

Ю. І. СЕМІРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-4230-4614

С. Л. СЕМІРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-9304-3637

О. А. САРЖАНОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-3973-0185

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ БУНКЕРІВ-ПЕРЕВАНТАЖУВАЧІВ У ЛОГІСТИЦІ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ РОБІТ

У статті досліджено проблематику підвищення ефективності транспортного забезпечення зернозбиральних робіт в умовах виробничої невизначеності, сезонних пікових навантажень та обмежених ресурсів аграрних підприємств України. Встановлено наявність суперечності між необхідністю забезпечення безперервної високопродуктивної роботи зернозбиральних комбайнів та потребою мінімізації витрат на формування й експлуатацію машинно-транспортного парку.

Метою статті є технологічне, економічне та екологічне обґрунтування раціональних варіантів використання бункерів-перевантажувачів як буферної ланки у системі транспортування зерна під час збирання врожаю.

Розроблено економіко-математичну модель оптимізації логістичної системи з урахуванням продуктивності комбайнів, відстані перевезення зерна, витрат пального, втрат урожаю через порушення агротехнічних строків та негативного впливу ущільнення ґрунту на подальшу врожайність. Проведено порівняльний аналіз трьох схем транспортування: прямої (комбайн – автомобіль), тракторної та трьохланкової (комбайн – бункер-перевантажувач – автомобіль).

Установлено, що застосування буферної ланки забезпечує підвищення коефіцієнта використання робочого часу комбайнів до 0,94–0,96, скорочення простоїв на 15–20 %, зменшення питомих витрат пального на 12–18 % і збереження 7–10 % урожаю завдяки дотриманню оптимальних строків збирання. Визначено граничні відстані економічної доцільності використання різних типів транспорту та обґрунтовано ефективність поділу логістичної системи на польову й магістральну фази. Отримані результати можуть бути використані при формуванні раціональної структури машинно-транспортного парку та підвищенні конкурентоспроможності аграрних підприємств.

Ключові слова: аграрна логістика, зернозбиральні роботи, транспортний цикл, бункер-перевантажувач, економічна ефективність, ущільнення ґрунту, оптимізація витрат.

YU. I. SEMIRNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-4230-4614

S. L. SEMIRNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technical Systems Design
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-9304-3637



O. A. SARZHANOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-3973-0185

RATIONALE FOR USING CHASER BINS IN GRAIN HARVESTING LOGISTICS

The article explores the problematic issues of increasing the efficiency of transport support for grain harvesting operations under conditions of production uncertainty, seasonal peak loads, and limited resources of Ukrainian agricultural enterprises. A contradiction has been identified between the necessity of ensuring continuous high-capacity operation of combine harvesters and the need to minimize costs associated with the formation and operation of the machine and transport fleet.

The purpose of the article is to provide technological, economic, and environmental substantiation for rational options of using chaser bins as a buffer link in the grain transportation system during harvesting.

An economic-mathematical model for optimizing the logistics system has been developed, taking into account combine productivity, grain hauling distance, fuel consumption, crop losses due to violations of agrotechnical deadlines, and the negative impact of soil compaction on future yields. A comparative analysis of three transportation schemes was conducted: direct flow (combine – truck), tractor-based, and the three-link system (combine – chaser bin – truck).

It was established that the use of a buffer link increases the field efficiency factor of combines to 0.94–0.96, reduces downtime by 15–20%, decreases specific fuel consumption by 12–18%, and preserves 7–10% of the yield by adhering to optimal harvest windows. The threshold distances for the economic feasibility of various transport types were determined, and the efficiency of dividing the logistics system into field and highway phases was substantiated. The results obtained can be utilized in forming a rational structure for machine and transport fleets and enhancing the competitiveness of agricultural enterprises.

