

**МОДЕЛЬ УЗГОДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ  
ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗБІЖЖЯ АВТОТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ  
З ПОЛЯ ДО ТИМЧАСОВОГО ПУНКТУ ЗБЕРІГАННЯ**

**О.А. Воронков<sup>1</sup>, І.Л. Роговський<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Голова циклової комісії «Транспортні технології»,  
Фаховий коледж інженерії, управління та землевпорядкування  
Державного некомерційного підприємства «Державний університет  
«Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-0955-9081

<sup>2</sup>д. т. н., професор, завідувач кафедри «Технічний сервіс та інженерний менеджмент  
імені М. П. Момотенка»,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-6957-1616

**Анотація**

**Вступ.** У багатьох роботах було отримано, що проблеми підвищення ефективності застосування в транспортних системах автотранспортних засобів, збереження збіжжя та приведення його в продукт вирішуються під час кампанії збору врожаю зернових сільськогосподарських культур. **Мета** полягає у формуванні методичних передумов обґрунтування моделі узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання. **Результати.** Було отримано, що на підставі виробничих можливостей, вартості збирання та перевезення зерна, пропускної спроможності пунктів зберігання існує можливість вирішення задачі визначення оптимальних планів збирання та розподілу транспортних потоків збіжжя серед тимчасових пунктів зберігання, за умови мінімізації суми витрат на збирання та транспортування зерна з урахуванням втрат зерна. Запропоновано, що пара об'єм перевезення обсягу сільськогосподарського збіжжя з поля за варіантом кампанії до пункту зберігання та інтенсивність застосування варіанту кампанії поля збирання сільськогосподарського збіжжя характеризує лише тоді виробничо-транспортний план, якщо існують чіткі умови. При цьому об'єм перевезення обсягу сільськогосподарського збіжжя з поля за варіантом кампанії до пункту зберігання описує компоненту виробничого плану, а інтенсивність застосування варіанту кампанії поля збирання сільськогосподарського збіжжя – транспортно-го плану. Доданки цільової функції представимо у виді таких рівнянь, що відображають відповідно виробничі та транспортні витрати з реалізації плану. Виробничо-транспортний план вважаємо допустимим, якщо він задовольняє чітким умовам і оптимальним, якщо, крім того, доставляє мінімум функції. Вирішення запропонованих виразів є рішення задачі часткового цілочисельного лінійного програмування і характеризується низкою специфічних особливостей. Алгоритм передбачає побудову послідовності таких виробничих планів, котрим сума виробничих і транспортних витрат мінімальна. Оскільки отриманий на першому

кроці виробничий план є найкращим з позиції витрат на виробництво продукції, поліпшення цієї суми можна досягти лише гірший виробничий план, але при цьому отримуючи велику економію на транспортних витратах. **Висновки.** У цій статті ми показуємо, що існують методичні передумови обґрунтування моделі узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання. Встановлено, що модель визначення обсягів транспортування обмолоченого зерна від комбайнів до пункту тимчасового зберігання з урахуванням втрат зерна при збиранні врожаю після оптимальних агротермінів розглядає операції збирання та транспортування зерна як єдиний неподільний процес і дозволяє, завдяки раціональному розподілу транспортних потоків зібраного зерна, зменшити втрати зерна при збиранні врожаю за обмеження оптимальних агротермінів.

**Ключові слова:** автотранспорт, збіжжя, модель, агропромисловий комплекс, транспортний потік.

#### MODEL OF COORDINATION OF TRANSPORT FLOWS OF GRAIN TRANSPORTATION BY VEHICLES FROM FIELD TO TEMPORARY STORAGE POINT

O.A. Voronkov<sup>1</sup>, I.L. Rogovskii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chairman of the cycle commission of transport technologies,  
Professional College of Engineering, Management and Land Management of the State  
University of the State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine,  
ORCID ID 0000-0003-0955-9081

