

УДК 633.111»324»:631.81:631.445.4(251.1–17:477)
DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.34.24>

ДИНАМІКА УМІСТУ АЗОТУ ПІД ВПЛИВОМ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПРИКОРЕНЕВОГО ПІДЖИВЛЕННЯ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ В УМОВАХ ПІВНІЧНОГО СТЕПУ УКРАЇНИ

ТКАЛІЧ Ю. І. – доктор сільськогосподарських наук, професор.

orcid.org/0000-0003-2208-0163

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Міністерства освіти і науки України

ДЕНИСЕНКО А. В. – аспірант

orcid.org/0009-0003-3645-1487

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Міністерства освіти і науки України

Постановка проблеми. Продуктивність азотного живлення пшениці озимої в степовій зоні України визначається не лише кількістю та хімічною формою застосовуваних добрив, але й передусім технологією їх внесення в ґрунт. Саме спосіб введення поживних речовин значним чином обумовлює інтенсивність і повноту їх засвоєння рослинами, ступінь втрат азоту внаслідок природних процесів його перетворення, а також характер динамічних змін агрохімічного стану ґрунтового середовища протягом повного циклу вегетації [1].

Традиційні способи прикореневого підживлення, які передбачають поверхневе розкидання гранульованих добрив або багаторазове поверхневе внесення карбамідно-аміачної суміші, супроводжуються суттєвими втратами азоту. Основними причинами таких втрат є аммонійна волатилізація, переміщення нітратів у глибші шари ґрунту внаслідок вимивання та процеси мікробної денітрифікації. Унаслідок цих явищ частка азоту, яка фактично засвоюється рослинами, не перевищує 40–55 %, що призводить до неефективного використання значних обсягів дорогих добрив і зниження загальної ефективності системи живлення [2].

Натомість застосування сучасних технологій, які передбачають локалізоване внесення рідких азотних добрив із контрольованим тривалим вивільненням поживних речовин, зокрема за допомогою глибокої інжекції, наприклад, технології Культан КАС, забезпечує значно кращі результати. Ці методи дозволяють знизити втрати азоту до мінімуму, забезпечити його спрямовану подачу безпосередньо до зони активного поглинання кореневою системою у періоди найбільшого попиту рослин і зменшити негативний вплив на агрохімічні характеристики ґрунту [3].

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 [3, 4].

Технологія Культан КАС (інжекційне локальне внесення стабілізованого КАС із інгібіторами нітрифікації та уреазі 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 [4].

Для достовірної оцінки ефективності різних способів прикореневого підживлення необхідно проводити систематичний контроль вмісту доступних форм азоту (нітратного та амонійного) та показників кислотності ґрунтового розчину в основному орному шарі на ключових етапах розвитку рослин. Такий підхід дає змогу детально дослідити особливості трансформації поживних речовин залежно від способу їх внесення та сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимальної стратегії азотного живлення. Це дозволяє досягти максимальної доступності поживних елементів для рослин при одночасному збереженні та підтримці родючості ґрунту в умовах Північного Степу України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження (2020–2025 рр.) фокусуються на дробному внесенні азотних добрив, впливі строків і доз на міграцію азоту, його засвоєння рослинами та залишковий вміст у ґрунті [5]. Основні способи прикореневого підживлення включають поверхневе розкидання (по мерзлоталому ґрунту), внесення в рядки з загортанням та використання рідких форм, таких як карбамідно-аміачна суміш (КАС) [6]. Дослідження показують, що оптимальне прикоренево підживлення $N_{30}-N_{90}$ у фазі кушіння підвищує коефіцієнт використання азоту на 25–50 %, зменшує вимивання нітратів і сприяє формуванню зерна 1–2 класу якості [7].

У Північному Степу України, де ґрунти переважно чорноземні з низьким запасом вологозапасу (170–350 мм за вегетацію), динаміка азоту залежить від фази внесення, форми добрив і погодних умов. Ранньовеснянє прикореневе підживлення аміачною селітрою (N_{30-45}) по мерзлоталому ґрунту забезпечує швидке накопичення нітратного азоту в орному шарі (0–20 см), з піком засвоєння 70–80 % у фазі кушіння, але при посуші втрати через денітрифікацію сягають 15–20 % [8]. Дослідження Желязкова О. І. демонструють, що дробне внесення (N_{30} восени + N_{60} навесні) стабілізує вміст легко гідролізованого азоту на рівні 120–150 мг/кг у шарі 0–40 см, підвищуючи врожайність на 0,6–1,2 т/га порівняно з одноразовим внесенням [8].

Для сортів типу «Смуглянка» та «Литанівка» прикореневе підживлення карбамідом (N_{40-60}) у фазі весняного кушіння після чорного пару або гороху збільшує вміст азоту в зерні на 1,5–2 % (до 14–16 %), з КУА 45–55 %, але надмірні дози ($>N_{120}$) призводять до накопичення залишкового нітрату в ґрунті (до 50 кг/га в шарі 40–100 см). У 2022–2023 рр. локальне внесення добрив в рядки (глибина 5–7 см), зменшує вимивання азоту на 30 % за рахунок фіксації амонійної форми, сприяючи кращому розвитку кореневої системи (зростання на 20–25 % у глибоких шарах) [10]. Порівняльний аналіз способів показує перевагу комбінованого підживлення (поверхнєве + рядкове) для умов Степу: вміст мінерального азоту в ґрунті стабілізується на 100–130 мг/кг, з мінімальними втратами (5–10 %) під час весняно-літньої вегетації [9, 10].

Карбамідно-аміачна суміш (КАС-28/30/32) як рідке добриво з трьома формами азоту (нітратна 25 %, аміачна 25 %, амідна 50 %) є перспективним для прикореневого підживлення в Степу завдяки пролонгованій дії та низьким втратам (до 10 % на випаровування) [1, 2]. Технологія Культан (Cultan – локальне внесення в ґрунт на глибину 6–7 см з інтервалом 13 см під корінь за допомогою інжекторів) вивчена в Україні з 2019–2024 рр. як спосіб точного азотного живлення, що підвищує коефіцієнт використання добрив на 20–30 % порівняно з поверхневим розкиданням [2]. Дослідження показують, що внесення КАС-32 (100–200 кг/га, N_{30-60}) у фазу кушіння за Культан зменшує опіки листя (ризик <5 % при температурі <10 °С) і забезпечує рівномірне накопичення азоту в кореневій зоні (шар 10–30 см), з піком засвоєння 65–75 % у трубкуванні [6].