Key words: *agricultural logistics, grain harvesting, transport cycle, chaser bin, economic efficiency, soil compaction, cost optimization.*

Постановка проблеми

Незважаючи на високий рівень механізації сучасного агровиробництва, транспортна логістика під час збирання врожаю залишається однією з найбільш вразливих ділянок. В Україні зернові культури займають понад 50% посівних площ, що потребує чіткої координації транспортних потоків [1]. Основна суперечність при їх збиранні полягає у тому, що збільшення кількості транспорту зменшує простоту комбайнів, але водночас підвищує витрати на перевезення. Таким чином, виникає необхідність визначення раціональної структури транспортного парку залежно від умов експлуатації.

Дана проблема безпосередньо пов'язана із реалізацією Стратегії розвитку аграрного сектору економіки України [2], оскільки оптимізація перевезень є прямим шляхом до зниження собівартості зерна та підвищення його конкурентоспроможності на світовому ринку [3]. Удосконалення схем «поле–тік» або «поле–елеватор» дозволяє стабілізувати роботу зернозбирального конвеєра в умовах обмежених часових вікон, спричинених кліматичними змінами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема оптимізації транспортно-логістичних процесів в аграрному секторі постійно перебуває в центрі уваги провідних науковців та практиків.

У роботах таких дослідників, як Буздалов І. М. та Гур'єв С. В., ґрунтовно закладено основи логістичного управління в АПК, де транспортування розглядається не як окрема операція, а як інтегрована складова виробничого циклу [4, 5].

Питання вибору засобів механізації та їхньої продуктивності детально висвітлені у працях Кравченка Ю. В., Булгаков В. М. [6, 7]. Автори наголошують, що в умовах сучасного ринку техніко-економічні показники експлуатації машинно-тракторного парку безпосередньо залежать від синхронізації збиральних та транспортних ланок.

Економічні аспекти виробництва зерна та фактори зниження витрат досліджено в роботах Кирилюка Є. М. [8].

Зарубіжні дослідження підтверджують ефективність використання перевантажувальних бункерів як буферної ланки в системі жнив [9; 10; 11; 12].

Попри значну кількість напрацювань, залишається недостатньо висвітленим питання адаптивності транспортних схем до різкої зміни погодних умов та стану дорожньої мережі в умовах обмеженого ресурсу техніки. Таким чином, виникає необхідність визначення раціональної структури транспортного парку залежно від умов експлуатації. Також потребує більш глибокого аналізу порівняльна ефективність використання бункерів-перевантажувачів у господарствах із різною площею земельного банку, що зумовлює доцільність проведення даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є технологічне, економічне та екологічне обґрунтування раціональних варіантів використання бункерів-перевантажувачів як буферної ланки у системі транспортування зерна під час збирання врожаю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Використання бункерів-перевантажувачів дозволяє відокремити польову логістику від дорожньої, що підтверджується дослідженнями зарубіжних авторів [9, 10, 13]. Згідно з методичними рекомендаціями Міністерства аграрної політики та продовольства України, дотримання оптимальних строків збирання є ключовим чинником збереження якості зерна [14]. Порушення «часових вікон» призводить до втрат урожаю та зниження хлібопекарських властивостей зерна, що узгоджується з міжнародними оцінками ефективності збиральних систем [3, 11].

Сучасна концепція збирання зернових культур базується на принципі десинхронізації роботи комбайнів та магістрального транспорту. Цей підхід усуває пряму залежність між темпами обмолоту та наявністю вантажівок на краю поля. У такій схемі бункер-перевантажувач відіграє роль «динамічного буфера», який нівелює затримки, пов'язані з логістичними маневрами або очікуванням транспорту.

Використання буферних ланок дає наступні техніко-економічні переваги:

- збільшення продуктивності комбайнів. Відсутність зупинок для вивантаження зерна у стаціонарний транспорт дозволяє підвищити змінну продуктивність збиральної техніки на 25–30%.

- мінімізація ущільнення ґрунту. Використання шин низького тиску на бункерах-перевантажувачах значно зменшує негативний антропогенний вплив на родючий шар порівняно з магістральними зерновозами, що заїжджають безпосередньо на поле.

