів даної суміші в разі застосування в посівах цієї культури. З отриманих результатів можна буде визначитися наскільки можливим і доцільним є застосування суміші гербіцидів толпіралату та бентазону для захисту посівів пшениці озимої.

Методика

Селективність гербіцидів щодо культури визначали в польових дослідах методом виявлення проявів фітотоксичної дії гербіцидів, фенологічних спостережень та біометричних вимірювань, які проводили через 7, 14, 28 та 56 діб після обробки посівів. Досліди в посівах пшениці озимої сорту Снігурка (2023 р. — попередник гірчиця, 2024 р. — попередник гречка) було закладено на полях ДСВ ІФРГ НАН України (сел. Глеваха Київської обл. (50°16' N, 30°18' E)).

Посіви обприскували гербіцидами у фазу кушіння пшениці (ВВСН 24) за допомогою ранцевого штангового обприскувача зі стислим повітрям, тиск 4 атм., довжина штанги — 3 м, кількість форсунок — 6, відстань до цільового об'єкта — 50 см, швидкість руху — 5 км/год, витрати робочої рідини — 300 л/га.

Площа дослідної ділянки становила 15 м² (3 × 5 м), повторність — чотириразова, ділянки розміщували рендомізовано. Кожен дослід мав контрольний варіант (без внесення гербіцидів).

Ефект взаємодії визначали методом Колбі [15] через порівняння фактичної дії суміші з очікуваною, яку розраховували на основі даних щодо дії окремих компонентів за формулою (1):

$$I_{12} = I_1 + I_2(100 - I_2)/100 \quad (1),$$

де I_{12} — очікувана дія суміші гербіцидів, I_1 та I_2 — значення дії, відповідно, 1 та 2 компонентів суміші гербіцидів.

Дію гербіцидів у польових дослідах визначали за ефективністю контролювання окремих видів бур'янів, яку оцінювали за зменшенням чисельності даного виду на оброблених ділянках порівняно з контролем [16] з урахуванням візуальної оцінки ступеня пригніченості оброблених гербіцидами рослин порівняно зі станом цих рослин у контролі (маса та лінійні розміри, хлороз листків тощо). Ступінь пригнічення за візуальною оцінкою виражали у відсотках: 0 % — відсутність ознак дії гербіцидів, 100 % — повна загибель бур'янів даного виду. Ефективність контролювання бур'янів розраховували за формулою (2):

$$E (\%) = 100 - V_2 * K_1 * (1 - E_v/100) * 100 / (V_1 * K_2) \quad (2),$$

де $E (\%)$ — ефективність контролювання певного виду бур'янів із урахуванням рівня забур'янення та візуальної оцінки дії гербіцидів, K_1 — кількість бур'янів на 1 м² за першого обліку на контролі (початкова забур'яненість), K_2 — кількість бур'янів на 1 м² на контролі за проведення другого (третього) обліку, V_1 — кількість бур'янів на 1 м² за першого обліку на обробленій ділянці досліду (початкова забур'яненість), V_2 — кількість бур'янів на 1 м² за другого (чи третього) обліку на обробленій ділянці досліду, E_v — візуальна оцінка дії гербіциду (рівень пошкоджень чи ступінь пригнічення рослин бур'яну виражені у % візуально порівняно з рослинами того самого виду в контролі).

У вегетаційних дослідах як модель однорічних дводольних бур'янів використовували рослини редьки олійної (*Raphanus sativum* var. *oleifera* Metrg.). Рослини вирощували в пластикових посудинах (по 4

посудини на кожен варіант) площею 0,015 м², які містили 1 кг ґрунту (суміш ґрунту з піском у співвідношенні 3 : 1), на вегетаційному майданчику.

Обробку проводили методом обприскування рослин у фазу 2—3 справжніх листків розчинами гербіцидів за допомогою ручного обприскувача. Норму внесення гербіцидів розраховували на площу посудин, об'єм робочого розчину для обробки одного варіанта, тобто 4 посудин, становив 20 мл, що забезпечувало повне змочування листків рослин.

У вегетаційних дослідах дію гербіцидів визначали за ступенем пригнічення накопичення маси сирової речовини надземної частини рослин, вмісту сумарного хлорофілу в листках, що є специфічним проявом дії гербіцидів, які взаємодіють із фотосинтезом [17], а також за впливом гербіцидів на індукцію флуоресценції, яка дає змогу оцінити вплив гербіцидів на стан електронтранспортного ланцюга хлоропластів [17—19].

Вміст хлорофілу визначали спектрофотометричним методом [20] за допомогою екстракції наважки рослинного матеріалу в ДМСО на водяній бані при 67 °С упродовж 3 год і розраховували на одиницю маси сирової речовини.