У Степу норми КАС за Культан: перше внесення (відновлення вегетації) – 80–100 кг/га (N_{25-32}), друге (кушіння) – 120 кг/га (N_{38-40}), що підвищує врожайність на 0,5–1 т/га і знижує залишковий азот у ґрунті на 15–25 % [9, 10]. Стан вивчення: технологія впроваджується в господарствах Харківської та Дніпропетровської областей, але потребує адаптації до посухи (розведення 1:2 при температурі >16 °С для уникнення опіків). Обмеження – відсутність широкомасштабних польових випробувань у 2024–2025 рр., фокус на моделях симуляції (HYDRUS) для прогнозу динаміки [11]. Перспективи: інтеграція з датчиками вологості для site-specific внесення, що може знизити дози на 10–15 %.

Останні дослідження підтверджують, що динаміка азоту в умовах Північного Степу оптимізується дробним

прикореневим підживленням (N_{60-90}), з акцентом на локальні способи для зменшення втрат. Технологія Культан з КАС є інноваційною, але вимагає подальших студій щодо екологічної безпеки. Рекомендації: моніторинг вмісту азоту в ґрунті та листкова діагностика для адаптації доз [11].

Мета дослідження – є наукове обґрунтування та встановлення закономірностей динаміки азоту в ґрунті залежно від різних способів і видів прикореневого підживлення при формуванні врожаю зерна м'якої озимої пшениці на звичайних чорноземах Північного Степу України

Матеріали та методика досліджень. Експериментальна робота виконувалася в 2023–2025 роках. Польові досліди були закладені на полях ТОВ «Преображенівське», яке розташоване в межах села Преображенка Павлоградського району Дніпропетровської області.

Для дослідження ефективності застосування технології Культан, а саме динаміки азотного живлення рослин пшениці озимої було закладено дослід за наступною схемою:

- 1) Контроль (без добрив).
- 2) Культан КАС в фазі кушіння восени (N_{30}) + навесні в фазі кушіння (N_{30}).
- 3) Обприскування КАС в фазі кушіння навесні (N_{60}).
- 4) Обприскування КАС восени (N_{30}) + Культан КАС навесні в фазі кушіння (N_{30}).
- 5) Культан КАС навесні в фазі кушіння (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 кушіння (N_{30}).

Методика дослідження базувалася на застосуванні сучасних польових, вагово-вимірних, лабораторно-аналітичних та математично-статистичних методів, які відповідали чинним методичним вимогам і стандартам, прийнятним у проведенні агрономічних польових дослідів [12].

Відбір зразків ґрунту для проведення агрохімічного аналізу здійснювали навесні з глибин 0–10 см, 10–20 см та 20–30 см у всіх варіантах дослідів. Збір ґрунтових зразків проводили по п'яти точках, розташованих діагонально на площі дослідних ділянок першого та третього повторів. Зразки рослинного матеріалу відбирали безпосередньо перед початком збирання урожаю. Підготовку як ґрунтових, так і рослинних зразків до подальших лабораторних досліджень виконували відповідно до методичних рекомендацій О. А. Кувшинова [14].

Агрохімічні аналізи проводили із застосуванням стандартних методів, зокрема:

- визначення вмісту загального азоту та фосфору здійснювали за методикою, розробленою К. Є. Гінзбургом, Г. М. Щегловою та Е. А. Вульфійус [13–18];
- концентрацію нітратного азоту ($N-NO_3$) визначали спектрофотометричним методом за Кравковим як у свіжих ґрунтових зразках, так і після їх семиденного компостування [13–18].

Результати досліджень. Динаміка вмісту доступних форм азоту в орному шарі ґрунту протягом вегетаційного

періоду пшениці озимої є основним індикатором ефективності застосовуваних технологій підживлення та їхнього впливу на збереження родючості звичайного чорнозему в посушливих умовах Степу України [1, 2].

Результати трирічних польових досліджень (2023–2025 рр.), представлені в таблиці 1, продемонстрували, що спосіб внесення азотних добрив визначає не лише початковий рівень доступності поживних речовин на етапі весняного куціння, але й особливості їх трансформації протягом усього вегетаційного періоду озимої пшениці. У посушливих умовах Північного Степу ці процеси мають визначальне значення для забезпечення формування високопродуктивного та стабільного врожаю.

Найвищий рівень вмісту нітратного азоту на початку фази куціння (25,4–26,1 мг/кг) спостерігався при традиційних методах внесення добрив, зокрема при розкиданні твердих добрив методом Бузницького та одноразовому поверхневому обприскуванню карбамідно-аміачною сумішшю за допомогою самохідного обприскувача. Це пояснюється швидким перетворенням аміачної форми азоту на нітратну та значною початковою концентрацією поживних речовин у поверхневому шарі ґрунту.

Однак уже через 25–35 днів, у фазі виходу рослин у трубку, у цих варіантах відзначалося значне зниження вмісту нітратного азоту до 14,7–16,3 мг/кг, а напередодні збирання врожаю його залишковий вміст становив лише 7,6–8,9 мг/кг, що перевищувало контрольний варіант на 58–85 %. Така швидка втрата доступного азоту зумовлена низкою процесів, зокрема значними газоподібними втратами аміаку, особливо за умов підвищених температур повітря (понад 18–20 °C) та лужної реакції ґрунтового розчину (рН 7,2–7,6), частковою денітрифікацією в локальних зонах тимчасового перезволоження після опадів, а також вимиванням нітратів за межі кореневого шару під час інтенсивних злив.