- оптимізація роботи автотранспорту. Вантажівки завантажуються на твердому покритті (краю поля), що зменшує витрати палива та знос техніки.

Часовий фактор є критичним у процесі жнив. Будь-яке відхилення від оптимальних термінів (зазвичай це 10–12 діб для ранніх зернових) призводить до втрат за рахунок осипання та погіршення хлібопекарських властивостей через підвищену вологість або самозігрівання. Застосування бункерів-перевантажувачів гарантує максимальну інтенсивність збирання саме в ці критичні «вікна», що дозволяє уникнути ризиків, пов'язаних з несприятливими погодними умовами.

Показник логістичної забезпеченості P (коефіцієнт резерву або буферної спроможності системи), що характеризує співвідношення між обсягом накопичення зерна у буферній ланці та інтенсивністю його надходження від комбайнів:

$$P = \frac{m_b \cdot k}{T_c \sum_{i=1}^n Q_i}, \quad (1)$$

де m_b – місткість бункера, т;

k – коефіцієнт використання робочого часу;

Q_i – продуктивність i -го комбайна, т/год;

n – кількість комбайнів у збиральній ланці;

T_c – тривалість повного транспортного циклу, год;

$\sum Q_i$ – сумарна інтенсивність потоку зерна від усіх комбайнів, т/год.

Так, при $R \geq 1$ – логістична система здатна повністю компенсувати потік зерна, а простой комбайнів практично відсутні, при $R \approx 1$ – система працює на межі пропускної спроможності, а при $R < 1$ – місткість буфера недостатня, виникають затримки та простой.

Таким чином, формула визначає здатність буферної ланки забезпечити безперервність роботи збирального комплексу.

В таблиці 1 наведено характеристику логістичних схем збирання зернових.

Використання бункерів-перевантажувачів дозволяє скоротити загальний термін жнив на 3-4 дні за рахунок підвищення продуктивності комбайнів.

Математично фактичні втрати врожаю (%) у момент часу t ($L(t)$) будуть:

$$L(t) = L_{min} \cdot e^{\alpha(t-t_{opt})}, \quad (2)$$

де L_{min} – мінімальні технологічні втрати (%) в межах оптимального періоду збирання;

α – коефіцієнт інтенсивності зростання втрат (1/доба), що залежить від культури та погодних умов;

t – фактична тривалість збирання, доби;

t_{opt} – оптимальна тривалість збирання доби.

Якщо $t \leq t_{opt}$, втрати залишаються на мінімальному рівні, $t > t_{opt}$, втрати зростають експоненціально;

Таким чином, інвестиції в бункер-перевантажувач окупаються за рахунок збереження тих 7–10% врожаю, які зазвичай втрачаються при затягуванні жнив через логістичні зупинки.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика логістичних схем збирання зернових

Показник	Прямоточна схема (комбайн – автомобіль)	Трьохланкова схема (комбайн – бункер – автомобіль)	Вплив на ефективність
Продуктивність комбайнів	Нижча на 20–30% через простой в очікуванні транспорту	Максимальна (безперервна робота завдяки вивантаженню на ходу)	Дозволяє скоротити кількість комбайнів на полі
Ущільнення ґрунту	Високе (вантажівки з високим тиском у шинах заїжджають на поле)	Мінімальне (бункери мають широкі шини низького тиску)	Збереження структури ґрунту та врожайності наступних культур
Витрати палива на полі	Високі (автомобілі важко пересуваються по м'якому ґрунту)	Оптимальні (трактор з бункером має кращу прохідність)	Економія пально-мастильних матеріалів
Ризик порушення "часових вікон"	Високий (залежність від вчасної подачі машин з елеватора)	Низький (бункер слугує резервуаром для накопичення зерна)	Мінімізація втрат зерна від осипання та погоди
Пробіг автотранспорту	Збільшений (маневрування по всьому полю за комбайном)	Мінімальний (завантаження відбувається на краю поля/дорозі)	Зменшення зносу ходової частини вантажівок
Простой техніки	Часті (синхронізація "комбайн-машина" є складною)	Практично відсутні (ланки працюють незалежно)	Ритмічність логістичного процесу

Експериментальні дослідження проводилися на базі 3 сільськогосподарських підприємств різної форми власності, розташованих у лісостеповій зоні Сумської області. Загальна площа дослідження становила 3240 га під ярими та озимими зерновими.

