УДК 633.111»324»:631.81:631.445.4(251.1–17:477)
DOI https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.146.1.18

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АГРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЧОРНОЗЕМУ ЗВИЧАЙНОГО ПІД ВПЛИВОМ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ПРИКОРЕНЕВОГО ПІДЖИВЛЕННЯ РОСЛИН

Денисенко А.В. *– аспірант кафедри загального землеробства та ґрунтознавства,*
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
orcid.org/0009-0003-3645-1487
Ткаліч Ю.І. *– д.с.-г.н.,*
професор кафедри загального землеробства та ґрунтознавства,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
orcid.org/0000-0003-2208-0163

У статті досліджено вплив різних технологій прикореневого підживлення озимої пшениці на агрофізичні властивості важко суглинкового чорнозему звичайного та формування урожайності в умовах Північного Степу України. Особливу увагу приділено порівнянню технології Культан КАС, що передбачає інжекційне локальне внесення стабілізованого карбамідно-аміачної суміші з інгібіторами нітрифікації та уреази за допомогою спеціалізованих підживлювачів низького тиску, з традиційними методами: поверхневим обприскуванням КАС самохідними обприскувачами високого кліренсу та розкиданням твердих азотних добрив методом Бузницького. Дослідження проводилися протягом 2023–2025 років у польових дослідах на чорноземі звичайному з вивченням таких показників, як твердість, щільність складання, структурно-агрегатний стан, загальна та аераційна пористість ґрунту в шарі 0–30 см, а також урожайність зерна озимої пшениці при внесенні азоту в дозі N_{60}. Встановлено, що застосування технології Культан КАС з одно- або дворазовим внесенням забезпечує значно менший рівень техногенного переущільнення ґрунту порівняно з традиційними методами. Твердість ґрунту на кінець вегетації становить 19,0–19,7 кг/см², щільність складання – 1,33–1,37 г/см³, що на 13–19% нижче, ніж при використанні поверхневих схем внесення добрив. Технологія Культан КАС сприяє збереженню високого рівня структурності: коефіцієнт структурності сягає 2,06–2,26, вміст агрономічно цінних агрегатів (10–0,25 мм) – 59,8–62,7%, загальна пористість – 51,0–51,3%, аераційна пористість – 12,2–12,8%. Ці показники значно перевищують відповідні значення для традиційних методів, де твердість зростає до 23,1–23,4 кг/см², щільність – до 1,43–1,45 г/см³, а аераційна пористість знижується до критичного рівня 5,9–6,9%. Урожайність озимої пшениці за технології Культан КАС у середньому за три роки склала 4,80 т/га, що на 45–56% перевищує показники традиційних схем внесення добрив. Особливо вираженою є перевага цієї технології в посушливі роки, коли поверхневі методи дають незначний приріст урожайності (1,85–2,20 т/га), а Культан КАС забезпечує 3,55–3,70 т/га завдяки розміщенню азоту на глибині 8–12 см у вологій зоні кореневої системи, що унеможливлює газоподібні втрати та забезпечує пролонговане живлення рослин. Технологія Культан КАС є ефективним рішенням для мінімізації механічного навантаження на ґрунт, збереження його оптимальних агрофізичних властивостей та стабільного формування урожайності озимої пшениці в умовах нестабільного зволоження Північного Степу. Вона дозволяє суттєво знизити ступінь переущільнення, покращити водно-повітряний режим ґрунту та підвищити адаптивність технології вирощування до посушливих умов.

Ключові слова: *пшениця озима, прикореневе підживлення, Культан КАС, агрофізичні властивості, твердість, щільність, структура ґрунту.*

Tkalitych Yu.I., Denysenko A.V. Features of the formation of agrophysical parameters of ordinary chernozem under the influence of technical means used for root-zone fertilization of plants

The article investigates the impact of different technologies for root-zone fertilization of winter wheat on the agrophysical properties of heavy loamy ordinary chernozem and the formation of grain yield under the conditions of the Northern Steppe of Ukraine. Particular attention is given to a comparison between the Cultan CAS technology, which involves the localized deep injection of stabilized carbamide-ammonium mixture containing nitrification and urease inhibitors using specialized low-pressure fertilizer applicators, and traditional methods, namely surface spraying with carbamide-ammonium mixture using self-propelled high-clearance sprayers and broadcasting solid nitrogen fertilizers using the Buznytsky method.

The research was conducted during 2023–2025 in field experiments on ordinary chernozem, with measurements of key agrophysical parameters such as soil hardness, bulk density, aggregate structure, total and aeration porosity in the 0–30 cm layer, as well as winter wheat grain yield when applying nitrogen at a rate of N_{60}.