Індукцію флуоресценції вимірювали за допомогою флуорометра «iFL Integrated Fluorometer and Gas Exchange System» (ADC BioScientific Ltd., Велика Британія) та визначали максимальний квантовий вихід фотосинтезу за співвідношенням показників варіабельної флуоресценції до максимальної (F_v/F_m) [21], оцінених після темної адаптації листків упродовж 20 хв. Щільність світлового потоку насичувального світла — 8000 мкмоль/м². Варіабельну флуоресценцію обчислювали за формулою (3):

$$F_v = F_m - F_o \quad (3),$$

де F_o — мінімальний рівень флуоресценції, що збуджується світлом низької інтенсивності, за якого реакційні центри ФС II залишаються відкритими; F_m — максимальний рівень флуоресценції, яка збуджується насичувальним імпульсом (0,6 с) світла високої інтенсивності, що призводить до закриття всіх реакційних центрів ФС II.

Інгібувальну дію у відсотках розраховували за формулою (4):

$$I_i = 100 - 100 \cdot P_i/P_0 \quad (4),$$

де I_i — фітотоксична дія у % у варіанті із застосуванням гербіцидів; P_i та P_0 — маса сирової речовини надземної частини рослин, вміст сумарного хлорофілу в листках, відповідно, у варіанті із застосуванням гербіцидів і контрольному варіанті досліду.

У дослідах використовували такі гербіцидні препарати: SL-573 100 OD (толпіралат, 100 г/л), наданий компанією Кортєва Україна, та базагран (бентазон, 480 г/л), виробництва компанії БАСФ. Статистичну обробку результатів здійснювали методом дисперсійного аналізу із визначенням вірогідності різниці між середніми за допомогою LSD тесту ($p \leq 0,05$) з поправкою Бонферроні. Результати представляли у вигляді середніх і стандартних похибок ($m \pm SE$).

Результати та обговорення

Для застосування у посівах зернових колосових норму внесення толпіралату в суміші з бромоксинілом встановлено у межах 15—20 г/га [10]. Під час дослідження селективності суміші толпіралату з бромоксинілом було виявлено незначні прояви фітотоксичності (знебарвлення листків і затримка росту) в діапазоні норм внесення толпіралату від 3,75 до 15 г/га [10]. З огляду на це, для дослідження селективності суміші толпіралату з бентазоном було обрано максимальну рекомендовану норму толпіралату 20 г/га. У всіх варіантах із застосуванням толпіралату до робочого розчину додавали ад'ювант тренд 90 у нормі 0,2 л/га.

У досліді 2023 р. бентазон було застосовано в мінімальній рекомендованій нормі 960 г/га. Для порівняння ефективності контролювання бур'янів у схему досліду введено варіанти із застосуванням гербіциду квелекс (флорасулам, 100 г/кг + галауксифенметил, 100 г/кг + антидот клоквінтосет, 70,8 г/кг) у нормі 50 г/га з додаванням ад'юванту тренд 90 у нормі 0,2 л/га та суміші гербіцидів паллас екстра (піроксулам, 250 г/га + галауксифенметил, 66,67 г/га + антидот клоквінтосет, 354 г/кг) у нормі 75 г/га і гранстар (трибенуронметил, 750 г/кг) у нормі 15 г/га з додаванням ад'юванту тренд 90 у нормі 0,2 л/га.

Обстеження посіву пшениці озимої після обробки гербіцидами не виявило фітотоксичної дії у жодному з варіантів. Не спостерігалося також відмінностей у лінійних розмірах і термінах проходження фаз розвитку між рослинами пшениці озимої на оброблених гербіцидами ділянках і в контролі без гербіцидів.

У 2023 р. посів пшениці був засмічений однорічними дводольними бур'янами: ромашкою непахучою (*Matricaria inodora* L.) (MATIN) (5 шт/м²), волошкою синьою (*Centaurea cyanus* L.) (СУТCH) (3 шт/м²) та фіалкою польовою (*Viola arvensis* L.) (VIOAR) (10 шт/м²). Надалі, через 56 діб після обробки, в контрольному варіанті рослини фіалки польової закінчили вегетацію, але спостерігалась поява однорічного злакового бур'яну метлюга звичайного (*Apera spica-venti* (L.) Pal. Beauv.) (APESV) (0,3 шт/м²).

Результати визначення ефективності контролювання бур'янів через 28 та 70 діб після обробки, коли рослини пшениці знаходились, відповідно, у фазах утворення другого міжвузля та молочно-воскової стиглості представлені в табл. 1.

З наведених даних видно, що через 21 добу після обробки ефективність контролювання толпіралатом дводольних бур'янів була низькою і становила приблизно 50 %. Водночас бентазон при застосуванні окремо практично повністю знищував ромашку непахучу й волошку синю та не діяв на фіалку польову. Додавання толпіралату до бентазону не вплинуло на ефективність контролювання ромашки непахучої і волошок синіх, а ефективність контролювання фіалки польової зросла до 80 %. Внаслідок високої ефективності дії бентазону на ромашку непахучу та волошку синю неможливо визначити, якою є взаємодія толпіралату з бентазоном щодо цих видів бур'янів, можна лише констатувати відсутність ознак антагонізму. Фактична ефек-

ТАБЛИЦЯ 1. Ефективність (%) контролювання гербіцидами бур'янів у посіві озимої пшениці восени через 28 та 70 діб після обробки (2023 р.)