Польові дослідження проводилися протягом трьох виробничих сезонів (2022–2024 рр.) у період активної фази жнив (липень–серпень).

У дослідженні використовувалися зернозбиральні комбайни John Deere S760, CLAAS Lexion 770, New Holland CX8.80.

Для реалізації трьохланкової логістичної схеми застосовувалися бункери-перевантажувачі:

- LOZOVA MACHINERY ПБН-30 (місткість 30 м³);
- Elvorti БП-25 (місткість 25 м³).

Транспортне забезпечення магістральної фази здійснювалося автомобілями-зерновозами вантажопідйомністю 20–40 т (середня швидкість руху 60–80 км/год).

Було сформовано три варіанти логістичних схем: прямоточна схема (комбайн – автомобіль), тракторна схема (комбайн – тракторний причіп – елеватор), трьохланкова схема (комбайн – бункер-перевантажувач – автомобіль).

Для кожної схеми проводилися: хронометраж робочого часу, вимірювання тривалості транспортного циклу, облік витрат пального (л/т), визначення коефіцієнта використання робочого часу комбайнів (к), вимірювання тиску на ґрунт (кПа) за допомогою ґрунтового пенетрометра та оцінка втрат урожаю (%).

Аналіз операційного часу роботи збиральних ланок показав, що при використанні традиційної прямоточної схеми (комбайн – автомобіль) втрати часу на очікування транспорту та маневрування складають від 15% до 22% загального змінного часу.

Впровадження бункера-перевантажувача як проміжної ланки дозволило практично повністю ліквідувати простой комбайнів. Результати хронометражу робочих процесів наведені на графіку залежності втрат зерна від термінів збирання.

Як свідчать дані досліджень, при подовженні термінів збирання понад 10 діб, швидкість втрат зростає експоненціально. Використання трьохланкової системи дозволяє змістити графік виконання робіт у межі «оптимального вікна» (1–7 днів), де рівень втрат не перевищує 0,5–1%.

На основі проведених польових випробувань було розраховано порівняльні показники ефективності двох систем (табл. 2).

Таблиця 2

Експлуатаційно-технологічні показники роботи техніки

Показник	Прямоточна схема	Трьохланкова схема	Відхилення, %
Коефіцієнт використання робочого часу (к)	0,72	0,94	+30,6%
Середня швидкість вивантаження зерна (т/хв)	1,8	3,5	+94,4%
Питомі витрати палива (л/т зерна)	4,2	3,6	-14,3%
Ущільнення ґрунту (кПа)	205,94	88,26	-57,1%

Досліджено, що використання бункера-перевантажувача місткістю 25–30 м³ створює «логістичний буфер», який забезпечує автономну роботу комбайна протягом 40–60 хв у разі затримки магістрального транспорту на елеваторі або під'їзних шляхах.

Це підтверджує тези закордонних фахівців [10] щодо повної десинхронізації польових та дорожніх операцій. При цьому вантажний автотранспорт завантажується на краю поля за 3–5 хвилин, що у 4 рази швидше, ніж при повному завантаженні безпосередньо від комбайна.

Для обґрунтування вибору оптимальної логістичної моделі було проведено порівняльний аналіз основних типів техніки, що задіяна у збиранні зернових.

Вибір способу транспортування зерна – це багатокритеріальне завдання. Неправильне рішення призводить або до простою комбайнів через брак транспорту, або до зайвих витрат на утримання надлишкового парку машин. Для оптимізації цього процесу необхідно враховувати сукупність факторів, що діють безпосередньо в конкретних умовах господарства.