It has been established that the application of the Cultan CAS technology, involving one or two fertilizer applications, results in a substantially lower level of technogenic soil compaction compared to traditional methods. At the end of the growing season, soil hardness is 19.0–19.7 kg/cm² and bulk density is 1.33–1.37 g/cm³, which is 13–19% lower than with surface application methods of carbamide-ammonium mixture. The Cultan CAS technology maintains a high level of soil structure: the structure coefficient ranges from 2.06 to 2.26, the content of agronomically valuable aggregates (10–0.25 mm) is 59.8–62.7%, total porosity is 51.0–51.3%, and aeration porosity is 12.2–12.8%. These indicators significantly exceed the values obtained with traditional methods, where soil hardness increases to 23.1–23.4 kg/cm², bulk density reaches 1.43–1.45 g/cm³, and aeration porosity decreases to a critical level of 5.9–6.9%.

The average grain yield of winter wheat with the Cultan CAS technology over three years was 4.80 t/ha, which is 45–56% higher than that achieved with traditional fertilizer application methods. The advantage of this technology is particularly pronounced in drought years, when surface application methods result in only a marginal yield increase (1.85–2.20 t/ha), whereas Cultan CAS provides yields of 3.55–3.70 t/ha. This is due to the placement of carbamide-ammonium mixture at a depth of 8–12 cm in the moist zone of the root system, which prevents gaseous nitrogen losses and ensures prolonged nutrient availability.

The Cultan CAS technology represents an effective solution for minimizing mechanical stress on the soil, preserving its optimal agrophysical properties, and ensuring stable winter wheat productivity under conditions of variable moisture supply in the Northern Steppe. It substantially reduces the degree of soil compaction, improves the water-air regime, and enhances the adaptability of cultivation practices to drought conditions.

Key words: *winter wheat, root-zone fertilization, Cultan CAS, agrophysical properties, soil hardness, bulk density, soil structure.*

Актуальність теми дослідження. Сучасне інтенсивне землеробство України, особливо в зоні Північного Степу, характеризується систематичним зростанням механічного навантаження на ґрунт через багаторазові проходи важкої та надважкої сільськогосподарської техніки. Особливо гостро проблема переущільнення проявляється під час проведення прикореневого (локального) азотного підживлення озимої пшениці рідкими (КАС) та твердими формами добрив. Традиційні технології, що передбачають використання важких самохідних обприскувачів високого кліренсу (маса 18–26 т, тиск у шинах 180–250 кПа) або багаторазові проходи тракторів із розкидачами та обприскувачами (метод Бузницького), створюють глибокі технологічні колії та зони локального ущільнення до 35–40 см. У посушливих умовах Північного Степу, де весняно-літній період часто характеризується дефіцитом продуктивної вологи (ГТК < 0,7), таке переущільнення різко погіршує умови розвитку кореневої системи саме в той період, коли рослини найбільш чутливі до нестачі азоту – від фази весняного кущіння до виходу в трубку та колосіння [1, 2].

У цих умовах надзвичайно актуальним стає пошук та впровадження таких агротехнологічних рішень, які б одночасно вирішували дві ключові проблеми, а саме мінімізували механічне навантаження на ґрунт і зберігали його оптимальні агрофізичні параметри (щільність 1,20–1,35 г/см³, твердість 10–20 кг/см², аераційна пористість >10–12 %, коефіцієнт структурності >2,0) протягом усієї вегетації. А також забезпечували гарантоване надходження азоту в зону активного кореневого живлення навіть за гострої посухи та високих температур, виключаючи газоподібні втрати і забезпечуючи пролонговану дію добрива [3–7].

Постановка проблеми. Технологія Культан КАС (інжекційне локальне внесення стабілізованого КАС із інгібіторами нітрифікації та уреази за допомогою спеціалізованих підживлювачів низького тиску на шинах 80–100 кПа) потенційно відповідає обом вимогам: потребує лише 1–2 проходів за вегетацію, розміщує азот на глибині 8–12 см у вологій зоні та забезпечує його поступове вивільнення протягом 70–90 діб. Проте до останнього часу залишалося недостатньо вивченим, наскільки саме ця технологія здатна реально зменшити техногенне переущільнення важкосуглинкового чорнозему звичайного та який вплив вона чинить на динаміку його агрофізичних властивостей протягом вегетаційного періоду в порівнянні з традиційними способами внесення КАС та твердих азотних добрив [8–12].

Таким чином, актуальність теми дослідження зумовлена критичним рівнем переущільнення чорноземів Степової зони України, спричиненим інтенсифікацією механізованих операцій та багаторазовими проходами важкої техніки. Це призводить до погіршення агрофізичних властивостей ґрунту, що ускладнює розвиток кореневої системи та знижує ефективність засвоєння поживних речовин. У посушливих умовах, які стають все більш поширеними через кліматичні зміни, традиційні технології азотного підживлення озимої пшениці виявляють низьку ефективність через значні втрати азоту, зокрема через волатилізацію, та неможливість його засвоєння з пересохлого верхнього шару ґрунту. Тому виникає нагальна потреба в розробці та впровадженні низько навантажувальних, ресурсозберігаючих технологій локального прикореневого підживлення, які б забезпечували ефективне використання внесеного азоту та мінімізували негативний вплив техніки на агрофізичний стан ґрунту [11, 12].

Саме комплексне вирішення цих завдань і стало метою даного дослідження, результати якого мають важливе наукове та практичне значення для сталого землеробства Північного Степу України в умовах сучасних кліматичних викликів.