№	Варіант	28 діб після обробки			70 діб після обробки		
		MATIN	CENCY	VIOAR	MATIN	CENCY	APESV
1	Толпіралат (20 г/га) + ПАР тренд 90 (0,2 л/га)	55±5 ^a	50±5 ^a	50±5 ^b	60±5 ^a	65±3 ^a	15±5 ^a
2	Бентазон (960 г/га)	99±1 ^b	97±2 ^c	30±6 ^a	95±2 ^c	90±2 ^c	0 ^a
3	Толпіралат (20 г/га) + бентазон (960 г/га) + ПАР тренд 90 (0,2 л/га)	98±2 ^b	99±1 ^c	80±6 ^{bc}	97±2 ^c	96±2 ^c	98±2 ^c
4	Квелекс (50 г/га) + ПАР тренд 90 (0,2 л/га)	95±2 ^b	75±5 ^b	65±8 ^b	80±7 ^b	60±5 ^a	40±5 ^b
5	Паллас екстра (75 г/га) + гранстар (15 г/га) + ПАР Тренд 90 (0,2 л/га)	96±2 ^b	94±2 ^c	85±5 ^c	90±4 ^c	80±5 ^b	99±1 ^c

Примітка: Тут і в табл. 2 середні значення у стовпчиках, за якими не містяться однакові літери, відрізняються істотно за $p \leq 0,05$.

тивність контролювання сумішшю фіалки польової становила 80 %, що істотно перевищує значення очікуваної дії, яка становить 65 %. Крім того, толпіралат та бентазон окремо не подіяли істотно на злаковий бур'ян метлюг звичайний, водночас при застосуванні суміші ефективність контролювання цього виду бур'янів була досить високою. Отримані дані щодо дії суміші на фіалку польову та метлюг звичайний можуть розглядатися як ознака синергічної взаємодії толпіралату з бентазоном. Однак є певні сумніви щодо цього висновку. По-перше, різниця між фактичною та очікуваною дією суміші на фіалку польову знаходиться на межі вірогідного інтервалу, по-друге, забур'янення посіву метлюгом звичайним 0,3 шт./м² було досить низьким, що не гарантувало надійне визначення ефективності дії гербіцидів. За ефективністю контролювання бур'янів суміш толпіралату з бентазоном перевищувала дію комплексного гербіциду квелекс і не відрізнялася вірогідно від дії суміші гербіцидів паллас екстра та гранстар.

Отже, результати польового дослідження 2023 р. дають змогу зробити висновок, що за норм внесення толпіралату та бентазону, відповідно, 20 та 960 г/га взаємодія цих гербіцидів не має ознак антагонізму, а ефективність дії суміші досить висока й не поступається дії сучасних гербіцидних препаратів.

З урахуванням результатів дослідження 2023 р., у 2024 р. для того, щоб запобігти повного домінування дії бентазону, норми його внесення було зменшено до 480 та 720 г/га. Через збільшення кількості варіантів дослідження для порівняння із дією сумішей толпіралату з бентазоном використовували варіант із внесенням бентазону окремо в мінімальній рекомендованій нормі 960 г/га та варіант із застосуванням гербіциду гранстар у нормі 20 г/га.

Обстеження посіву пшениці озимої після обробки гербіцидами, як і в 2023 р., не виявило ознак фітотоксичної дії гербіцидів упродовж всього вегетаційного періоду.

У 2024 р. посів озимої пшениці був засмічений здебільшого одnorічними дводольними бур'янами: фіалкою польовою (8 шт./м²),

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ТА ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

ТАБЛИЦЯ 2. Ефективність (%) контролювання гербіцидами бур'янів у посіві озимої пшениці через 28 та 70 днів після обробки (2024 р.)

№	Варіант	28 днів після обробки			70 днів після обробки		
		VIOAR	POLCO	CONRE	VIOAR	POLCO	CONRE
1	Толпіралат (20 г/га) + ПАР тренд 90 (0,2 л/га)	45±5 ^b	15±2 ^a	55±4 ^b	30±5 ^{ab}	15±3 ^a	60±5 ^{ab}
2	Бентазон (480 г/га)	15±3 ^a	15±3 ^a	40±4 ^a	15±5 ^a	15±5 ^a	45±5 ^a
3	Бентазон (720 г/га)	20±6 ^a	35±3 ^b	50±5 ^{ab}	20±4 ^a	25±3 ^a	50±6 ^a
4	Бентазон (960 г/га)	35±2 ^b	55±5 ^c	60±4 ^b	25±5 ^{ab}	40±4 ^b	50±5 ^a
5	Толпіралат (20 г/га) + бентазон (480 г/га) + ПАР тренд 90 (0,2 л/га)	55±3 ^c	70±4 ^{cd}	75±2 ^c	30±2 ^{ab}	50±5 ^{bc}	45±2 ^a
6	Толпіралат (20 г/га) + бентазон (720 г/га) + ПАР тренд 90 (0,2 л/га)	60±6 ^c	75±5 ^d	80±4 ^c	55±7 ^c	55±5 ^c	70±5 ^b
7	Гранстар	50±3 ^c	35±3 ^b	60±7 ^b	35±3 ^b	40±5 ^b	50±1 ^a

