

© А. А. Кашканов, докт. техн. наук,  
професор, професор кафедри,  
ORCID: 0000-0003-3294-6135,  
e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua;  
© В. В. Буряк, аспірант кафедри,  
ORCID: 0009-0009-6030-4173,  
e-mail: btr.vl@i.ua  
(Вінницький національний технічний  
університет)

© Andriy Kashkanov, Doctor of Technical Science,  
Professor, Professor of the Department,  
ORCID: 0000-0003-3294-6135,  
e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua;  
© Valerii Buriak, Postgraduate,  
ORCID: 0009-0009-6030-4173,  
e-mail: btr.vl@i.ua  
(Vinnytsia National Technical University)

## УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ НА ОСНОВІ КРИТЕРІАЛЬНОГО ПІДХОДУ

### MANAGEMENT OF GRAIN TRANSPORTATION EFFICIENCY BY ROAD TRANSPORT BASED ON THE CRITERION APPROACH

**Анотація.** Ефективність збирання врожаю значною мірою залежить від якості транспортного обслуговування, яке відрізняється великим обсягом перевезень за короткий проміжок часу. Висока сезонність, обмежені терміни збирання та незадовільний технічний стан автотранспортних засобів створюють значні труднощі в транспортуванні зерна від комбайна до зерноховища. Для забезпечення ефективного управління транспортними процесами під час перевезення зерна необхідно використовувати наукові підходи до оптимізації транспортних потоків і визначення резервів для зменшення витрат у системі «поле–транспорт–зерноховище», враховуючи динаміку процесів і вихідні дані. Саме такий підхід до управління ефективністю перевезення зернових культур автомобільним транспортом розглянуто в цій роботі. В ході дослідження проведено короткий огляд сучасних аспектів проблематики перевезення зернових в Україні, технологічні, технічні та організаційні особливості забезпечення ефективності процесів їхнього виробництва. З метою удосконалення виробничих процесів запропоновано використовувати двоетапну схему перевезення зерна з поля до споживача, яка дозволяє знизити негативну антропогенну дію автотранспорту та підвищити його якість і збереженість. Розглянуто та оцінено складові витрат часу в роботі зернозбиральних комплексів. На основі критеріального підходу запропоновано варіант підвищення ефективності транспортування зернових культур автомобільним транспортом, який дозволяє отримати об'єми збирання, перевезення з кожного поля на пункти зберігання, маршрути перевезень із мінімальними витратами з урахуванням втрат зерна за кожним варіантом збирання та вийти на загальний позитивний результат оптимізації, що буде предметом подальших досліджень.

**Ключові слова:** автомобільний транспорт, логістика, критеріальний підхід, ефективність перевезень, виробництво та збут зернових культур.

**Abstract.** The efficiency of harvesting largely depends on the quality of transportation services, which is characterized by a large volume of transportation in a short period of time. The high seasonality, limited harvesting time and poor technical condition of vehicles create significant difficulties in transporting grain from the combine to the granary. To ensure effective management of transport processes during grain transportation, it is necessary to use scientific approaches to optimize traffic flows and identify reserves to reduce costs in the field-transport-granary system, taking into account the dynamics of processes and initial data. It is this approach to managing the efficiency of grain transportation by road that was considered in this paper. The study provides a brief overview of the current aspects of grain transportation in Ukraine, technological, technical and organizational features of ensuring the efficiency of grain production processes. In order to improve production processes, it is proposed to use a two-stage scheme of grain transportation from the field to the consumer, which allows reducing the negative anthropogenic impact of motor vehicles and improving its quality and safety. The components of time costs in the operation of grain harvesting complexes are considered and evaluated. Based on the criterion approach, a solution to the problem of increasing the efficiency of grain transportation by road is proposed, which allows obtaining the volume of harvesting, transportation from each field to storage points, transportation routes with minimal costs, taking into account grain losses for each harvesting option, and reaching an overall positive optimization result, which will be the subject of further research.

**Keywords:** road transport, logistics, criterion approach, transportation efficiency, production and marketing of grain crops.