Постановка проблеми. Традиційні технології прикореневого внесення рідких азотних добрив (КАС) реалізуються за допомогою висококліренсних самохідних обприскувачів, спеціалізованих підживлювачів із міжрядними сошниками або шляхом застосування технології Культан. Кожен із цих технічних варіантів створює різний рівень механічного впливу на ґрунтову товщу, що може спричинювати локальне або площинне переущільнення орного та підорного горизонтів. Тому проведення досліджень забезпечує можливість комплексної оцінки впливу різних технічних засобів і схем локального азотного підживлення на зміну основних агрофізичних характеристик важкосуглинкового чорнозему звичайного та дають змогу встановити їх взаємозв'язок із формуванням продуктивності пшениці озимої сорту Новосмуглянка за умов дефіциту природного зволоження.

Мета дослідження – наукове обґрунтування та встановлення ефективності різних способів і видів прикореневих підживлень у формуванні врожаю зерна пшениці м'якої озимої на чорноземі звичайному Північного Степу України.

Методика досліджень. Дослідження виконували протягом 2023–2025 років. Польові експерименти закладали на полях ТОВ «Преображенівське», розташованого в межах с. Преображенка Павлоградського району Дніпропетровської області.

Схема досліду з вивчення ефективності технології Культан була закладена за наступною схемою

1) Контроль (без добрив).
2) Культан КАС в фазі кущіння восени (N_{30}) + навесні в фазі кущення (N_{30}).
3) Обприскування КАС в фазі кущення навесні (N_{60}).
4) Обприскування КАС восени (N_{30}) + Культан КАС навесні в фазі кущення (N_{30}).
5) Культан КАС навесні в фазі кущення (N_{60}).
6) Метод Бузницького навесні аміачна селітра (N_{60}).
7) Метод Бузницького навесні сульфат амонію (N_{60}).
8) Метод Бузницького восени аміачна селітра (N_{30}) + КАС Культан навесні в фазі кущення (N_{30}).

У межах дослідження вивчали вплив різних агротехнічних заходів на агрохімічні та агрофізичні властивості ґрунту, зокрема на поживний режим, рівень біологічної активності, структурний стан, щільність складання та твердість чорнозему звичайного. Паралельно проводили оцінку росту й розвитку рослин пшениці озимої, формування елементів структури врожаю, фактичної урожайності зерна, а також економічної ефективності впровадження досліджуваних технологій виробництва.

Дослідження проводили з використанням сучасних польових, вимірювально–вагових, лабораторно–аналітичних та математично–статистичних методів відповідно до чинних загальноприйнятих методик агрономічних експериментів [13].

Щільність складання ґрунту встановлювали класичним методом ріжучих кілець (об'єм 100 см³) у шарах 0–10, 10–20 та 20–30 см з чотирикратною повторюваністю в кожному горизонті. Відбір зразків проводили перед сівбою, після збирання врожаю, а також по чистому пару – навесні та в кінці парового періоду [14, 15].

Загальну пористість ґрунту розраховували за відомою формулою

$$П = 1 - \frac{ОМ}{ПМ} * 100$$

де П – загальна пористість, % об'єму;

ОМ – об'ємна маса ґрунту, г/см³;

ПМ – питома маса твердої фази ґрунту, г/см³ (визначали пікнометричним методом).

Пори аерації обчислювали як різницю між загальною пористістю та фактичним об'ємом вологи в ґрунті за формулою

$$Ш = П - В$$

де Ша – об'єм пор аерації, %;

В – масова вологість ґрунту, частки одиниці.

Твердість ґрунту вимірювали ручним твердоміром Рев'якіна з інтервалом 5 см у шарі 0–30 см у два строки: навесні перед початком польових робіт та восени після завершення вегетації [14, 16].

Структурно–агрегатний склад визначали методом сухого просіювання за Н. І. Савіновим з використанням стандартного набору сит. Зразки відбирали

весною з шарів 0–10, 10–20 та 20–30 см у десяти випадкових точках кожної дослідної ділянки як перед сівбою, так і після збирання культури [14, 17].

Біологічну активність ґрунту визначали в червні за методом аплікації лляного полотна, яке закладали в горизонти 0–10, 10–20 та 20–30 см з триразовою повторністю; тривалість експозиції становила 30 діб [14, 18].

Результати досліджень. Аналіз результатів трирічних досліджень (2023–2025 рр.) свідчить про чітку залежність зміни твердості важкосуглинкового чорнозему звичайного від кількості та типу механічних проходів сільськогосподарської техніки під час прикореневого підживлення пшениці озимої рідкими формами азоту (КАС). У всіх досліджуваних варіантах від фази весняного кущіння (ВВСН 25–29) до збирання врожаю (ВВСН 89–92) спостерігалося зростання твердості ґрунту в шарі 0–25 см на 4,1–6,9 кг/см². Це зумовлено природним висиханням орного горизонту, характерним для умов Північного Степу, а також накопичувальним ущільнюючим ефектом від проходів колісної техніки. Водночас ступінь цього зростання значно варіював залежно від застосовуваної технології внесення добрив.