гірчаком в'юнковим (*Polygonum convolvulus* L.) (POLCO) (5 шт./м²) та сокирками польовими (*Consolida regalis* S.F. Gray) (CONRE) (1 шт./м²). Крім того, на окремих ділянках спостерігалось незначне забур'янення багаторічним дводольним бур'яном осотом рожевим (*Cirsium arvense* L.) (CIRAR) (0,1 шт./м²). Результати визначення ефективності контролювання однорічних видів бур'янів через 28 та 70 днів після обробки наведено у табл. 2. Внаслідок малої щільності забур'янення посіву осотом рожевим коректно визначити дію гербіцидів на цей вид було неможливо. Однак було видно, що дія гранстару на осот рожевий перевищує дію толпіралату, бентазону та сумішей цих гербіцидів. З наведених у табл. 2 даних видно, що під час застосування толпіралату та бентазону окремо ефективність контролювання однорічних дводольних бур'янів була досить низькою. Водночас в разі застосування сумішей толпіралату з бентазоном за норми внесення бентазону 480 та 720 г/га ефективність контролювання

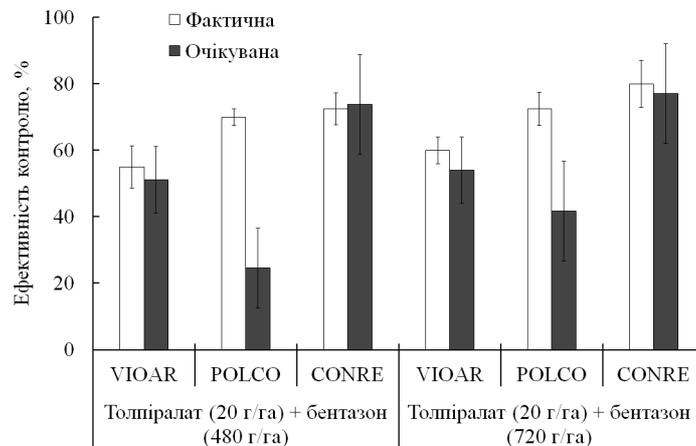


Рис. 1. Фактична й очікувана ефективність (%) контролювання бур'янів сумішами гербіцидів толпіралату та бентазону через 28 днів після обробки

бур'янів перевищувала дію бентазону в нормі 960 г/га. За ефективністю контролювання фіалки польової суміші толпіралату з бентазоном не відрізнялися вірогідно, а за рівнем контролювання гірчака в'юнкового та сокирок польових вірогідно перевищували дію гербіциду гранстар.

Розрахунок очікуваної ефективності контролювання бур'янів (рис. 1) показав, що стосовно фіалки польової та сокирок польових очікувана дія сумішей не відрізняється вірогідно від фактичної, а стосовно в'юнка польового за норми бентазону 480 г/га фактична дія суміші вірогідно перевищувала очікувану. За підвищення норми внесення бентазону до 720 г/га фактична дія також перевищувала очікувану, але різниця не була вірогідною.

Отже, отримані в польових дослідях результати демонструють, що гербіцид толпіралат при застосуванні окремо та його суміші з гербіцидом бентазоном є селективними щодо пшениці озимої за норм внесення толпіралату 20 г/га, бентазону — 480, 720 і 960 г/га, та за додавання ад'юванту тренд 90 у нормі 0,2 л/га. При застосуванні толпіралату у нормі 20 г/га у сумішах з бентазоном за норм останнього 480 та 720 г/га взаємодія переважно адитивна, однак у деяких випадках щодо окремих видів бур'янів може проявлятися синергізм.

Висновки про характер взаємодії толпіралату з бентазоном, зроблені на основі даних польових дослідів, було перевірено на модельному об'єкті в умовах вегетаційного дослідів. На третю добу після обробки вплив гербіцидів на вміст хлорофілу в листках редьки олійної

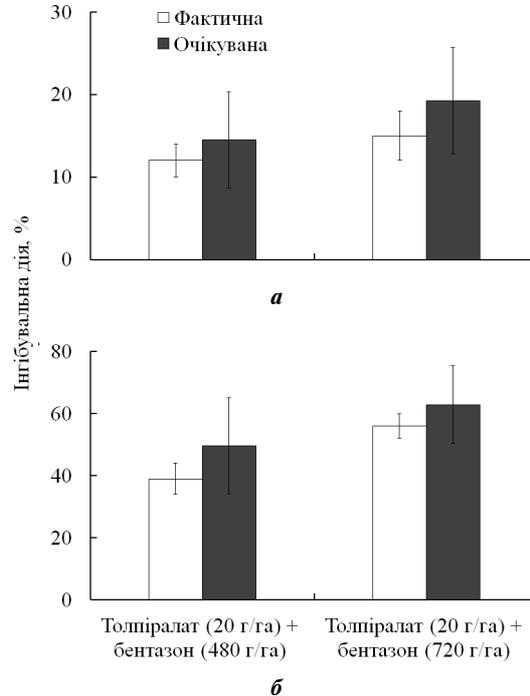


Рис. 2. Фактична й очікувана інгібувальна дія (%) сумішей гербіцидів толпіралату і бентазону на накопичення хлорофілу (а) в листках на третю добу після обробки та на накопичення маси сирової речовини (б) рослинами редьки олійної на сьому добу після обробки