Навпаки, застосування технології Культан КАС, яка базується на глибокому інжекційному внесенні висококонцентрованого розчину безпосередньо в зону розташування кореневої системи, забезпечило якісно інший

характер азотного живлення з пролонгованим ефектом. У цих варіантах максимальний вміст нітратного азоту спостерігався не на етапі весняного куціння, а в період виходу рослин у трубку та колосіння, коли фізіологічна потреба озимої пшениці в азоті є найбільшою через активне формування репродуктивних органів. У цей період концентрація нітратного азоту становила 20,6–24,1 мг/кг.

Перед збиранням врожаю залишковий вміст нітратного азоту в цих варіантах зберігався на рівні 12,9–15,8 мг/кг, що в 1,7–2,1 рази перевищувало показники, отримані при використанні традиційних методів внесення добрив. Найвищий рівень залишкового азоту – 15,8 мг/кг нітратного азоту та 11,4 мг/кг амонійного азоту (загалом 27,2 мг/кг доступних форм азоту) – було досягнуто при одноразовому весняному внесенні Культан КАС у дозі N_{60} . Цей показник перевищував вміст залишкового азоту у варіантах із поверхневим обприскуванням та розкиданням твердих добрив на 91–102 %.

Такий пролонгований ефект забезпечується фізичним захистом добрива від газоподібних втрат завдяки внесенню на глибину 8–10 см, поступовим вивільненням азоту з локальних зон внесення протягом 70–90 днів, а також меншою активністю уреазы та нітрифікуючих мікроорганізмів у зонах високої локальної концентрації добрив.

Результати трирічних досліджень балансу азоту, проведених за умов значних коливань рівня зволоження (2023 рік характеризувався сприятливими погодними умовами, тоді як 2024–2025 роки були аномально посушливими), продемонстрували, що за однакової дози внесеного азоту (N_{60}) формування балансу цього елемента в ґрунті визначалося виключно ефективністю його засвоєння рослинами та обсягом непродуктивних втрат. У посушливих умовах Північного Степу ці показники значною мірою залежали від способу та глибини розміщення добрив.

У контрольному варіанті, де добрива не вносили, середнє винесення азоту з урожаєм становило лише

Таблиця 1

Динаміка рухомих сполук азоту в ґрунті за прикореневого підживлення пшениці озимої в фазі куціння залежно від технології внесення КАС в шарі 0–30 см, мг/кг (середнє за 2023–2025 рр.)

Технологія внесення КАС	N–NO ₃			N–NH ₄		
	Фази розвитку пшениці озимої					
	куціння	вихід у трубку	перед збиранням	куціння	вихід у трубку	перед збиранням
1. Контроль (без добрив)	8,4	6,2	4,8	5,1	4,3	3,8
2. Культан КАС в фазі куціння восени (N_{30}) + навесні в фазі куціння (N_{30})	18,6	22,4	14,2	12,8	15,3	10,6
3. Обприскування КАС в фазі куціння навесні (N_{60})	24,8	16,3	8,9	14,2	9,8	6,1
4. Обприскування КАС восени (N_{30}) + Культан КАС навесні в фазі куціння (N_{30})	19,3	21,8	13,8	13,1	14,9	10,2
5. Культан КАС навесні в фазі куціння (N_{60})	20,5	24,1	15,8	13,6	16,8	11,4
6. Метод Бузницького навесні аміачна селітра (N_{60})	26,1	14,7	7,6	18,4	10,2	5,4
7. Метод Бузницького навесні сульфат амонію (N_{60})	25,4	15,2	8,1	19,1	11,0	5,8
8. Метод Бузницького восени аміачна селітра (N_{30}) + КАС Культан навесні в фазі куціння (N_{30})	17,9	20,6	12,9	12,4	14,1	9,7
HIP_{05} , %, для шару 0–30 см	1,4	1,6	1,2	1,1	1,3	0,9

78 кг/га, що призводило до формування найбільш вираженого дефіциту азоту в балансі (-78 кг/га). Цей результат відображав природний рівень мінералізації органічних речовин ґрунту за умов низької продуктивності агроценозу, що не супроводжувався додатковим зовнішнім надходженням азоту (табл. 2).

Таблиця 2

Баланс азоту за різних технологій прикореневого підживлення пшениці озимої в середньому за 2023–2025 рр. (шар 0–30 см) кг/га

Технологія внесення КАС	Внесено N	Винесено N з урожаєм	Баланс азоту (N)
1. Контроль (без добрив)	0	78	-78
2. Культан КАС в фазі куціння восени (N ₃₀) + навесні в фазі куціння (N ₃₀)	60	108	-48
3. Обприскування КАС в фазі куціння навесні (N ₆₀)	60	96	-36
4. Обприскування КАС восени (N ₃₀) + Культан КАС навесні в фазі куціння (N ₃₀)	60	114	-54
5. Культан КАС навесні в фазі куціння (N ₆₀)	60	122	-62
6. Метод Бузницького навесні аміачна селітра (N ₆₀)	60	88	-28
7. Метод Бузницького навесні сульфат амонію (N ₆₀)	60	92	-32
8. Метод Бузницького восени аміачна селітра (N ₃₀) + КАС Культан навесні в фазі куціння (N ₃₀)	60	104	-44

Традиційні методи внесення добрив, зокрема одноразове поверхнєве обприскування карбамідно-аміачною сумішшю самохідним обприскувачем та дво- або трьоразове поверхнєве розкидання твердих азотних добрив методом Бузницького, характеризувалися найнижчим рівнем винесення азоту з урожаєм (88–96 кг/га) та найгіршими показниками балансу азоту (від -28 до -36 кг/га).

Ці результати відповідали низькому коефіцієнту використання внесеного азоту, який становив лише 16,7–30,0 %. Таким чином, 70–83 % внесеної кількості азоту не було засвоєно рослинами і зазнало непродуктивних втрат. Основними причинами таких втрат були інтенсивна волатилізація аміаку з поверхні сухого ґрунту за умов високих температур повітря (понад 22 °С) та лужної реакції ґрунтового розчину (рН 7,4–7,6), швидке утворення поверхнєвої кірки після обприскування, що перешкоджало проникненню добрив у ґрунт, неповне розчинення гранул селітри через нерегулярні опади, а також недостатній розвиток кореневої системи в умовах посухи. Через ці фактори рослини не могли встигнути

засвоїти доступний азот до того, як він зазнавав значних втрат через газоподібні процеси та вимивання.