#### Вступ

Україна є одним із основних світових виробників зернових культур. За даними

Всеукраїнської аграрної ради [1], аграрна частка внутрішнього валового продукту (ВВП) України за підсумками 2023 року становить 17

%. Одним із найважливіших етапів виробництва та збуту зернових культур є процес перевезення. Значні обсяги виробництва зерна потребують забезпечення ефективності його транспортування до споживачів.

На сьогодні основними аспектами проблематики перевезення зернових в Україні є такі [2, 3, 4]:

- ускладнення умов ведення аграрного бізнесу;
- скорочення експорту внаслідок зменшення площ засіву;
- підвищення частки експорту зерна в Європу шляхом використання комбінованих вантажоперевезень залізничним та автомобільним транспортом (АТ);
- зростання перевезень зернових культур АТ на території України.

Наявність цих аспектів спонукає аграріїв, трейдерів і транспортні компанії адаптуватися до нових умов шляхом пошуку інноваційних підходів для забезпечення стійкості аграрного виробництва та підвищення ефективності перевізних процесів. Для забезпечення ефективності управління процесами транспортування зерна слід на основі наукового підходу оптимізувати транспортні потоки шляхом встановлення резервів скорочення витрат у системі «поле-автомобіль-зерносковище».

Упродовж останніх років дослідники з різних країн світу вивчали аспекти вирішення цієї проблеми. Зокрема в роботі [5] автори проводили оптимізацію модельного ряду хопердозаторів з метою покращення процесів транспортування зерна і зернових культур на основі комплексу технічних та економічних показників. У роботі [6] досліджувалися питання оптимізації ланцюга поставок зерна в контейнерах шляхом мінімізації загальних витрат. Автори прийшли до висновку, що збільшення пропускної спроможності інтермодальних майданчиків, розміру парку вантажівок і парку вагонів знижує загальну вартість ланцюга постачання. Якщо перші два фактори позитивно впливають на стійкість ланцюга поставок, останній збільшує ризик збоїв у ланцюгу поставок. Науковці зі США присвятили своє дослідження [7] удосконаленню процесів транспортування зерна з поля до елеватора. Розроблена ними імітаційна модель дискретних подій дозволяє оцінити вплив обмежень перевізних

спроможностей на ефективність збирання урожаю, використання ресурсів і пропускну здатність системи. В роботі [8] була розглянута проблема аналітичності комплексних критеріїв, які використовуються для оцінювання виробництва зерна сільськогосподарськими підприємствами. Зокрема автором запропоновані алгоритми ітераційної оптимізації структури парку комбайнів на основі техніко-економічних показників їх роботи. Дослідження колективу науковців [9] присвячені проблемам формування структури збирально-транспортних комплексів. Оптимальний парк збиральних машин і транспортних засобів автори пропонують визначати за допомогою комплексної номограми умов їх взаємодії. Як інтегральний критерій для формування структури комплексу та визначення мінімальної вартості транспортування однієї тонни зерна використано технічні особливості сільськогосподарського підприємства, технологічні параметри збиральної техніки та техніко-економічні показники роботи збиральних машин.

Відштовхуючись від особливостей розглянутих робіт та зважаючи на поточні проблеми аграрної галузі, виникає необхідність у підвищенні ефективності роботи зернозбиральних комплексів, удосконаленні організації, планування та управління процесами перевезення зернових культур автомобільним транспортом. Обумовлено це тим, що сьогодні будь-яка система, яка регулює процеси в середині зернозбирального комплексу, швидко вичерпує свій оптимізаційний ресурс. Натомість, якщо поєднати між собою декілька підходів до вирішення наявних проблем, можна отримати більшу гнучкість та ефективність у вирішенні технічних, технологічних та економічних питань.

### Основна частина

У сільському господарстві вирощування зернових є одним з основних, складних та трудомістких виробництв. Для його спрощення, скорочення фізичного навантаження працівників використовують засоби механізації виробництва, особливо під час збиральної кампанії [7, 9]. Процес збирання врожаю повинен проходити своєчасно і в необхідні терміни. Це дозволить зібрати урожай із мінімальними втратами.

Застосування сучасних способів визначення обсягів перевезення, підвищення ефективності експлуатації автотранспортних засобів (АТЗ) сприяють вирішенню проблеми забезпечення збереження якісного стану та кількості зібраного урожаю. Процес обробки зерна після жнив повинен розглядатися як частина єдиного виробничого процесу збирання та транспортування зерна.