був досить слабким, при цьому очікувана інгібувальна дія сумішей на накопичення хлорофілу дещо перевищувала значення фактичної дії (рис. 2, а). Аналогічний результат було отримано під час визначення впливу гербіцидів на накопичення маси сирової речовини надземної частини рослин на сьому добу після обробки. Очікувана інгібувальна дія сумішей на накопичення маси сирової речовини рослин також дещо перевищувала значення фактичної дії (рис. 2, б). Однак в обох випадках різниця між значеннями фактичної та очікуваної дії була менша значення LSD_{05} , тобто ці перевищення не є вірогідними. З цього випливає, що за досліджуваних норм внесення взаємодія толпіралату з бентазоном є адитивною.

Дослідження впливу гербіцидів на стан електронтранспортного ланцюга хлоропластів показав, що толпіралат внаслідок застосування окремо на першу добу після обробки практично не вплинув, а на третю добу зменшив значення максимального квантового виходу фотосинтезу (F_v/F_m) лише на 1,5 % порівняно з контролем (рис. 3). До того ж, дія бентазону, для якого інгібування ТЕ є специфічною реакцією, вже на першу добу призвела до істотного зменшення значення F_v/F_m . На третю добу за більшої норми внесення бентазону значення F_v/F_m було близьким до нуля, що є підтвердженням повного блокування ТЕ. За дії суміші при меншій нормі внесення бентазону зниження значення F_v/F_m було дещо меншим порівняно з дією бентазону окремо. Однак це зменшення не є вірогідним. За більшої норми внесення бентазону дія його суміші з толпіралатом практично не відрізнялася від дії бентазону окремо.

Під час дослідження ефектів взаємодії у сумішах толпіралату з інгібітором ТЕ у ФС II тербутилазином було встановлено, що при нормі внесення толпіралату 30 г/га, рекомендованої для застосування цього гербіциду в посівах кукурудзи, взаємодія є синергічною [13]. За дії суміші зменшення значення F_v/F_m відбувалося раніше, ніж за дії тербутилазину окремо. З цих даних випливало, що основним чинником синергізму є збільшення толпіралатом ефективності інгібуван-

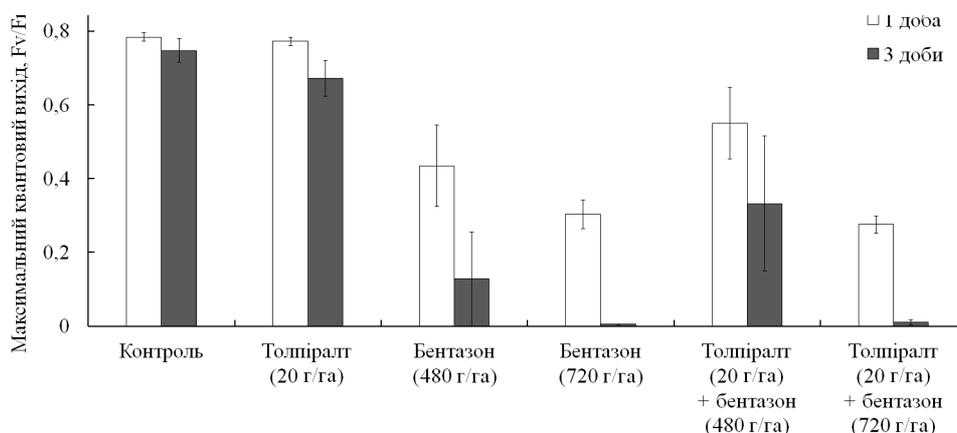


Рис. 3. Максимальний квантовий вихід фотосинтезу (F_v/F_m) в листках редьки олійної за дії гербіцидів толпіралату і бентазону окремо та в сумішах через 1 й 3 доби після обробки

ня ТЕ тербутилазином [13]. Як видно з рис. 3, за додавання толпіралату до бентазону при зменшеній нормі внесення толпіралату 20 г/га ефективність інгібування бентазоном ТЕ не збільшується. Тобто при зменшенні норми внесення толпіралату зникає основний чинник, який забезпечував синергічне підвищення фітотоксичної дії.