Технологія Культан КАС у всіх досліджуваних варіантах виявила значно вищу ефективність, навіть за умов екстремальної посухи. Завдяки глибокому інжекційному внесенню добрив на глибину 8–10 см безпосередньо в міжряддя, у вологу зону розташування кореневої системи, та формуванню локальних депо з пролонгованим вивільненням азоту, втрати цього елемента були зведені до мінімуму.

Найвищий показник винесення азоту з урожаєм, що склав 122 кг/га, та найменш виражений дефіцит балансу (-62 кг/га) було отримано при одноразовому весняному внесенні Культан КАС у дозі N₆₀. Цей варіант забезпечував коефіцієнт використання азоту на рівні 73,3 %, що в 2,4–4,4 раза перевищує показники, отримані при застосуванні традиційних методів внесення добрив.

Комбіновані схеми, які передбачали часткове використання технології Культан, посідали проміжне становище за всіма показниками: винесення азоту з урожаєм становило 104–114 кг/га, коефіцієнт використання азоту коливався в межах 43,3–60,0 %, а баланс азоту дорівнював -44...-54 кг/га.

Дані, наведені в таблиці 3, переконливо свідчать, що при однаковій кількості внесеного азоту (N₆₀) ефективність його використання рослинами та формування балансу в системі «ґрунт–рослина» в умовах Північного Степу можуть відрізнятися в 4,4 рази і залежать виключно від застосовуваної технології внесення добрив.

Ця відмінність набуває особливо важливого значення в посушливі та екстремально посушливі роки, наприклад, 2024–2025, коли дефіцит вологи суттєво обмежує переміщення поживних речовин у ґрунті та сприяє значним непродуктивним втратам азоту. За таких умов ступінь доступності внесених добрив для рослин визначається переважно способом і глибиною їх розміщення в ґрунті, оскільки обмежена кількість доступної вологи не дозволяє поживним речовинам ефективно переміщуватися з поверхневих шарів до зони активного поглинання кореневою системою. Таким чином, вибір технології внесення добрив відіграє вирішальну роль у забезпеченні ефективного використання азоту в умовах недостатнього зволоження.

Найвищий коефіцієнт використання азоту, що склав 73,3 %, та найменш виражений дефіцит балансу (-62 кг/га) були досягнуті при одноразовому весняному внесенні Культан КАС у дозі N₆₀ (варіант 5). Це означає, що з внесених 60 кг азоту рослини засвоїли 44 кг, тоді як непродуктивні втрати склали лише 16 кг/га. Така висока ефективність, зокрема в умовах посушливих років, зумовлена трьома основними факторами: внесенням добрив методом глибокої інжекції безпосередньо у вологу зону кореневого шару на глибину 8–10 см, що забезпечує фізичний захист добрива від газоподібних втрат, а також поступовим вивільненням азоту протягом 70–90 днів, що збігається з періодом найвищої потреби рослин у цьому елементі – від виходу у трубку до колосіння.

Комбіновані схеми, які передбачали часткове застосування технології Культан (варіанти 2, 4, 8),

Таблиця 3

Розрахунковий баланс азоту та коефіцієнт його використання, визначені за середніми даними трирічних досліджень за період 2023–2025 років

Технологія	Баланс N, кг/га	Коефіцієнт використаного азоту, % (від внесених N ₆₀)	Висновок щодо балансу в посушливих умовах
1. Контроль (без добрив)	-78	–	сильно дефіцитний
2. Культан КАС восени (N ₃₀) + навесні в фазі куштиння (N ₃₀)	-48	50,0 %	слабко дефіцитний
3. Обприскування КАС навесні в фазі куштиння (N ₆₀)	-36	30,0 %	сильно дефіцитний
4. Обприскування КАС восени (N ₃₀) + Культан КАС навесні в фазі куштиння (N ₃₀)	-54	60,0 %	слабко дефіцитний
5. Культан КАС навесні в фазі куштиння (N ₆₀) – найкращий	-62	73,3 %	найменш дефіцитний
6. Метод Бузницького навесні аміачна селітра (N ₆₀)	-28	16,7 %	найсильніше дефіцитний
7. Метод Бузницького навесні сульфат амонію (N ₆₀)	-32	23,3 %	сильно дефіцитний
8. Метод Бузницького восени аміачна селітра (N ₃₀) + Культан КАС навесні (N ₃₀)	-44	43,3 %	дефіцитний

дозволили досягти коефіцієнта використання азоту в межах 43,3–60 % та балансу азоту від –44 до –54 кг/га. Найкращі результати серед цих варіантів було отримано у варіанті 4, який передбачав обприскування КАС восени в дозі N₃₀ з подальшим весняним внесенням Культан у дозі N₃₀. У цьому випадку коефіцієнт використання азоту склав 60 %, що вдвічі перевищує показники, отримані при застосуванні традиційних методів внесення добрив.

Традиційні методи внесення добрив продемонстрували надзвичайно низьку ефективність у посушливих умовах. Найгірші результати були отримані при застосуванні методу Бузницького з аміачною селітрою навесні (варіант 6): коефіцієнт використання азоту склав лише 16,7 %, а баланс азоту дорівнював –28 кг/га, що свідчить про втрату 83 % внесеної кількості азоту, тобто

50 кг/га. Дещо кращі, але все ще неприйнятні показники спостерігалися у варіанті з сульфатом амонію (варіант 7) з коефіцієнтом використання азоту 23,3 % та при одноразовому поверхневому обприскуванні КАС навесні (варіант 3) з коефіцієнтом використання азоту 30 %.

Основними причинами таких значних втрат азоту є поверхневе розміщення добрив на сухому ґрунті, що за умов високих температур повітря та низької вологості призводить до інтенсивної волатилізації аміаку (до 40–60 % протягом перших 48 годин після внесення), формування поверхневої кірки після обприскування, яка перешкоджає проникненню добрив у ґрунт, а також обмежена здатність кореневої системи засвоїти азот до моменту його значних і незворотних втрат.