На основі проведених досліджень було систематизовано основні чинники, що корелюють із вибором типу транспортних засобів (табл. 3).

Таблиця 3

Фактори впливу на вибір способу транспортування

Фактор	Вплив на вибір транспорту
Урожайність	Потреба у високопродуктивній техніці
Відстань до елеватора	Доцільність використання автомобілів або перевалочних пунктів
Стан доріг	Перевага тракторів або бункерів при поганій інфраструктурі
Обсяг техніки	Обмеження або розширення логістичних можливостей

Комплексний аналіз факторів впливу (табл. 3) свідчить, що найбільш адаптивною моделлю для сучасних умов України є трьохланкова система. Вона дозволяє нівелювати ризики, пов'язані з поганим станом доріг та високою врожайністю, одночасно максимізуючи ефективність використання автомобільного парку на великих відстанях.

Основними критеріями оцінки (табл. 4) виступили продуктивність (швидкість вивантаження), мобільність та екологічний вплив на агрофон (тиск на ґрунт).

Таблиця 4

Техніко-експлуатаційні характеристики основних транспортних засобів

Показник	Тракторний причіп	Бункер (25–30 м³)	Автомобіль-зерновоз
Вантажопідйомність, т	10–20	18–24	20–40
Швидкість по полю, км/год	12–15	10–15	10–20
Швидкість по дорозі, км/год	20–25	20–25	60–80
Тиск на ґрунт, кПа	70–120	40–80	180–250
Витрати пального, л/100 км	25–30	28–35	30–40
Швидкість вивантаження, т/хв	1,0–1,5	8–12	2,5–4

Порівняльний аналіз (табл. 4) виявляє суттєві розбіжності між спеціалізованою та загальною технікою. Зокрема, бункер-перевантажувач демонструє найвищу ефективність у зоні безпосереднього збирання завдяки наступним факторам:

- пропускна спроможність – швидкість вивантаження у бункера-перевантажувача (8–12 т/хв) у 3 рази перевищує аналогічний показник автомобіля-зерновоза. Це дозволяє здійснювати перевантаження на ходу або під час коротких технологічних зупинок, мінімізуючи простій комбайна.

- збереження структури ґрунту – тиск на ґрунт у бункера (40–80 кПа) є найнижчим серед усіх досліджуваних засобів. Для порівняння, автомобіль-зерновоз створює тиск до 250 кПа, що призводить до глибокого ущільнення підорного горизонту, перешкоджаючи нормальному розвитку кореневої системи наступних культур у сівозміні.

- прохідність – у складних метеорологічних умовах (підвищена вологість ґрунту) використання автомобілів безпосередньо на полі стає неможливим через ризик забуксовування та руйнування технологічних колій. Тракторні агрегати з бункерами зберігають працездатність навіть при критичній вологості, забезпечуючи дотримання термінів збирання згідно з рекомендаціями Мінагрополітики [14].

Хоча автомобіль-зерновоз є незамінним на магістральних перевезеннях завдяки високій швидкості (60–80 км/год), його використання безпосередньо в полі є неефективним та агрономічно шкідливим. Оптимальним рішенням є передача зерна від комбайна до автомобіля через бункер-перевантажувач на краю поля.

Для визначення раціональних меж використання різних видів транспорту було проведено розрахунок показників повного логістичного циклу (T_c) залежно від відстані транспортування зерна (табл. 5).

Умови розрахунку:

- середня швидкість руху: 25 км/год (трактор), 70 км/год (авто);
- час завантаження + розвантаження: 0,35 год;
- організаційні затримки: 0,15 год;
- тривалість зміни: 10 год.