Забезпечення підвищення ефективності робіт потребує уточнення знань про техніко-експлуатаційні показники збиральних комбайнів, АТЗ, врожайність зернових культур, рельєф місцевості та розміри полів, їхню віддаленість тощо [10]. Це дозволить підвищити якість збирально-транспортного комплексу та вдосконалити процес післяжнивної обробки зерна з урахуванням технологічних, технічних та організаційних особливостей виробництва зерна (рис. 1).

Реалізація особливостей виробництва зерна потребує розробки певних науково-методичних положень та рекомендацій, пропозицій щодо підвищення технологічної та технічної ефективності збиральної кампанії: технології збирання, транспортування зерна, скорочення

втрат та мінімізації собівартості робіт. При цьому, актуальними практичними завданнями є визначення оптимального складу збирально-транспортних ланок, маршрутів руху АТЗ, місць розташування пунктів прийому зерна тощо.

За універсальний критерій оптимальності можна прийняти мінімум витрат на збирання та транспортування зерна [11, 12]

$$V_O = V_Z + V_T + V_{VK} + V_{NZ} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $V_Z$  – витрати на збирання зерна;

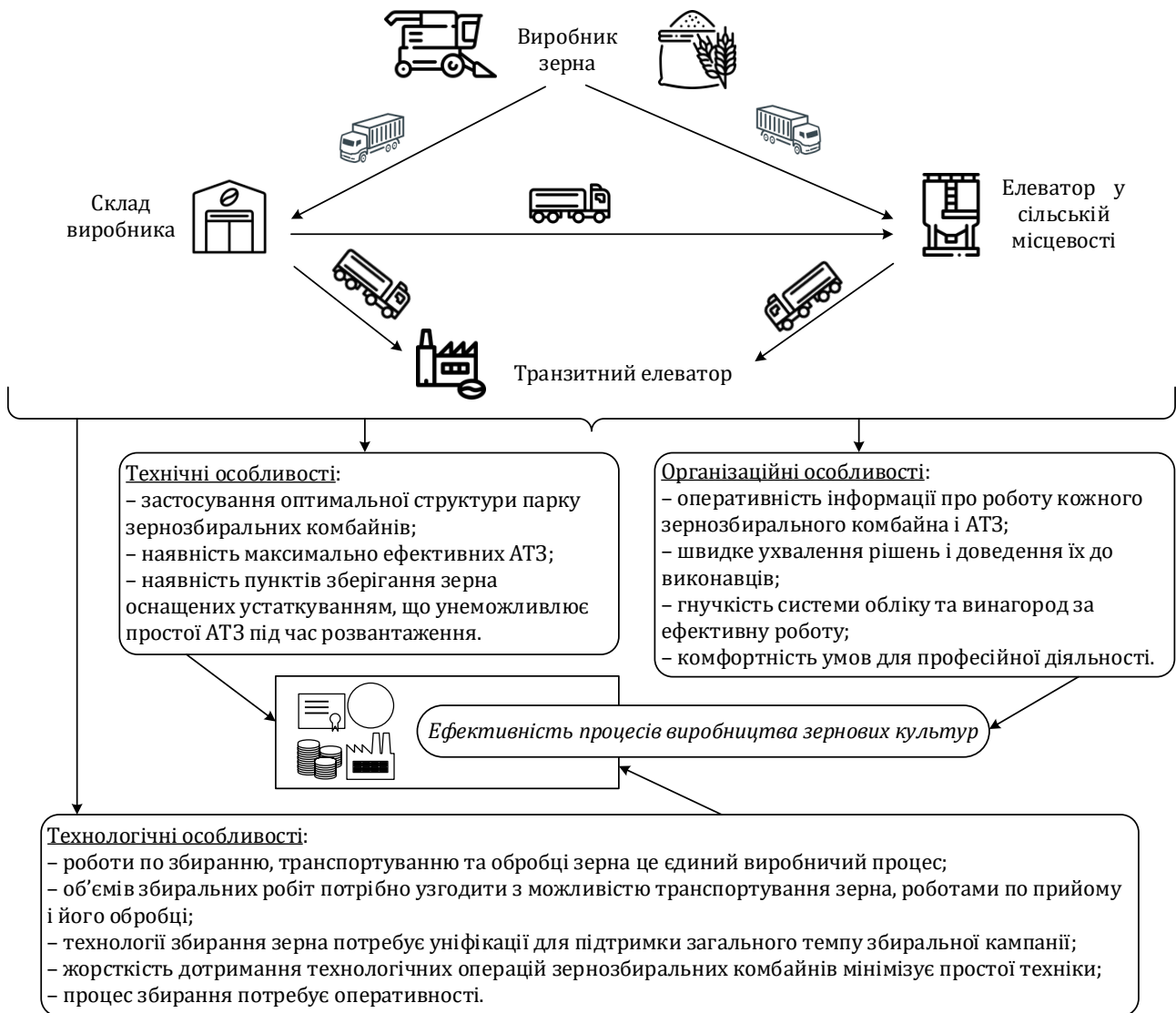
$V_T$  – витрати на транспортування зерна;