Таким чином, з отриманих у польових та вегетаційному дослідках даних, випливає, що при застосуванні сумішей толпіралату з інгібіторами ТЕ у ФС II, зокрема з бентазоном, за норм внесення толпіралату, рекомендованих для посівів зернових колосових, взаємодія переважно є адитивною. Відсутність синергізму зменшує потенційну ефективність використання суміші толпіралату з бентазоном для боротьби з резистентністю бур'янів до гербіцидів. Проте адитивний характер взаємодії дає змогу отримати високу ефективність контролювання сумішшю толпіралату з бентазоном однорічних дводольних бур'янів, яка не поступається сучасним гербіцидним препаратам із класу інгібіторів АЛС, навіть за зниження норм внесення бентазону порівняно з мінімально рекомендованими. Беручи до уваги, що суміш толпіралату з бентазоном є селективною до пшениці озимої і забезпечує високу ефективність контролювання бур'янів, її можна використовувати для чергування з гербіцидами інгібіторами АЛС. Таке чергування мінімізує вірогідність виникнення у бур'янів резистентності до гербіцидів. Отже, проведені дослідження дає змогу зробити висновок, що використання суміші толпіралату з бентазоном для захисту посівів пшениці озимої є можливим і доцільним.

Подяка

Колектив авторів висловлює подяку чл.-кор. НАН України О.О. Стасику за консультації та надану допомогу в процесі проведення експериментів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Kraehmer H., Almsick A., Beffa R., Dietrich H., Eckes P., Hacker E., Hain R., Streck H.J., Stuebler H., Willms L. Herbicides as weed control agents: state of the art: II. Recent achievements. *Plant Physiol.* 2014. **166**(3). P. 1132—1148. <https://doi.org/10.1104/pp.114.241992>
2. Gaines T.A., Duke S.O., Morran S., Rigon C.A.G., Tranel P.J., Küpper A., Dayan F.E. Mechanisms of evolved herbicide resistance. *J. Biol. Chem.* 2020. **295**(30). P. 10307—10330. <https://doi.org/10.1074/jbc.REV120.013572>
3. Perotti V.E., Larran A.S., Palmieri V.E., Martinatto A.K., Permingeat H.R. Herbicide resistant weeds: A call to integrate conventional agricultural practices, molecular biology knowledge and new technologies. *Plant Sci.* 2020. **290**. 110255. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110255>
4. Norsworthy J.K., Ward S.M., Shaw D.R., Llewellyn R.S., Nichols R.L., Webster T.M., Bradley K.W., Frisvold G., Powles S.T., Burgos N.R., Witt W.W., Barrett M. Reducing the risk of herbicide resistance: best management practices and recommendation. *Weed Sci.* 2012. **60**(SP1). P. 31—62. <https://doi.org/10.1614/WS-D-11-00155.1>
5. Yadav R., Jha P., Hartzler R., Liebman M. Multi-tactic strategies to manage herbicide-resistant waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) in corn—soybean rotations of the U.S. Midwest. *Weed Sci.* 2023. **71**(2). P. 141—149. <https://doi.org/10.1017/wsc.2023.10>

6. Xu H., Sun L., Su W., Yang M., Jiang M., Xue F., Lu C., Wu R. Confirmation and chemical control of acetyl-CoA carboxylase- and acetolactate synthase-resistant Japanese foxtail in China. *Crop Prot.* 2023. **169**. 106257. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106257>
7. Heap I. The international survey of herbicide resistant weeds. International herbicide-resistant weed database. URL: www.weedscience.com (01.09.2025)
8. Швартау, В.В., Михальська Л.М. (2022). Резистентні до гербіцидів біотики бур'янів в Україні. Доп. НАН України., 6, С. 85-94. <https://doi.org/10.15407/dopovid2022.06.085>
9. Ma T., Gao S., Zhao L.X., Ye F., Fu Y. 4-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase inhibitors: from molecular design to synthesis. *J. Agric. Food Chem.* 2024. **72**(31). P. 17125–17137. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01171>
10. Reddy S.S., Gonzalez I., Degenhardt R., Ouse D., Satchivi N., Creemer L. Weed control and crop safety with premixed tolypyralate and bromoxynil on cereals. *Weed Technol.* 2025. **39**. e55 <https://doi.org/10.1017/wet.2025.22>
11. Armel G.R., Wilson H.P., Richardson R.J., Whaley C.M., Hines T.E. Mesotrione combinations with atrazine and bentazon for yellow and purple nutsedge (*Cyperus esculentus* and *C. rotundus*) control in corn. *Weed Technol.* 2008. **22**(3). P. 391–396. <https://doi.org/10.1614/WT-07-178.1>
12. Walsh M.J., Stratford K., Stone K., Powles S.B. Synergistic effects of atrazine and mesotrione on susceptible and resistant wild radish (*Raphanus raphanistrum*) populations and the potential for overcoming resistance to triazine herbicides. *Weed Technol.* 2012. **26**(2). P. 341–347. <https://doi.org/10.1614/WT-D-11-00132.1>
13. Yukhymuk V.V., Radchenko M.P., Sytnik S.K., Morderer Y.Y. Effects of interaction and effectiveness of weed control when using tank mixtures of herbicides in maize fields. *Regul. Mech. Biosys.* 2022. **13**(2). P. 114–120. <https://doi.org/10.15421/022216>
14. O'Brien S.R., Davis A.S., Riechers D.E. Quantifying resistance to isoxaflutole and mesotrione and investigating their interactions with metribuzin POST in waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*). *Weed Sci.* 2018. **66**(5). P. 586–594. <https://doi.org/10.1017/wsc.2018.36>
15. Colby S.R. Calculating synergistic and antagonistic responses of herbicide combinations. *Weeds.* 1967. **15**(1). P. 20–22. <https://doi.org/10.2307/4041058>
16. Івашенко О.О., Мережинський Ю.Г. Ефективність застосування гербіцидів. Методики випробування та застосування пестицидів. За ред. проф. С.О. Трибеля. Київ: Світ. 2001. С. 381–383.
17. Dayan F.E., Zaccaro M.L. Chlorophyll fluorescence as a marker for herbicide mechanisms of action. *Pestic. Biochem. Physiol.* 2012. **102**(3). P. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2012.01.005>
18. Silva F.B., Costa A.C., Alves R.R.P., Megguer C.A. Chlorophyll fluorescence as an indicator of cellular damage by glyphosate herbicide in *Raphanus sativus* L. plants. *Am. J. Plant Sci.* 2014. **5**(16). P. 2509–2519. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.516265>
19. Weber J.F., Kunz C., Peteinatos G.G., Santel H.-J., Gerhards R. Utilization of chlorophyll fluorescence imaging technology to detect plant injury by herbicides in sugar beet and soybean. *Weed Technol.* 2017. **31**(4). P. 523–535. <https://doi.org/10.1017/wet.2017.22>
20. Welburn A.R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b* as well as total carotenoids using various solvents with spectrophotometry of different resolution. *J. Plant Physiol.* 1994. **144**(3). P. 248–254. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
21. Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide. *J. Exp. Bot.* 2000. **51**(345). P. 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>