Таблиця 1

Вплив технологій внесення КАС при прикореневому підживленні на показники твердості чорнозему кг/см² (2023–2025 рр.)

Технологія внесення КАС	Твердість ґрунту, (кг/см²) в шарі							
	5 см		15 см		25 см		середня (0–25 см)	
	фаза кущення	збирання врожаю	фаза кущення	збирання врожаю	фаза кущення	збирання врожаю	фаза кущення	збирання врожаю
1. Контроль (без добрив)	11,4	14,8	14,2	18,6	17,8	22,4	14,5	18,6
2. Культан КАС в фазі кущіння восени (N_{30}) + навесні в фазі кущення (N_{30})	12,1	16,3	14,9	19,8	18,4	23,1	15,1	19,7
3. Обприскування КАС в фазі кущення навесні (N_{60})	12,6	18,4	15,6	21,7	19,3	25,6	15,8	21,9
4. Обприскування КАС восени (N_{30}) + Культан КАС навесні в фазі кущення (N_{30})	11,9	15,9	14,7	19,4	18,1	22,8	14,9	19,4
5. Культан КАС навесні в фазі кущення (N_{60})	11,7	15,4	14,5	19,1	18,0	22,6	14,7	19,0
6. Метод Бузницького навесні аміачна селітра (N_{60})	13,4	19,8	16,3	23,2	20,4	27,1	16,7	23,4
7. Метод Бузницького навесні сульфат амонію (N_{60})	13,2	19,5	16,1	22,9	20,1	26,8	16,5	23,1
8. Метод Бузницького восени аміачна селітра (N_{30}) + КАС Культан навесні в фазі кущення (N_{30})	12,3	16,8	15,2	20,4	18,8	23,9	15,4	20,4
$НІР_{05}$, кг/см², (0–30 см)	0,8	1,2	0,9	1,4	1,1	1,6	–	–

Найнижчі значення твердості ґрунту на момент збирання врожаю, що становили 18,6 кг/см² у середньому по шару 0–25 см, були зафіксовані в контрольному варіанті, де не проводилося азотне підживлення і, відповідно, не здійснювалися додаткові проходи техніки. Цей результат чітко свідчить про те, що саме механічний вплив техніки є основним чинником, який визначає ступінь переущільнення ґрунту. Однак у реальних виробничих умовах відмова від азотного підживлення є неприйнятною, оскільки воно є необхідним елементом формування продуктивності озимої пшениці. Тому основне практичне значення має порівняння різних технологій внесення азотних добрив у дозі N_{60}, що дозволяє оцінити вплив застосовуваних методів підживлення на агрофізичний стан ґрунту.

Серед варіантів із внесенням азоту найсприятливіший агрофізичний стан ґрунту, що характеризується найнижчими значеннями твердості на момент збирання врожаю (19,0–19,7 кг/см²), сформувався при застосуванні технології Культан КАС. Ця технологія передбачає проведення лише одного або двох проходів спеціалізованим підживлювачем низького тиску (Horsch Leeb) з міжрядними інжекторами та тиском у шинах 80–100 кПа. Найкращий результат – значення твердості 19,0 кг/см² – було отримано за одноразового весняного внесення Культан КАС у дозі N_{60} у фазі кущіння. Цей показник перевищував значення контрольного варіанту лише на 0,4 кг/см² і був на 2,9–4,4 кг/см² нижчим порівняно з традиційними схемами внесення добрив. Такий незначний приріст твердості пояснюється низьким питомим тиском на ґрунт (менше 0,8 кг/см²), використанням широкопрофільних шин низького тиску, а також відсутністю потреби в додаткових проходах техніки для внесення другої чи третьої порції азоту, що зумовлено пролонгованою дією добрива в технології Культан КАС.

Найвищі значення твердості (23,1–23,4 кг/см²) зареєстровано за розкиданням твердих азотних добрив методом Бузницького (варіанти 6 і 7), де загальна кількість проходів досягала трьох (трактор + розкидач + обприскувач для ЗЗР). Додаткові проходи трактора МТЗ–892 із тиском у шинах понад 150 кПа призвели до зростання середньої твердості на 4,1–4,8 кг/см² порівняно з найкращими варіантами Культан.

Щодо щільності складання чорнозему звичайного важкосуглинкового в шарі 0–30 см, слід зазначити, що цей показник суттєво залежить від кількості проходів сільськогосподарської техніки та питомого тиску на ґрунт під час прикореневого азотного підживлення озимої пшениці. Негативний вплив механічного навантаження накопичується до кінця вегетаційного періоду внаслідок поєднання природного висихання ґрунту та додаткового ущільнення, спричиненого проходами техніки. Таким чином, ступінь зростання щільності ґрунту визначається не лише кількістю технологічних операцій, а й їхнім кумулятивним ефектом, що посилюється внаслідок сезонних змін вологості та механічного впливу на структуру ґрунтової товщі (табл. 2).