$V_{VK}$  – витрати внаслідок втрати зерна за комбайном;

$V_{NZ}$  – витрати внаслідок втрати зерна через несвоєчасне збирання.

Альтернативним підходом може стати використання як критерія оптимальності мінімуму приведених витрат [9], які враховують вплив функції зовнішніх чинників  $F_{ZN}$ , технічних показників зернозбиральних комбайнів  $P_K$  та АТЗ  $P_A$

$$V_P = f(F_{ZN}, P_K, P_A) \rightarrow \min. \quad (2)$$



**Рис. 1.** Особливості забезпечення ефективності процесів виробництва зернових культур

Витрати на транспортування зерна великі і можуть доходити до 30–50 % від собівартості зернової продукції [4]. Транспортування зерна з поля до місць зберігання (склад, елеватор) можна реалізувати кількома способами організації роботи АТЗ та зернозбиральних комбайнів [6–9] (рис. 2).

АТЗ під час прямих перевезень зерна разом із транспортуванням виконують складальну операцію. Такий спосіб не вимагає застосування спеціалізованих АТЗ, з автомобілями можуть використовуватися і трактори з причепами. Основний недолік – потреба в

жорсткій узгодженості роботи АТЗ та комбайнів у часі для забезпечення високої ефективності процесів. Прямі перевезення АТЗ з прокладенням розвантажувальних магістралей мінімізують пробіги АТЗ по полю. Основний недолік – необхідність використання комбайнів з уніфікованою місткістю бункерів.

Застосування проміжних компенсаційних ланок дозволяє суттєво скоротити тривалість складальних операцій порівняно з прямими перевезеннями АТЗ. Водночас значно утрудненим є контроль виконання робіт окремими зернозбиральними комбайнами.



**Рис. 2.** Основні способи організації роботи АТЗ і зернозбиральних комбайнів

Перевезення зерна із застосуванням «мультиліфтів» потребує оновлення всього парку АТЗ аграрних підприємств, що в нинішній економічній ситуації є нездійсненним.

Застосування контейнерних перевезень потребує наявності накопичувача-перевантажувача, контейнерів, контейнеровозів. У разі необхідності їхнього придбання це обов'язково позначається на собівартості перевезень.

Складність конструкції цих засобів також може негативно позначитися на їхній надійності та успішності усєї збиральної кампанії.

Отже, існує потреба в удосконаленні процесів перевезення зерна.

Для вирішення цього завдання пропонується використовувати двоетапну схему перевезення з поля до споживача (**рис. 3**).



**Рис. 3.** Схема використання тимчасових пунктів зберігання для доставки зерна до споживача

Як видно з **рис. 3**, на першому етапі зерно перевозять АТЗ невеликої вантажопідйомності з поля на тимчасовий пункт зберігання (відкритий або закритий майданчик, тік, склад) в безпосередній близькості від поля. В подальшому (на другому етапі) тимчасовий пункт зберігання виступає як постачальник. З нього АТЗ великої вантажопідйомності перевозять зерно на зерносховище, елеватор чи завод із переробки зерна, які обладнані сучасними високопродуктивними пристроями для обробки і сушки зернових культур. Ця схема транспортування зерна дає змогу знизити негативну антропогенну дію автотранспорту та підвищити його якість і збережність.