Таблиця 5

Показники роботи транспортних засобів залежно від відстані перевезення

Відстань, км	Тип транспорту	Час руху, год	Повний цикл T_c , год	Кількість рейсів за зміну
5	Тракторний причіп	0,40	0,90	8,9
15	Тракторний причіп	1,20	1,70	4,7
30	Тракторний причіп	2,40	2,90	2,8
15	Автомобіль-зерновоз	0,43	0,93	8,6
30	Автомобіль-зерновоз	0,86	1,36	5,9
50	Автомобіль-зерновоз	1,43	1,93	4,1

Отримані результати підтверджують необхідність розділення логістики на дві фази. На першій фазі (поле – край поля) доцільно використовувати тракторні бункери-перевантажувачі, які нівелюють низьку швидкість тракторів за рахунок великої вантажопідйомності та швидкого вивантаження. На другій фазі (край поля – елеватор) слід залучати виключно автомобільний транспорт, що дозволяє максимізувати кількість рейсів при великих відстанях перевезення.

Для порівняння собівартості транспортування зерна для трьох варіантів (рис. 1) були виконані розрахунки (при розрахунках ціна дизельного пального була прийнята 55 грн/л).

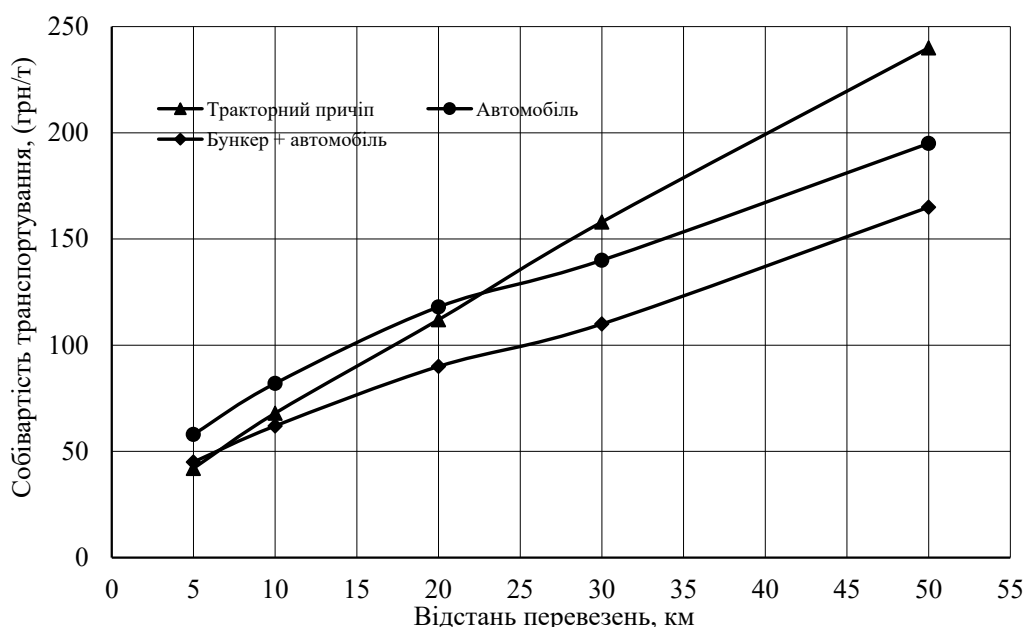


Рис. 1. Порівняльна собівартість транспортування зерна, (грн/т)

Як видно із рис. 1 на коротких дистанціях (5 км) тракторний причіп демонструє найнижчий показник (42 од.), що пояснюється простотою організації та відсутністю додаткових перевантажень. Проте вже на відстані 10 км схема «Бункер + автомобіль» стає конкурентоспроможною (62 од. проти 68 од. у трактора), що свідчить про швидку втрату ефективності тракторів при віддаленні від поля.

Пряма робота автомобіля в полі є найменш ефективною на малих відстанях (58 од. на 5 км). Це зумовлено низькою швидкістю руху вантажівки по стерні та високими ризиками простою під час маневрування біля комбайна. Лише після 30 км автомобіль починає випереджати тракторний причіп (140 од. проти 158 од.).