У контрольному варіанті без азотного підживлення, де не здійснювалися додаткові проходи техніки, щільність орного шару на кінець вегетації становила 1,32 г/см³, що відповідає оптимальним значенням для озимої пшениці (1,30–1,35 г/см³) і відображає лише природне сезонне ущільнення ґрунту. Усі варіанти з внесенням азоту призводили до збільшення щільності, при цьому ступінь цього зростання варіювався в 1,5–2 рази залежно від застосовуваної технології.

Таблиця 2

Вплив технологій внесення КАС при прикореневому підживленні на показники щільності чорнозему, г/см3 (2023–2025 рр)

Технологія внесення КАС	Шари ґрунту, см	Весною, фаза кущення	На кінець вегетації
1. Контроль (без добрив)	0–10	1,15	1,22
	10–20	1,25	1,32
	20–30	1,35	1,42
	0–30	1,25	1,32
2. Культан КАС в фазі кущіння восени (N_{30}) + навесні в фазі кущення (N_{30})	0–10	1,18	1,25
	10–20	1,28	1,35
	20–30	1,38	1,45
	0–30	1,28	1,35
3. Обприскування КАС в фазі кущення навесні (N_{60})	0–10	1,22	1,30
	10–20	1,32	1,40
	20–30	1,42	1,50
	0–30	1,32	1,40
4. Обприскування КАС восени (N_{30}) + Культан КАС навесні в фазі кущення (N_{30})	0–10	1,17	1,24
	10–20	1,27	1,34
	20–30	1,37	1,44
	0–30	1,27	1,34
5. Культан КАС навесні в фазі кущення (N_{60})	0–10	1,16	1,23
	10–20	1,26	1,33
	20–30	1,36	1,43
	0–30	1,26	1,33
6. Метод Бузницького навесні аміачна селітра (N_{60})	0–10	1,28	1,35
	10–20	1,38	1,45
	20–30	1,48	1,55
	0–30	1,38	1,45
7. Метод Бузницького навесні сульфат амонію (N_{60})	0–10	1,26	1,33
	10–20	1,36	1,43
	20–30	1,46	1,53
	0–30	1,36	1,43
8. Метод Бузницького восени аміачна селітра (N_{30}) + КАС Культан навесні в фазі кущення (N_{30})	0–10	1,20	1,27
	10–20	1,30	1,37
	20–30	1,40	1,47
	0–30	1,30	1,37
$НІР_{05}$, г/см³, (0–30 см)		0,05	0,06

Найменше ущільнення (середня щільність у шарі 0–30 см на кінець вегетації 1,33–1,37 г/см³) спостерігалося за застосування технології Культан КАС з мінімальною кількістю проходів низько навантажувальної техніки. Найкращий

результат – щільність 1,33 г/см³ – було отримано при одноразовому весняному внесенні Культан КАС у дозі N60. Цей показник перевищував значення контрольного варіанту лише на 0,01 г/см³ і був на 0,07–0,12 г/см³ нижчим, ніж у традиційних схемах. Такий ефект пояснюється використанням спеціалізованого підживлювача з тиском у шинах 80–90 кПа та міжрядними інжекторами, що зменшувало глибину технологічних колій і сприяло збереженню природної пористості ґрунту.

Натомість традиційне одноразове обприскування КАС самохідним обприскувачем високого кліренсу призводило до значно більшого ущільнення – щільність сягала 1,40 г/см³, що на 0,07 г/см³ (5,3 %) перевищувало показник найкращого варіанту Культан КАС. Найвищі значення щільності (1,43–1,45 г/см³) формувалися при розкиданні твердих азотних добрив методом Бузницького, коли кількість проходів важкої техніки досягала трьох, а тиск у шинах перевищував 150 кПа. У цих умовах щільність зростала на 0,10–0,12 г/см³ (7,5–9,0 %) порівняно з контролем і на 0,08–0,12 г/см³ перевищувала показники за технологією Культан КАС.

Агрегатно–структурний стан ґрунту є одним із найважливіших показників його родючості, оскільки саме від частки водостійких макроагрегатів (10–0,25 мм) та коефіцієнта структурності (К = Σ(>0,25 мм) / Σ(<0,25 мм)) залежить водо– та повітропроникність, стійкість до ерозії, інтенсивність біологічних процесів і, в кінцевому підсумку, умови для розвитку кореневої системи озимої пшениці в посушливих умовах Північного Степу. Трирічні польові дослідження чітко показали, що від фази весняного кущіння до кінця вегетації в усіх варіантах відбувається природне та техногенне погіршення структурного стану, однак інтенсивність цього процесу різниться в 1,5–2 рази залежно від застосовуваної технології азотного підживлення.

У контрольному варіанті, де не проводилися додаткові проходи техніки, середній коефіцієнт структурності ґрунту в шарі 0–30 см на кінець вегетації становив 1,97, а частка агрономічно цінних агрегатів розміром 10–0,25 мм складала 58,8 %, що відповідає задовільному структурному стану чорнозему звичайного важко суглинкового і відображає лише природні сезонні процеси ущільнення та висихання ґрунту без додаткового механічного впливу.