Значний резерв підвищення продуктивності транспортно-технологічних перевезень зернових культур полягає у зменшенні непродуктивних витрат часу, зокрема тих, що виникають під час очікування на вивантаження зерна та завантаження автотранспорту.

У процесі обґрунтування оптимального парку АТЗ необхідно враховувати, що кількість транспорту повинна відповідати продуктивності зернозбиральних комбайнів, оскільки їхня продуктивність має дорівнювати загальній продуктивності транспорту, який їх обслуговує.

$$N_A \cdot Q_A = Q_K \cdot N_K, \quad (3)$$

де  $N_A$  – кількість АТЗ;  
 $Q_A$  – продуктивність АТЗ, т/год;  
 $Q_K$  – продуктивність зернозбирального комбайна, т/год;

$N_K$  – кількість зернозбиральних комбайнів.  
 Загальну тривалість виконання будь-якого технологічного процесу можна подати у вигляді залежності

$$T_{\Sigma} = T_P + T_{OV} + T_{NV} + T_{IV}, \quad (4)$$

де  $T_P$  – чистий час виконання процесу, год;  
 $T_{OV}$  – обов'язкові (необхідні) втрати часу, пов'язані з особливостями реалізації технологічного процесу, год;

$T_{NV}$  – час непродуктивних втрат, пов'язаний із відновленням або підтриманням працездатності учасників технологічного процесу, год;

$T_{IV}$  – інші втрати часу, пов'язані з організацією робіт, природно-кліматичними умовами та іншими непередбаченими причинами, год.

Залежність (4) відображає взаємозв'язок чистого часу роботи зернозбирального комплексу, часу, необхідного для забезпечення технологічного циклу, втрати часу через незадовільний технічний стан засобів збору зерна та/або транспортування, а також якості організації робіт. Вона дозволяє оцінити і показати переваги роботи триланкової системи збирання зернових культур (рис. 3).

У цьому випадку найкращий варіант, коли немає втрат часу, можна подати у вигляді

$$T_{\Sigma} = T_P, \quad T_V = T_{OV} + T_{NV} + T_{IV} = 0, \quad (5)$$

де  $T_V$  – загальні втрати часу, год.

На практиці завжди  $T_V > 0$ , тому умову (5) можна досягти лише теоретично. Аналіз витрат часу виробників зернових культур показує, що 43,5 % – це чистий час роботи. Основні втрати часу (28 %) можна віднести до виконання транспортних робіт та очікування вивантаження, усунення технічних та технологічних відмов становить 19,5 % часу, і лише 9 % часу займає сам процес збирання.

На основі критерію оптимальності – мінімуму витрат від збирання, перевезення і втрат зерна від несвоєчасного збирання, враховуючи виробничі можливості, пропускну спроможність пунктів зберігання, вибір

оптимального варіанту об'ємів збирання і розподілу транспортних потоків можна подати як завдання мінімізації витрат

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} \left( (V_{ij} \cdot I_{ij} + \sum_{e=1}^d Q_{eij} \cdot \delta_{ei} \cdot C_e) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^P t_{ikp} x_{ikp} \right) \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} a_{ikj} \cdot I_{ij} - \sum_{p=1}^P x_{ikp} \geq 0, \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m;$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} I_{ij} \leq 1, \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, J_i;$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ikp} \geq b_{ip}, \quad (9)$$

$$p = 1, \dots, P; \quad k = 1, \dots, m;$$

$$x_{ikp} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad p = 1, \dots, P; \quad (10)$$

де  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} V_{ij} \cdot I_{ij}$  – витрати на збирання зерна за  $j$ -м варіантом на  $i$ -му полі;

$\sum_{e=1}^d Q_{eij} \cdot \delta_{ei} \cdot C_e$  – витрати внаслідок незібрання зерна на  $i$ -му полі за  $j$ -м варіантом збирання;

$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^P t_{ikp} x_{ikp}$  – витрати на перевезення зернової культури  $k$ -го виду з  $i$ -го поля на  $p$ -й пункт;

$d$  – число днів після оптимального терміну збирання урожаю;

$a_{ikj}$  – обсяг виробництва зернової культури  $k$ -го виду за  $j$ -м варіантом на  $i$ -му полі;

$b_{ip}$  – сумарна потреба в зерновій культурі  $k$ -го виду на  $p$ -му пункті споживання.