Комбінована схема виявилася найбільш стабільною та ефективною на середніх і великих дистанціях:

- на відстані 20 км вона дає економію часу у 20% порівняно з трактором та 24% порівняно з автомобілем.
- на відстані 50 км розрив стає ще відчутнішим: 165 од. проти 195 (автомобіль) та 240 (трактор).

Сучасна інтенсифікація землеробства вимагає не лише високої швидкості збирання, а й збереження структури ґрунту. Надмірне ущільнення підорного горизонту важкою технікою є прихованою причиною зниження врожайності, яку часто ігнорують під час розрахунку собівартості логістики. Так, за результатами досліджень [15] підвищений питомий тиск техніки (>200 кПа) істотно збільшує ризик деградації структури орного шару

У ході польових випробувань було проведено заміри тиску на ґрунт та подальший моніторинг врожайності на ділянках, де рухалися різні типи техніки. Отримані дані дозволяють оцінити реальну вартість кожного проходу транспортного засобу по полю (табл. 6).

Таблиця 6

Вплив типу транспорту на стан ґрунту та втрати врожайності

Тип транспорту	Тиск на ґрунт, кПа	Зниження врожайності, %	Орієнтовні втрати, грн/га
Автомобіль-зерновіз	200–300	10–15	3 000–4500
Тракторний причіп	80–120	5–7	1 500–2100
Бункер-перевантажувач	40–70	2–3	600–900

Як видно із табл. 6, найменший негативний вплив на агрофон демонструють бункери-перевантажувачі. Завдяки використанню широкопрофільних шин низького тиску, навантаження на ґрунт мінімізується до 40–70 кПа. Це дозволяє зберегти потенціал поля, обмежуючи втрати врожайності лише 2–3%, що є прийнятним рівнем для інтенсивного землеробства сучасного рослинництва.

Крім того, порівняльний аналіз фінансових втрат показує, що впровадження бункера-перевантажувача дозволяє заощадити від 2400 до 3600 грн на кожному гектарі порівняно з автомобільною схемою та від 900 до 1200 грн порівняно з тракторними причепами.

Висновки

Результати дослідження узгоджуються з положеннями теорії логістичного управління в АПК [4; 5], підтверджують економічну доцільність оптимізації машинно-транспортного парку [6; 8] та відповідають сучасним міжнародним підходам до організації зернозбиральних процесів [9–12].

Дослідження підтверджують, що підвищення ефективності зернозбиральних робіт досягається не стільки за рахунок нарощування кількості техніки, скільки через оптимізацію логістичної взаємодії між її ланками. Запровадження трьохланкової системи транспортування з використанням бункера-перевантажувача забезпечує десинхронізацію польових і магістральних операцій, мінімізує простій комбайнів, зменшує енергетичні витрати та знижує негативний вплив на ґрунтовий покрив. Комплексне врахування виробничих, економічних і агроекологічних чинників формує передумови для зростання конкурентоспроможності аграрних підприємств в умовах кліматичної та ринкової нестабільності.