Таблиця 4

Вплив прикореневого підживлення пшениці озимої на мікробіологічну та біологічну активність чорнозему звичайного важкосуглинкового на кінець вегетаційного періоду за 2023–2025 рр. (шар 0–30 см)

№ п/п	Технологія внесення КАС	Дихання ґрунту (CO ₂), мг CO ₂ /100 г за 24 год	Целюлозолітична активність, % розкладання льону за 21 добу	Чисельність амоніфікаторів, млн КОЕ/г	Чисельність нітрифікуючих бактерій, тис. КОЕ/г	Загальна біологічна активність, % від контролю
1	Контроль (без добрив)	18,4	62,1	6,8	42	100
2	Культан КАС восени (N ₃₀) + навесні в фазі куштиння (N ₃₀)	20,8	71,4	8,2	58	118
3	Обприскування КАС навесні в фазі куштиння (N ₆₀)	12,6	38,7	4,1	18	64
4	Обприскування КАС восени (N ₃₀) + Культан КАС навесні (N ₃₀)	19,7	68,2	7,6	52	112
5	Культан КАС навесні в фазі куштиння (N ₆₀) – найкращий	22,1	74,8	9,1	64	128
6	Метод Бузницького навесні аміачна селітра (N ₆₀)	11,3	34,2	3,7	14	58
7	Метод Бузницького навесні сульфат амонію (N ₆₀)	11,8	36,5		3,9	16
8	Метод Бузницького восени аміачна селітра (N ₃₀) + Культан КАС навесні (N ₃₀)	18,9	64,5	7,1	48	106
HIP _{0,05}		1,1	4,2	0,6	5	–

У контрольному варіанті без внесення добрив баланс азоту був найгіршим і становив -78 кг/га, що пояснюється тим, що винесення азоту відбувалося виключно за рахунок природної мінералізації органічних речовин ґрунту. Проте навіть порівняно з контрольним варіантом традиційної схеми внесення добрив забезпечували незначний приріст винесення азоту – лише на $10-18$ кг/га, тоді як застосування технології Культан КАС дозволило досягти значно більшого приросту цього показника – від 26 до 44 кг/га.

Результати трирічних досліджень мікробіологічної та біологічної активності звичайного важкосуглинкового чорнозему в орному шарі $0-30$ см показали, що різні способи внесення азотних добрив по-різному впливають на мікробіологічний стан ґрунту наприкінці вегетаційного періоду пшениці озимої. Мікробіологічна активність є одним із найбільш чутливих показників екологічної безпеки застосовуваних технологій удобрення (табл. 4).

Традиційні методи внесення добрив, зокрема поверхневе обприскування карбамідно-аміачною сумішшю та розкидання твердих добрив методом Бузницького, призводили до суттєвого пригнічення ґрунтової мікробіоти. Показник дихання ґрунту знижувався до $11,3-12,6$ мг CO_2 на 100 г за 24 години, що на $31-39$ % нижче рівня контролю. Целюлозолітична активність зменшувалася до $34,2-38,7$ %, тобто на $38-45$ % порівняно з контролем, а чисельність амоніфікуючих та нітрифікуючих бактерій скорочувалася в $1,7-1,9$ рази. Загальна біологічна активність ґрунту в цих варіантах становила лише $58-64$ % від показників контрольного варіанту.

Пригнічення мікробіологічної активності ґрунту при традиційних способах внесення добрив пояснюється двома основними причинами: локальним значним підвищенням концентрації розчинених солей у поверхневому шарі ґрунту ($0-5$ см), що створює осмотичний стрес для мікроорганізмів, та токсичною дією вільного аміаку, який утворюється при поверхневому внесенні добрив. Особливо вираженим цей ефект є в умовах посушливого періоду, коли швидке висихання поверхневого шару ґрунту перешкоджає нейтралізації надлишку аміаку та посилює його негативний вплив на ґрунтову мікрофлору.

Навпаки, застосування технології Культан КАС у всіх досліджуваних варіантах не лише не призводило до пригнічення мікробіологічної активності ґрунту, а й сприяло її стимулюванню. Найвищі показники мікробіологічної активності були отримані при одноразовому весняному внесенні Культан КАС у дозі N_{60} (варіант 5): дихання ґрунту склало $22,1$ мг CO_2 на 100 г сухої маси, що на 20 % перевищувало контрольний показник; целюлозолітична активність досягла $74,8$ %, що також на 20 % вище рівня контролю; чисельність амоніфікуючих бактерій зросла до $9,1$ млн колоніє утворюючих одиниць на 1 грам сухого ґрунту (КОЕ/г) (на 34 % порівняно з контролем), а чисельність нітрифікуючих бактерій – до 64 тис. КОЕ/г (на 52 % вище контролю). Загальна біологічна активність ґрунту в цьому варіанті становила 128 % від контрольного значення.

Позитивний вплив технології Культан КАС на мікробіологічну активність ґрунту пояснюється особливостями

методу внесення добрив. Глибоке інжекційне внесення на глибину $8-10$ см створює локальні зони підвищеної концентрації поживних речовин, однак без досягнення токсичних рівнів розчинених солей і вільного аміаку на поверхні ґрунту. Поступове вивільнення азоту протягом $70-90$ днів забезпечує тривале і стабільне джерело енергетичного субстрату для розвитку ґрунтової мікрофлори без різких коливань концентрації поживних речовин. Крім того, розміщення добрив у вологій зоні активного коренезаселення сприяє розвитку корисних ризосферних мікроорганізмів, що позитивно впливає на загальний мікробіологічний стан ґрунту.

Варіанти з комбінованим застосуванням технології Культан (варіанти 2, 4, 8) посідали проміжне становище за показниками біологічної активності ґрунту: її рівень коливався в межах $106-118$ % від контрольного варіанту. При цьому навіть ці проміжні значення суттєво перевищували показники, отримані при застосуванні традиційних схем внесення добрив.