Отримано 29.09.2025

REFERENCES

1. Kraehmer, H., Almsick, A., Beffa, R., Dietrich, H., Eckes, P., Hacker, E., Hain, R., Streck, H.J., Stuebler, H. & Willms, L. (2014). Herbicides as weed control agents: State

- of the art: II. Recent achievements. *Plant Physiol.*, 166(3), pp. 1132-1148. <https://doi.org/10.1104/pp.114.241992>
2. Gaines, T.A., Duke, S.O., Morran, S., Rigon, C.A.G., Tranel, P.J., Küpper, A. & Dayan, F.E. (2020). Mechanisms of evolved herbicide resistance. *J. Biol. Chem.*, 295(30), pp. 10307-10330. <https://doi.org/10.1074/jbc.REV120.013572>
 3. Perotti, V.E., Larran, A.S., Palmieri, V.E., Martinatto, A.K. & Permingeat, H.R. (2020). Herbicide resistant weeds: A call to integrate conventional agricultural practices, molecular biology knowledge and new technologies. *Plant Sci.*, 290, 110255. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110255>
 4. Norsworthy, J.K., Ward, S.M., Shaw, D.R., Llewellyn, R.S., Nichols, R.L., Webster, T.M., Bradley, K.W., Frisvold, G., Powles, S.T., Burgos, N.R., Witt, W.W. & Barrett, M. (2012). Reducing the risk of herbicide resistance: best management practices and recommendation. *Weed Sci.*, 60(SP1), pp. 31-62. <https://doi.org/10.1614/WS-D-11-00155.1>
 5. Yadav, R., Jha, P., Hartzler, R. & Liebman, M. (2023). Multi-tactic strategies to manage herbicide-resistant waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) in corn–soybean rotations of the U.S. Midwest. *Weed Sci.*, 71(2), pp. 141-149. <https://doi.org/10.1017/wsc.2023.10>
 6. Xu, H., Sun, L., Su, W., Yang, M., Jiang, M., Xue, F., Lu, C. & Wu, R. (2023). Confirmation and chemical control of acetyl-CoA carboxylase-and acetolactate synthase-resistant Japanese foxtail in China. *Crop Prot.*, 169, 106257. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106257>
 7. Heap, I. (2025, September). The international survey of herbicide resistant weeds. International herbicide-resistant weed database. Retrieved from: www.weedscience.com
 8. Schwartau, V.V. & Mykhalska, L.M. (2022). Herbicide-resistant weed biotypes in Ukraine. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 6, pp. 85-94 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.06.085>
 9. Ma, T., Gao, S., Zhao, L.X., Ye, F. & Fu, Y. (2024). 4-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase inhibitors: from molecular design to synthesis. *J. Agric. Food Chem.*, 72(31), pp. 17125-17137. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01171>
 10. Reddy, S.S., Gonzalez, I., Degenhardt, R., Ouse, D., Satchivi, N. & Creemer, L. (2025). Weed control and crop safety with premixed tolpyralate and bromoxynil on cereals. *Weed Technol.*, 39, e55. <https://doi.org/10.1017/wet.2025.22>
 11. Armel, G.R., Wilson, H.P., Richardson, R.J., Whaley, C.M. & Hines, T.E. (2008). Mesotrione combinations with atrazine and bentazon for yellow and purple nutsedge (*Cyperus esculentus* and *C. rotundus*) control in corn. *Weed Technol.*, 22(3), pp. 391-396. <https://doi.org/10.1614/WT-07-178.1>
 12. Walsh, M.J., Stratford, K., Stone, K. & Powles, S.B. (2012). Synergistic effects of atrazine and mesotrione on susceptible and resistant wild radish (*Raphanus raphanistrum*) populations and the potential for overcoming resistance to triazine herbicides. *Weed Technol.*, 26(2), pp. 341-347. <https://doi.org/10.1614/WT-D-11-00132.1>
 13. Yukhymuk, V.V., Radchenko, M.P., Sytnik, S.K. & Morderer, Y.Y. (2022). Effects of interaction and effectiveness of weed control when using tank mixtures of herbicides in maize fields. *Regul. Mech. Biosyst.*, 13(2), pp. 114-120. <https://doi.org/10.15421/022216>
 14. O'Brien, S.R., Davis, A.S. & Riechers, D.E. (2018). Quantifying resistance to isoxaflutole and mesotrione and investigating their interactions with metribuzin POST in waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*). *Weed Sci.*, 66(5), pp. 586-594. <https://doi.org/10.1017/wsc.2018.36>
 15. Colby, S.R. (1967). Calculating synergistic and antagonistic responses of herbicide combinations. *Weeds*, 15(1), pp. 20-22. <https://doi.org/10.2307/4041058>
 16. Ivashenko, O.O. & Mereshckyyu, Yu.G. (2001). Herbicide application effectiveness. Pesticide testing and application methods. (pp. 381-383). Trybel, S.O. (Ed.). Kyiv: Svit [in Ukrainian].
 17. Dayan, F.E. & Zaccaro, M.L. (2012). Chlorophyll fluorescence as a marker for herbicide mechanisms of action. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 102(3), pp. 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2012.01.005>
 18. Silva, F.B., Costa, A.C., Alves, R.R.P., & Megguer, C.A. (2014). Chlorophyll fluorescence as an indicator of cellular damage by glyphosate herbicide in *Raphanus sativus* L. plants. *Am. J. Plant Sci.*, 5(16), pp. 2509-2519. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.516265>