Список використаної літератури

1. Статистичний щорічник України за 2022 рік / Державна служба статистики України. Київ, 2023. 455 с.
2. Про державну підтримку сільського господарства України : Закон України від 24.06.2004 № 1877-IV // Відомості Верховної Ради України. 2004. № 49. Ст. 527.
3. FAO. *The State of Food and Agriculture 2022*. Rome : FAO, 2022. 210 p.
4. Буздалов І. М. Логістика в агропромисловому комплексі : монографія. Київ : ННЦ ІАЕ, 2018. 352 с.
5. Гур'єв С. В. Обґрунтування параметрів логістичних систем розподілу зернових потоків // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2018. Вип. 23. С. 45–53.
6. Кравченко Ю. В. Проектування та функціонування збирально-транспортних комплексів у рослинництві : монографія. Київ : ННЦ «ІАЕ», 2018. 254 с.
7. Булгаков В. М., Кувайчев С. В. Системний аналіз функціонування збирально-транспортних ланок при збиранні ранніх зернових // Праці ТДАТУ. 2020. Вип. 20, т. 1. С. 112–120.
8. Кирилюк Є. М. Економіка та організація виробництва зерна в Україні // Економіка АПК. 2021. № 4. С. 45–53.
9. Edwards W. Grain Cart Use and Efficiency in Modern Harvest Systems. Ames : Iowa State University Extension, 2019. 12 p.
10. Hanna H. M. Logistics and Machinery Management During Harvest // *Applied Engineering in Agriculture*. 2018. Vol. 34, No. 5. P. 923–930.
11. Single-Pass Harvest of Corn Grain and Stover: Performance of Three Harvester Configurations / K. J. Shimmers, B. N. Binversie, R. E. Muck, P. J. Weimer. *Transactions of the ASABE*. 2009. Vol. 52, Iss. 2. P. 377–385. DOI: 10.13031/2013.26815
12. Melnyk O., Petrenko V. Optimization of Transport Processes in Agricultural Production // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2020. Vol. 22, No. 3. P. 102–110.
13. Семірненко Ю. І., Семірненко С. Л. Оптимізація транспортно-технологічного обслуговування зернозбиральних комбайнів у малих агропідприємствах // Вісник ХНТУ. 2025. № 4 (95), ч. 1. С. 305–311. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.39.
14. Методичні рекомендації щодо проведення збирання зернових культур. Київ : Міністерство аграрної політики та продовольства України, 2020. 38 с.
15. Keller T., Sandin M., Colombi T., Horn R., Or D. Risk assessment of soil compaction by agricultural traffic – Recent advances and new modelling approaches. *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 231. Art. 105694. DOI: 10.1016/j.still.2023.105694

References

1. State Statistics Service of Ukraine. (2023). *Statistical yearbook of Ukraine for 2022*. Kyiv, Ukraine.
2. Verkhovna Rada of Ukraine. (2004). *On state support of agriculture of Ukraine: Law of Ukraine No. 1877-IV (June 24, 2004)*. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, (49), Art. 527.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The state of food and agriculture 2022*. FAO.
4. Buzdalov, I. M. (2018). *Logistics in the agro-industrial complex*. National Scientific Centre “Institute of Agrarian Economics”.
5. Huriev, S. V. (2018). Substantiation of parameters of logistic systems of grain flow distribution. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine*, (23), 45–53.
6. Kravchenko, Y. V. (2018). *Design and functioning of harvesting and transport complexes in crop production*. National Scientific Centre “Institute of Agrarian Economics”.
7. Bulgakov, V. M., & Kuvaichev, S. V. (2020). System analysis of harvesting and transport units functioning during early grain harvesting. *Proceedings of TDATU*, 20(1), 112–120.
8. Kyryliuk, Y. M. (2021). Economics and organization of grain production in Ukraine. *Ekonomika APK*, (4), 45–53.
9. Edwards, W. (2019). *Grain cart use and efficiency in modern harvest systems*. Iowa State University Extension.
10. Hanna, H. M. (2018). Logistics and machinery management during harvest. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(5), 923–930.
11. Shinnars, K. J., Binversie, B. N., Muck, R. E., & Weimer, P. J. (2009). Single-pass harvest of corn grain and stover: Performance of three harvester configurations. *Transactions of the ASABE*, 52(2), 377–385. <https://doi.org/10.13031/2013.26815>
12. Melnyk, O., & Petrenko, V. (2020). Optimization of transport processes in agricultural production. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(3), 102–110.
13. Semirnenko, Y. I., & Semirnenko, S. L. (2025). Optimization of transport and technological servicing of grain harvesters in small agricultural enterprises. *Visnyk KhNTU*, 4(95), 305–311. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.39>
14. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine. (2020). *Methodical recommendations for harvesting grain crops*. Kyiv, Ukraine.
15. Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2023). Risk assessment of soil compaction by agricultural traffic – Recent advances and new modelling approaches. *Soil and Tillage Research*, 231, Article 105694. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105694>

Дата першого надходження статті до видання: 17.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026