Висновки.

1. Перевага технології глибокого інжекційного внесення (Культан КАС) над традиційними методами: Застосування технології Культан КАС, що передбачає внесення рідких азотних добрив на глибину $8-10$ см, забезпечує значно вищу ефективність використання азоту порівняно з поверхневим обприскуванням карбамідно-аміачною сумішшю або розкиданням твердих добрив методом Бузницького. Найвищий коефіцієнт використання азоту ($73,3$ %) та найменші непродуктивні втрати досягаються при одноразовому весняному внесенні Культан КАС у дозі N_{60} , що в $2,4-4,4$ рази перевищує показники традиційних методів, особливо в умовах посушливого клімату Північного Степу.

2. Збереження доступних форм азоту в ґрунті: Технологія Культан КАС забезпечує пролонгований ефект доступності азоту для рослин, що проявляється у вищому вмісті нітратного та амонійного азоту в орному шарі ґрунту протягом критичних фаз вегетації (вихід у трубку та колосіння). Залишковий вміст доступних форм азоту перед збиранням урожаю при використанні цієї технології в $1,7-2,1$ рази вищий, ніж при традиційних методах, завдяки зменшенню втрат через волатилізацію аміаку, вимивання нітратів та денітрифікацію.

3. Позитивний вплив на мікробіологічну активність ґрунту: Застосування технології Культан КАС не призводить до пригнічення ґрунтової мікробіоти, на відміну від традиційних поверхневих методів внесення добрив, які спричиняють зниження біологічної активності ґрунту на $32-48$ % через осмотичний стрес і токсичну дію вільного аміаку. При глибокому інжекційному внесенні мікробіологічна активність (дихання ґрунту, целюлозолітична активність, чисельність амоніфікуючих та нітрифікуючих бактерій) зберігається на рівні контролю або перевищує його на $12-28$ %, що сприяє підтримці довготривалої родючості чорноземів.

4. Загальна ефективність у формуванні азотного балансу: Технологія Культан КАС дозволяє суттєво покращити баланс азоту в системі «ґрунт–рослина», зменшуючи дефіцит цього елемента та підвищуючи винесення азоту з урожаєм (до 122 кг/га). Навіть

у посушливих умовах, коли обмежена волога перешкоджає переміщенню поживних речовин, глибоке локалізоване внесення добрив забезпечує спрямовану подачу азоту до зони активного поглинання кореневою системою, що робить цю технологію найбільш раціональною для забезпечення ефективного азотного живлення пшениці озимої та збереження родючості ґрунтів у степовій зоні України.

Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні впливу різних доз і строків внесення добрив за технологією Культан КАС на динаміку доступних форм азоту, продуктивність рослин та баланс поживних речовин. Необхідно оцінити довготривалий вплив цієї технології на агрохімічний стан ґрунту, зокрема вміст органічної речовини та доступних елементів живлення. Також доцільно дослідити взаємодію технології з іншими компонентами системи живлення, вплив на якість зерна та екологічні показники, а також її адаптацію до різних типів ґрунтів і культур. Такі дослідження дозволять уточнити оптимальні параметри застосування технології та сформувати науково обґрунтовані рекомендації для практичного використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Войновський В. Технологія CULTAN і машини для внесення рідких мінеральних добрив. *Пропозиція*. 2020. № 4 (20). С. 139–141.
2. 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. № 28 (42). С. 249–258.
3. 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.). *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress 2004*. 2004. Vol. 26. P. 903–910.
4. 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.
5. Захарченко Е., Адамчик Є., Николаєнко Б. Використання карбамідно-аміачної суміші при вирощуванні кукурудзи. *Collection of scientific papers «SCIENTIA»: тези доп.* (December 9, 2022; Berlin, Germany). 2022. С. 68–70.
6. Томчук В. В. Тенденції підживлення рослин за нових виробничих умов. *Slovak international scientific journal*. 2020. Vol. 1, № 41. P. 7–17.
7. Кобець О. М., Пономаренко Н. О., Лепеть Є. І. Стан механізації внесення КАС в Україні. *Конструкція, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2024. Вип. 54. С. 77–83.
8. Короткова І. В., Карасенко В. М. Вплив систем удобрення на вміст основних елементів живлення у ґрунті та компоненти урожаю пшениці озимої. *Scientific Progress & Innovations*. 2023. Vol. 26, № 2. P. 15–20.
9. Желязков О. І. Ефективність застосування азотних добрив при вирощуванні пшениці озимої в умовах північного Степу. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2015. № 1 (49). С. 156–162.
10. Сухина А. Методи та способи застосування КАС на практиці. *Пропозиція*. Спецвипуск. Сучасна техніка для захисту с.-г. культур. 2017. С. 22–25.
11. Машини і обладнання для приготування та внесення добрив : посібник / [колектив авторів] ; за ред. В. І. Кравчука ; М-во аграр. політики та продовольства України ; УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2011. 152 с.
12. Економічна ефективність використання карбамід-аміачних сумішей (КАС) в сучасних системах удобрення сільськогосподарських культур / С. М. Крамарьов та ін. Дніпро : Нова ідеологія, 2020. 195 с.
13. Ушкаренко В. О., Вожегова Р. А. Методика польового дослідження : навч. посіб. Одеса : Олді Плюс+, 2024. 448 с.
14. Кувшинова А. О. Методика агрохімічних досліджень : метод. рекомендації. Миколаїв, 2024. 35 с.
15. Чорний С. Г. Основи агрономічної хімії. Миколаїв, 2022. 128 с.
16. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення : керівний нормативний документ / за ред. Яцука І. П., Балюка С. А. 2-ге вид., допов. Київ, 2019. 108 с.
17. Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ : Нічлава, 2003. 316 с.
18. Дмитрик П. М. Сучасні агрохімічні і статистичні методи досліджень : курс лекцій. Івано-Франківськ, 2014. 76 с.