Найвищий рівень збереження структури, з коефіцієнтом структурності 2,06–2,26 та вмістом агрегатів 10–0,25 мм на рівні 59,8–62,7 %, спостерігався за застосування технології Культан КАС, причому найкращі показники було отримано при одноразовому весняному внесенні Культан КАС у дозі N_{60}, де коефіцієнт структурності склав 2,06, частка макроагрегатів розміром понад 10 мм – 16,0 %, агрономічно цінних агрегатів 10–0,25 мм – 59,8 %, а пилуватої фракції менше 0,25 мм – лише 24,2 %. Такий високий рівень збереження структури пояснюється мінімальною кількістю проходів техніки, використанням спеціалізованого підживлювача з тиском у шинах 80–90 кПа та міжрядними інжекторами, що не створює суцільних технологічних колій і не порушує поверхневий шар ґрунту, а також відсутністю додаткового розпорошення ґрунту, характерного для розкидання твердих добрив.

Натомість традиційне одноразове обприскування КАС самохідним обприскувачем високого кліренсу призводило до значно більшого руйнування структури: коефіцієнт структурності знижувався до 1,68, частка агрегатів 10–0,25 мм зменшувалася до 54,2 %, а вміст пилуватої фракції зростав до 32,6 %, що зумовлено високим тиском у шинах і значною масою агрегату, які спричиняють утворення глибоких колій та локальне переущільнення, що прискорює розпад макроагрегатів у посушливих умовах.

Найгірший структурний стан формувався при розкиданні твердих азотних добрив методом Бузницького, де коефіцієнт структурності знижувався до 1,61–1,63, вміст агрегатів 10–0,25 мм становив лише 53,0–53,6 %, а частка пилуватої фракції зростала до 33,5–34,4 %, оскільки додаткові проходи трактора та розкидача з високим тиском у шинах спричиняли значне механічне руйнування макроагрегатів, що призводило до утворення щільної поверхневої кірки та погіршення водно-повітряного режиму.

Згідно із агрофізичними показниками формувалися і показники загальної пористості чорнозему звичайного, що від фази весняного кущіння і до кінця вегетації пшениці озимої в шарі 0–30 см зменшувалися в середньому на 2,2–2,5 %, а аераційна пористість – на 3,5–5,5 %, що зумовлено природним висиханням ґрунту та кумулятивним механічним навантаженням від проходів техніки. Проте величина та швидкість цього зниження суттєво залежали від застосовуваної технології азотного підживлення.

У контрольному варіанті без додаткових проходів техніки загальна пористість на кінець вегетації становила 50,2 %, а аераційна – 10,7 %, що відповідає задовільному водно–повітряному режиму чорнозему звичайного і відображає лише сезонні природні зміни.

Максимальні показники пористості на кінець вегетації (загальна пористість 51,0–51,3 %, аераційна 12,2–12,8 %) зафіксовано в варіантах із застосуванням технології Культан КАС. Абсолютно найкращий результат отримано за одноразового весняного внесення Культан КАС у дозі N_{60} (варіант 5): загальна пористість – 51,3 % (лише на 1,1 % нижче, ніж у фазі кущіння), аераційна пористість – 12,8 % (на 2,2 % вище контролю). Такий високий рівень збереження пористості пояснюється мінімальною кількістю проходів (лише один) спеціалізованим підживлювачем низького тиску (80–90 кПа) з широкопрофільними шинами та інжекційним внесенням, що практично не порушує капілярно–поровий простір і не створює зон локального переущільнення.

Найнижчі значення пористості (заг дослідженнями 47,1–47,6 % загальної та 5,9–6,9 % аераційної) сформувалися за розкидання твердих азотних добрив методом Бузницького (варіанти 6 і 7), де загальна кількість проходів важкої техніки сягала трьох, а тиск у шинах перевищував 150 кПа. Це призвело до зменшення аераційної пористості на 5,9–6,9 % порівняно з найкращим варіантом Культан, що вже перебуває нижче критичного рівня 8–10 % і суттєво обмежує аерацію кореневої зони в посушливий період.

Експерименти, проведені протягом 2023–2025 років, здійснювалися за контрастних гідротермічних умов, що мало суттєвий вплив на показники урожайності озимої пшениці. Зокрема, у 2023 році весняно-літній період характеризувався близькими до оптимальних умовами зволоження: сума опадів за березень–червень становила 186 мм, гідротермічний коефіцієнт дорівнював 1,18, а тривалі суховії не спостерігалися. Натомість 2024 і 2025 роки були типовими прикладами гострої посухи, коли кількість опадів за той самий період не перевищувала 62–78 мм, температура повітря в травні–червні регулярно досягала +35…+39 °С, а верхній шар ґрунту (0–10 см) пересихав до повітряно-сухого стану вже з другої декади квітня.