Пара  $\langle I, x \rangle$  – це виробничо-транспортний план, якщо  $I$  відповідає умовам (6)-(10).  $I$  є виробничою складовою, а  $x$  – транспортною. Виробничо-транспортний план є допустимим у разі відповідності умовам (7)-(10), а оптимальним при мінімізації функціоналу (6).

## Висновки

Ведення бойових дій на території України стало причиною кардинальних змін у діяльності аграрного сектору. Логістичні витрати в Україні на сьогодні складають 30–50 % у собівартості продукції. Це свідчить про значний потенціал щодо скорочення витрат підприємств. Запропонований варіант вирішення задачі підвищення ефективності транспортування зернових культур автомобільним

транспортом дозволяє отримати об'єми збирання, перевезення з кожного поля на тимчасові пункти зберігання, маршрути перевезень з мінімальними витратами з урахуванням втрат зерна за кожним варіантом збирання та вийти на загальний позитивний результат оптимізації, що буде предметом подальших досліджень.

### References

1. Dykun A. (2023). Medium-sized businesses produce 65 % of agricultural gross domestic product and need the most support. [Online]. Retrieved from <https://uacouncil.org/uk/post/serednij-biznes-viroblae-65-agrarnogo-vvp-ta-potrebue-najbilsoi-pidtrimki-andrij-dikun>.
2. UkraineInvest. (2024). Investment opportunities in the agro-processing sector. [Online]. Retrieved from <https://ukraineinvest.gov.ua/wp-content/uploads/2024/09/sector-agropererobky-ukrayiny-1.pdf>.
3. Naumov, M., & Rybak, H. (2023). The main problems of the export of cereals under the conditions of the state of martial. *Economy and society*, 52, 1-6. Retrieved from <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-80>.
4. Kashkanov, A., & Buriak, V. (2024). Problem Issues of Organizational and Technical Development of Grain Transportation by Road Transport in Ukraine. *Advances in mechanical engineering and transport*, 1, 22, 163-169. Retrieved from <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1357>.
5. Khomenko L., Tkachenko S., & Vodolazska O. (2023). Increasing the profitability of the agricultural market by optimizing grain transportation. *Economics and Region*, 2, 89, 88-95. Retrieved from [https://doi.org/10.26906/eip.v0i2\(89\).2940](https://doi.org/10.26906/eip.v0i2(89).2940).
6. Li, J., Jing, K., Khimich, M., & Shen, L. (2023). Optimization of Green Containerized Grain Supply Chain Transportation Problem in Ukraine Considering Disruption Scenarios. *Sustainability*, 15, 9, 7620. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/su15097620>.
7. Aaron P. Turner, Michael P. Sama, L. Samuel G. McNeill, Joseph S. Dvorak, Tyler Mark, & Michael D. Montross (2019). A discrete event simulation model for analysis of farm scale grain transportation systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105040. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105040>.
8. Rogovskii, I. (2021). Analyticity of complex criteria for evaluation of grain production in agricultural enterprises intensification of engineering management. *Machinery & Energetics*, 12, 4, 129-138. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.04.129>.
9. Muzylyov, D., Shramenko, N., Karnaukh, M., Berezchnaja, N., Kravcov, A., & Kutya, O. (2019). The problems of transport and logistics providing at the agricultural branch. Monograph. Kharkiv: Miskdruk.
10. Lubko, D., & Zinovieva, O. (2023). Design of a simulation model of grain harvesting and transportation complex. *Scientific Bulletin of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*, 13, 1, 492-501. Retrieved from <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-42>.
11. Kashkanov V. A., Kashkanov A. A., & Var-chuk V. V. (2017). Organization of road transportation. Textbook. Vinnytsia: VNTU.
12. Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2014). The Handbook of Logistics and Distribution Management. Understanding the Supply Chain. 5th edition. Philadelphia: Kogan Page.