REFERENCES:

1. Voinovskyi V. (2020). Tekhnolohiia CULTAN i mashyny dlia vnesennia ridkykh mineralnykh dobrov [CULTAN technology and machines for liquid mineral fertilizers application]. *Propozytsiia*. № 4 (20). S. 139–141. [in Ukrainian].
2. Voinovskyi V., Ponomarenko O. (2021). Efektyvnist zastosuvannia tekhnolohii vnesennia dobrov Kultan. [Efficiency of CULTAN fertilizer application technology]. *Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniki i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*. № 28 (42). S. 249–258. [in Ukrainian].
3. Dilci B., Rühl G., Bramm A., Höppner F. (2004). 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.). *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*. Vol. 26. P. 903–910.
4. Kozlovský O., Balík J., Černý J., Kulhánek M., Kos M., Prášilová M. (2009). Influence of nitrogen fertilizer injection (CULTAN) on yield, yield components formation and quality of winter wheat grain. *Plant, Soil and Environment*. Vol. 55, № 12. P. 536–543.
5. Zakharchenko E., Adamchik Ye., Nikolaienko B. (2022). Vykorystannia karbamidno-amiachnoi sumishi pry vyroshchuvanni kukurudzy. [Use of urea-ammonium mixture in maize cultivation] *Collection of scientific papers «SCIENTIA»: tezy dop.* (December 9, 2022; Berlin, Germany). S. 68–70. [in Ukrainian].

6. Tomchuk V. V. (2020). Tendentsii pidzhyvlennia roslyn za novykh vyrobnychykh umov. [Trends in plant fertilization under new production conditions]. Slovak international scientific journal Vol. 1, № 41. P. 7–17. [in Ukrainian].
 7. Kobets O. M., Ponomarenko N. O., Lepet Ye. I. (2024). Stan mekhanizatsii vnesennia KAS v Ukraini. [State of mechanization of UAN application in Ukraine]. Konstruktsiia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Vyp. 54. S. 77–83. [in Ukrainian].
 8. Korotkova I. V., Karasenko V. M. (2023). Vplyv system udobrennia na vmist osnovnykh elementiv zhyvlennia u grunti ta komponenty urozhaiu pshenytsi ozymoї. [Influence of fertilization systems on the content of main nutrients in soil and yield components of winter wheat]. Scientific Progress & Innovations. Vol. 26, № 2. P. 15–20. [in Ukrainian].
 9. Zheliazkov O. I. (2015). Efektyvnist zastosuvannia azotnykh dobryv pry vyroshchuvanni pshenytsi ozymoї v umovakh pivnichnoho Stepu. [Efficiency of nitrogen fertilizers application in winter wheat cultivation in the northern Steppe conditions]. Visnyk Zhytomyrskoho natsionalnoho ahroekolohichnoho universytetu. № 1 (49). S. 156–162. [in Ukrainian].
 10. Sukhyna A. (2017). Metody ta sposoby zastosuvannia KAS na praktytsi. [Methods and ways of UAN practical application]. Propozytsiia. Spetsvyypusk. Suchasna tekhnika dlia zakhystu s.-h. kultur. S. 22–25 [in Ukrainian].
 11. Mashyny i obladnannia dlia pryhotuvannia ta vnesennia dobryv. [Machines and equipment for preparation and application of fertilizers]. [kolektyv avtoriv] ; za red. V. I. Kravchuka (2011). M-vo ahrar. polityky ta prodovolstva Ukrainy; UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. Doslidnytske : UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. 152 s. [in Ukrainian].
 12. Kramarov S. M. (2020). Ekonomichna efektyvnist vykorystannia karbamid-amiachnykh sumishei (KAS) v suchasnykh systemakh udobrennia silskohospodarskykh kultur ta in. [Economic efficiency of urea-ammonium nitrate (UAN) use in modern fertilization systems of agricultural crops]. Dnipro : Nova ideolohiia. 195 s. [in Ukrainian].
 13. Ushkarenko V. O., Vozhehova R. A. (2024). Metodyka polovoho doslidu : navch. Posib. [Methods of field experiment: Textbook.]. Odesa : Oldi Plus+, 448 s. [in Ukrainian].
 14. Kuvshynova A. O. (2024). Metodyka ahrokhimichnykh doslidzhen: metod. rekomendatsii. [Methods of agrochemical research: Methodical recommendations]. Mykolaiv, 35 s. [in Ukrainian].
 15. Chorny S. H. (2022). Osnovy ahronomichnoi khimii. [Fundamentals of agronomic chemistry]. Mykolaiv, 128 s. [in Ukrainian].
 16. Yatsuk, I. P., & Baliuk, S. A. (2019). Metodyka provedennia ahrokhimichnoi pasportyzatsii zemel silskohospodarskoho pryznachennia. [Methods of agrochemical certification of agricultural lands: Guiding normative document (2nd ed., supplemented)]. Kyiv, 108 s. [in Ukrainian].
 17. Hrytsaienko Z. M., Hrytsaienko A. O., Karpenko V. P. (2003). Metody biolohichnykh ta ahrokhimichnykh doslidzhen roslyn i gruntiv. [Methods of biological and agrochemical research of plants and soils]. Kyiv : Nichlava, 316 s. [in Ukrainian].
 18. Dmytryk P. M. (2014). Suchasni ahrokhimichni i statystychni metody doslidzhen: kurs lektsii. [Modern agrochemical and statistical research methods: Course of lectures]. Ivano-Frankivsk, 76 s. [in Ukrainian].
- Ткаліч Ю. І., Денисенко А. В. Динаміка вмісту азоту під впливом різних способів прикореневого підживлення пшениці озимої в умовах Північного Степу України**
- Мета.** Встановити закономірності динаміки вмісту доступних форм азоту (нітратного та амонійного) у звичайному важкосуглинковому чорноземі Північного Степу України залежно від різних способів і строків прикореневого підживлення пшениці озимої карбамідно-аміачною сумішшю (КАС) та твердими азотними добривами, зокрема оцінити ефективність технології Культан (глибоке інжекційне локалізоване внесення КАС) порівняно з традиційними поверхневими методами, визначити коефіцієнт використання азоту рослинами, баланс цього елемента та вплив технологій на мікробіологічну активність ґрунту. **Методи.** Польові дослідження проводилися протягом 2023–2025 рр. на полях ТОВ «Преображенівське» (Павлоградський район Дніпропетровської області) на звичайному важкосуглинковому чорноземі. Закладено однофакторний польовий дослід за 8 варіантами підживлення при однаковій дозі азоту N_{60} : контроль (без добрив); Культан КАС восени N_{30} + навесні N_{30} ; обприскування КАС навесні N_{60} ; комбіновані схеми Культан + обприскування; одноразовий Культан КАС навесні N_{60} ; традиційне розкидання аміачної селітри та сульфату амонію методом Бузницького. Вміст нітратного та амонійного азоту визначали у шарах 0–10, 10–20, 20–30 см на ключових фазах вегетації спектрофотометричним методом та після семиденного компостування. Баланс азоту розраховували за різницею виведення з урожаєм та внесеної кількості. Мікробіологічну активність ґрунту оцінювали за інтенсивністю дихання, целюлозолітичною активністю та чисельністю амоніфікуючих і нітрифікуючих бактерій. **Результати.** Технологія Культан КАС забезпечила пролонговану доступність азоту протягом вегетації: максимальний вміст нітратного азоту (20,6–24,1 мг/кг) спостерігався у фазі трубкування–колосіння, а залишковий вміст перед збиранням був у 1,7–2,1 рази вищим, ніж при традиційних поверхневих способах. Одноразове весняне внесення Культан КАС (N_{60}) дало найвищий коефіцієнт використання азоту – 73,3 % (в 2,4–4,4 рази вище, ніж при поверхневому обприскуванні та розкиданні твердих добрив), виведення азоту з урожаєм – 122 кг/га та найменший дефіцит балансу (–62 кг/га). Традиційні методи характеризувалися високими непродуктивними втратами (70–83 %) через волатилізацію аміаку та утворення поверхневої кірки. Застосування Культан КАС стимулювало мікробіологічну активність ґрунту: дихання ґрунту зросло на 20 %, целюлозолітична активність – на 20 %, чисельність корисної мікрофлори – на 34–52 % порівняно з контролем, тоді як традиційні методи пригнічували її на 32–48 %. **Висновки.** У посушливих умовах Північного Степу України найефективнішим способом прикореневого підживлення пшениці озимої є одноразове весняне глибоке інжекційне внесення КАС за технологією Культан у дозі N_{60} . Цей спосіб підвищує