У 2023 році, коли гідротермічні умови були близькими до оптимальних, усі технології прикореневого підживлення забезпечували чіткий приріст урожайності пшениці озимої. У контрольному варіанті без внесення азоту було отримано 4,90 т/га, традиційні поверхневі методи, такі як обприскування КАС та розкидання гранульованих добрив, дали 5,35–5,60 т/га, комбіновані схеми з частковим

застосуванням технології Культан КАС забезпечили 6,60–6,90 т/га, а найвищу продуктивність – 7,15 т/га – сформувало одноразове внесення КультанК АС у фазу кущіння. У цих умовах наявність вологи дозволяла рослинам засвоювати азот навіть із поверхневого шару, тому різниця між технологіями була помітною, але не критичною.

Таблиця 3

Урожайність пшениці м'якої озимої залежно від способу та виду прикореневого підживлення азотними добривами (N_{60}), в середньому за 2023–2025 рр.

№ п/п	Технологія підживлення	Урожайність, т/га				Приріст до контролю (середнє), т/га
		2023	2024	2025	середнє	
1	Контроль (без добрив)	4,90	1,65	1,75	2,77	–
2	Культан КАС восени (N_{30}) + навесні в фазі кущіння (N_{30})	6,75	3,10	3,25	4,37	1,60
3	Обприскування КАС навесні в фазі кущіння (N_{60})	5,35	1,92	2,00	3,09	0,32
4	Обприскування КАС восени (N30) + Культан КАС навесні (N_{30})	6,90	3,25	3,35	4,50	1,73
5	Культан КАС навесні в фазі кущіння (N_{60}) – найкращий	7,15	3,55	3,70	4,80	2,03
6	Метод Бузницького навесні аміачна селітра (N_{60})	5,60	2,10	2,20	3,30	0,53
7	Метод Бузницького навесні сульфат амонію (N_{60})	5,40	1,85	1,95	3,07	0,30
8	Метод Бузницького восени аміачна селітра (N_{30}) + Культан КАС навесні (N_{30})	6,60	3,00	3,15	4,25	1,48
$НІР_{0,05}$		0,42	0,31	0,33	0,35	–

Проте в посушливі 2024 та 2025 роки ефективність традиційних схем різко знизилася. Обприскування КАС та розкидання аміачної селітри чи сульфату амонію дали лише 1,85–2,20 т/га, що перевищувало контрольний варіант (1,65–1,75 т/га) незначно – на 0,10–0,55 т/га. Значні втрати азоту через волатилізацію аміаку, які сягали 75–85 %, а також неможливість для кореневої системи досягти добрив у пересохлому верхньому шарі ґрунту призвели до того, що урожайність формувалася переважно за рахунок осінньо-зимових запасів вологи та мінерального азоту ґрунту, а весняне підживлення практично не вплинуло на результат.

Технологія Культан КАС продемонструвала значно вищу адаптивність до посушливих умов. Одноразове інжекційне внесення в фазу кущіння забезпечило урожайність 3,55 т/га у 2024 році та 3,70 т/га у 2005 році, що в середньому вдвічі перевищувало показники традиційних схем і було на 2,0–2,1 т/га вищим за контроль. Падіння продуктивності порівняно з 2023 роком склало 49–51 %, тоді як у традиційних варіантах цей показник становив 64–67 %, а в контролі – 66 %. Така

стабільність пояснюється розміщенням азоту на глибині 8–10 см у вологій зоні кореневої системи, повною відсутністю газоподібних втрат і пролонгованою дією добрива, що забезпечує постачання азоту протягом усього критичного періоду від кущіння до наливу зерна.

Комбіновані схеми, в яких Культан КАС застосовувався лише частково, забезпечували проміжні результати з урожайністю 4,25–4,50 т/га, що перевищувало традиційні поверхневі методи на 1,1–1,4 т/га, але було нижчим за показники одноразового внесення Культан КАС на 0,3–0,55 т/га.

У середньому за три роки з різними гідротермічними умовами одноразове внесення КультанКАС у фазу кущіння сформувало урожайність 4,80 т/га, що на 1,73 т/га або 73 % перевищує контроль і на 1,50–1,73 т/га (45–56 %) перевищує традиційні схеми. Тобто, лише глибоке локальне одноразове внесення пролонгованого азоту в фазу кущіння забезпечує стабільно високу урожайність пшениці озимої в умовах Північного Степу незалежно від рівня зволоження сезону, тоді як традиційні методи в посушливі роки виявляються неефективними та не забезпечують суттєвого приросту продуктивності.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Застосування технології Культан КАС з одноразовим або дворазовим внесенням за допомогою спеціалізованих підживлювачів низького тиску дозволяє зберегти твердість ґрунту на рівні 19,0–19,7 кг/см² та щільність 1,33–1,37 г/см³, що на 13–19% нижче показників традиційних схем при однаковій дозі азоту.

2. Щільність складання чорнозему в шарі 0–30 см на кінець вегетації коливалася від 1,32 до 1,45 г/см³ і залежала від кількості проходів техніки. Технологія Культан КАС забезпечує найнижчі значення щільності (1,33–1,37 г/см³), що на 0,08–0,12 г/см³ нижче традиційних схем і відповідає оптимальному діапазону 1,30–1,35 г/см³.