19. Weber, J.F., Kunz, C., Peteinatos, G.G., Santel, H.J. & Gerhards, R. (2017). Utilization of chlorophyll fluorescence imaging technology to detect plant injury by herbicides in sugar beet and soybean. *Weed Technol.*, 31(4), pp. 523-535. <https://doi.org/10.1017/wet.2017.22>
20. Welburn, A.R. (1994). The spectral determination of chlorophylls *a* and *b* as well as total carotenoids using various solvents with spectrophotometry of different resolution. *J. Plant Physiol.*, 144(3), pp. 248-254. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
21. Maxwell, K. & Johnson, G.N. (2000). Chlorophyll fluorescence: a practical guide. *J. Exp. Bot.*, 51(345), pp. 659-668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>

Received 29.09.2025

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY AND FEASIBILITY OF USING THE
HERBICIDE TOLPYRALATE IN MIXTURE WITH THE HERBICIDE BENTAZONE
FOR THE PROTECTION OF WINTER WHEAT CROP

V.O. Storozhenko, V.V. Yukhymuk, M.V. Tarasiuk, Ye.Yu. Morderer

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine
e-mail: vstoro@ukr.net

The spread of herbicide-resistant weed biotypes threatens crop losses and intensifies the negative impact on agrocenoses due to additional herbicide applications on cultivated areas. The greatest threat is posed by weed biotypes resistant to acetolactate synthase (ALS) — inhibiting herbicides. The problem of controlling these weeds is primarily addressed by rotating ALS-inhibiting herbicides with combinations of herbicides that possess different modes of action. To develop alternative ALS-inhibiting herbicide formulations for protecting winter wheat crops, field and greenhouse experiments were conducted. These experiments evaluated the interaction between the 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase (HPPD) inhibitor tolpyralate and the photosystem II (PSII) electron transport inhibitor bentazon when applied in combination. The selectivity of this herbicide mixture toward winter wheat was also assessed. It was established that at a tolpyralate application rate of 20 g/ha, the maximum recommended rate for cereal crops, and bentazon application rates of 480, 720, and 960 g/ha, the mixture was selective to the crop. It was shown that at a tolpyralate application rate of 20 g/ha, its interaction with bentazon was additive. In terms of controlling annual dicotyledonous weeds, the tolpyralate-bentazon mixture was not inferior to ALS-inhibitor herbicides. Based on the obtained data, it was concluded that the use of a topramezone-bentazon mixture in winter wheat crops is both feasible and advisable.

Key words: *Triticum aestivum* L., herbicides, tolpiralate, bentazon, interaction.

ORCID

В.О. СТОРОЖЕНКО — V.O. Storozhenko <https://orcid.org/0000-0002-7355-3699>

В.В. ЮХИМУК — V.V. Yukhymuk <https://orcid.org/0000-0001-5551-5253>

М.В. ТАРАСЮК — M.V. Tarasiuk <https://orcid.org/0000-0001-5914-7208>

Є.Ю. МОРДЕРЕП — Ye.Yu. Morderer <https://orcid.org/0000-0001-7237-3429>