коефіцієнт використання азоту до 73,3 %, зменшує непродуктивні втрати в 4–5 разів, забезпечує пролонговану доступність поживних речовин у період максимальної потреби рослин, зберігає та активізує мікробіологічну активність ґрунту, що сприяє підтримці його родючості та екологічній безпеці технології удобрення.

Ключові слова: карбамідно-аміачна суміш, локальне інжекційне внесення, коефіцієнт використання азоту, баланс азоту, пролонгована дія, екологічна безпека.

Tkalich Yu. I., Denysenko A. V. Dynamics of nitrogen content under the influence of different methods of root fertilization of winter wheat in the conditions of the Northern Steppe of Ukraine

Purpose. To establish patterns of available nitrogen forms (nitrate and ammonium) dynamics in ordinary heavy-loamy chernozem of the Northern Steppe of Ukraine depending on different methods and timing of root feeding of winter wheat with urea-ammonium nitrate (UAN) and solid nitrogen fertilizers, particularly to evaluate the efficiency of CULTAN technology (deep injection localized UAN application) compared to traditional surface methods, to determine the nitrogen utilization coefficient, nitrogen balance and the impact of technologies on soil microbial activity.

Methods. Field experiments were conducted in 2023–2025 on the fields of “Preobrazhenivske” LLC (Pavlohrad district, Dnipropetrovsk region) on ordinary heavy-loamy chernozem. A one-factor field experiment with 8 fertilization variants at equal nitrogen rate N_{60} was established: control (no fertilizer); CULTAN UAN in autumn N_{30} + spring N_{30} ; UAN spraying in spring N_{60} ; combined schemes; single CULTAN UAN in spring N_{60} ; traditional broadcasting of ammonium nitrate and ammonium sulphate by Buznytskyi method. Nitrate and ammonium nitrogen content was determined in 0–10, 10–20, 20–30 cm layers at key growth stages using

spectrophotometric method and after seven-day composting. Nitrogen balance was calculated from the difference between crop removal and applied amount. Soil microbial activity was assessed by respiration intensity, cellulolytic activity and the number of ammonifying and nitrifying bacteria. **Results.** CULTAN UAN technology provided prolonged nitrogen availability during the vegetation period: the maximum nitrate nitrogen content (20.6–24.1 mg/kg) was observed at the stem elongation–heading stages, and the residual content before harvesting was 1.7–2.1 times higher than with traditional surface methods. Single spring CULTAN UAN application (N_{60}) provided the highest nitrogen utilization coefficient – 73.3 % (2.4–4.4 times higher than surface spraying and solid fertilizer broadcasting), nitrogen removal with the harvest – 122 kg/ha and the lowest balance deficit (–62 kg/ha). Traditional methods were characterized by high non-productive losses (70–83 %) due to ammonia volatilization and surface crust formation. CULTAN UAN application stimulated soil microbial activity: soil respiration increased by 20 %, cellulolytic activity – by 20 %, beneficial microflora abundance – by 34–52 % compared to control, while traditional methods suppressed it by 32–48 %. **Conclusions.** Under the arid conditions of the Northern Steppe of Ukraine, the most effective method of winter wheat root feeding is single spring deep injection UAN application using CULTAN technology at the rate of N_{60} . This method increases the nitrogen utilization coefficient to 73.3 %, reduces non-productive losses by 4–5 times, ensures prolonged nutrient availability during the period of maximum plant demand, preserves and activates soil microbial activity, thereby contributing to maintaining soil fertility and ecological safety of fertilization technology.

Key words: urea-ammonium nitrate, deep injection application, nitrogen utilization coefficient, nitrogen balance, prolonged effect, ecological safety.

Дата першого надходження рукопису до видання: 11.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025