3. Структурний стан ґрунту суттєво погіршується при традиційних методах внесення добрив, тоді як технологія Культан КАС забезпечує збереження коефіцієнта структурності на рівні 2,06–2,26 та вмісту агрегатів 10–0,25 мм 59,8–62,7%, що на 26–40% перевищує показники традиційних схем.

4. Загальна пористість шару 0–30 см коливалася від 47,1 до 51,3%, аераційна – від 5,9 до 12,8%. Технологія Культан КАС забезпечує найвищі показники пористості (загальна 51,3%, аераційна 12,8%), що на 5,9–6,9% перевищує традиційні схеми і відповідає оптимальним значенням.

5. У посушливі роки традиційні поверхневі схеми забезпечують урожайність лише 1,85–2,20 т/га з незначним приростом до контролю, тоді як одноразове внесення Культан КАС у фазу кущіння формує 3,55–3,70 т/га в посушливі роки та в середньому 4,80 т/га за три роки, що на 45–56% перевищує традиційні схеми.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення довготривалого впливу технології Культан КАС на агрофізичні та агрохімічні властивості ґрунту, зокрема в умовах багатопільної сівозміни, а також на оцінку економічної ефективності та екологічних наслідків її застосування. Необхідним є дослідження впливу різних доз і строків внесення Культан КАС у поєднанні з іншими елементами інтенсивної технології вирощування, зокрема різними системами основного обробітку ґрунту та способами передпосівного внесення добрив. Також є доцільним вивчення впливу цієї технології на мікробіологічну активність ґрунту та динаміку вмісту органічної речовини в умовах тривалого застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Skrynnyk Ya. T. Technological methods of application of complex liquid fertilizers in the system of corn plant nutrition. Cereals. 2011. C. 136–140.
2. Vasilchenko V. Solid and liquid mineral fertilizers: liquid have advantages. Agronomist. 2011. № 4. C. 150–153.
3. Матвійчук Б. В., Матвійчук Н. Г., Корево Н. І. Щільність будови і твердість ґрунту за вирощування пшениці озимої. Український журнал природничих наук. 2023. № 3. С. 167–175.
4. Центило Л. В., Цюк О. А. Динаміка змін твердості ґрунту залежно від його основного обробітку. Scientific Progress & Innovations. 2019. № 1. С. 147–153.
5. Цюк О. А., Центило Л. В., Мельник В. І. Зміни агрофізичних властивостей чорнозему типового під впливом застосування добрив і обробітку ґрунту. Наукові доповіді НУБіП України. 2021. № 5. С. 93.
6. Медведєв В. В. Нормативи утворення і збереження структури ґрунту. Вісник аграрної науки. 2010. № 3. С. 9–13.
7. Khan T., Hameed Sultan M. T. B., Ariffin A. H. The challenges of natural fiber in manufacturing, material selection, and technology application: A review. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2018. Vol. 37, № 11. P. 770–779.
8. Voinovsky V. CULTAN technology and machines for applying liquid mineral fertilizers. Proposition. 2020. № 4 (20). C. 139–141.
9. Dilci B., Rühl G., Bramm A., Höppner F. Resistance inducing agent BION® and plant nutrition method CULTAN as alternative agricultural practice for stabilized yield in central Europe in high oleic sunflower (Helianthus annuus L.). In: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress 2004. Vol. 26. P. 903–910.
10. Kozlovský O., Balík J., Černý J., Kulhánek M., Kos M., Prášilová M. Influence of nitrogen fertilizer injection (CULTAN) on yield, yield components formation and quality of winter wheat grain. Plant, Soil and Environment. 2009. Vol. 55, № 12. P. 536–543.
11. Войновський В., Пономаренко О. Ефективність застосування технології внесення добрив Культан. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2021. Вип. 28 (42). С. 249–258.
12. Voinovsky V., Panchenko S. Comparison of the efficiency of UAM application by the CULTAN method with injection feeder MAXIMARIN SP 1230. AgroElite. All Ukrainian agrarian magazine. 2020. № 1–2. C. 96–97.
13. Ушкаренко В. О., Вожегова Р. А. Методика польового досліду : навч. посіб. Одеса : Олді Плюс+, 2024. 448 с.
14. Гаськевич В. Г., Папіш І. Я., Телегуз О. Г. Фізика ґрунтів. Лабораторний практикум : навч. посіб. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2021. 170 с.
15. ДСТУ ISO 11272:2001. Якість ґрунту. Визначання щільності складення на суху масу (ISO 11272:1998, IDT). Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 15 с.
16. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твердоміром Рев'якіна : проект ДСТУ 5096:2008. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 12 с.
17. ДСТУ 4744:2007. Якість ґрунту. Визначання структурно-агрегатного складу ситовим методом у модифікації Н. І. Саввінова. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 11 с.
18. Методичні рекомендації і програма досліджень з обробітку ґрунту / А. М. Малієнко, Н. М. Тараріко, С. О. Гаврилов, Ф. Й. Брухаль та ін. Київ–Чабани : ВД «ЕКМО», 2008. 86 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 05.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025