<sup>2</sup>DS, Professor, Head of the Department of Technical Service  
and Engineering Management named after M. P. Momotenko,  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-6957-1616

#### Summary

**Introduction.** Most of the works have received that the problems of improving the efficiency of use in transport systems of vehicles, preserving grain and bringing it into the product are resolved during the campaign of harvesting grain crops. The **purpose** is to formulate methodological prerequisites for substantiating the model of coordination of transport flows of transportation of grain by motor vehicles from the field to a temporary storage point. **Results.** It was obtained that on basis of production opportunities, the cost of harvesting and transportation of grain, the capacity of storage points there is a possibility of solving the problem of determining the optimal plans of harvesting and distribution grain. It is proposed that the volume of transportation of agricultural grain from the field by the campaign to the storage point and the intensity of the variant of the campaign of the field of field harvesting field is characterized only when the production and transportation plan, if there are clear conditions. At the same time, the volume of agricultural grain transportation from the field by the campaign to the storage point describes the component of the production plan, and the intensity of using the variant of the campaign of the field of harvesting agricultural grain – a transport plan. The additions of the target function will be presented in the form of equations, which reflect accordingly production and transport costs for the implementation of the plan. The

*production and transmission plan is considered acceptable if it satisfies clear conditions and optimal, if, in addition, delivers a minimum of function. The solution of the proposed expressions is to solve the problem of partial integer linear programming and is characterized by a number of specific features. The algorithm involves the construction of such production plans, which is minimal. Since the production plan obtained in the first step is the best from the standpoint of production costs, only a worse production plan can be improved, but getting a lot of savings on transport costs can be achieved.*

**Conclusions.** *In this article, we show that there are methodological preconditions for justifying the model of coordination of transport flows of transportation of grain by motor vehicles from the field to a temporary storage point. It is established that the model for determining the volume of transportation of threshed grain from combines to a temporary storage point, taking into account the loss of grain when harvesting after optimal agro -termini, considers the operations of harvesting and transportation of grain as a single indivisible process, and allows, thanks to the rational distribution of transport flows of harvesting.*

**Key words:** *vehicle, grain, model, agro-industrial complex, traffic flow.*

Вступ. Роль автомобільного транспорту в сільськогосподарському виробництві настільки висока, що частково вирішити проблему негативного антропогенного впливу транспортних засобів можливо лише внаслідок запровадження нових методів організації кампанії збору врожаю [1]. Автоперевезення – це зв'язок у єдиному технологічному ланцюжку сільськогосподарського виробництва, який домінуюче забезпечує матеріальні потоки різних врожаїв сільськогосподарських культур на всіх етапах та етапах його виробничого циклу [2]. При цьому автотранспортні засоби є інтегратором виробничої діяльності аграрних підприємств з виробництва, переробки та обслуговування сільськогосподарського виробництва [3]. Вважається обґрунтованим формування проблеми узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання.

**Постановка проблеми.** Для вирішення проблеми підвищення ефективності застосування в транспортних системах автотранспортних засобів [4], збереження збіжжя та приведення його в продукт під час кампанії збору врожаю для транспортування зерна [5] ми пропонуємо використовувати двоступеневий контур транспорту з поля до споживача, представлений на рис. 1. Згідно з цим (рис. 1) споживач розглядається як зерносховище, елеватор, ангар або склад зі зберігання зерна:

– на першому етапі зернове збіжжя перевозиться автотранспортними засобами з поля до тимчасової точки зберігання [6];

– на другому етапі з тимчасової точки зберігання зерно доставляється споживачеві [7].

На першому етапі автотранспортні засоби, раціональної вантажопідйомності, що чинять менший тиск на ґрунт, порівняно з існуючими виробничими вимušеними задіяними автотранспортними засобами, і що виробляють меншу масу викидів шкідливих речовин від працюючого теплового двигуна внутрішнього згорання [8], транспортують зерно на тимчасовий пункт зберігання, який у подальшому виступає як постачальник, що знаходиться в безпосередній близькості від

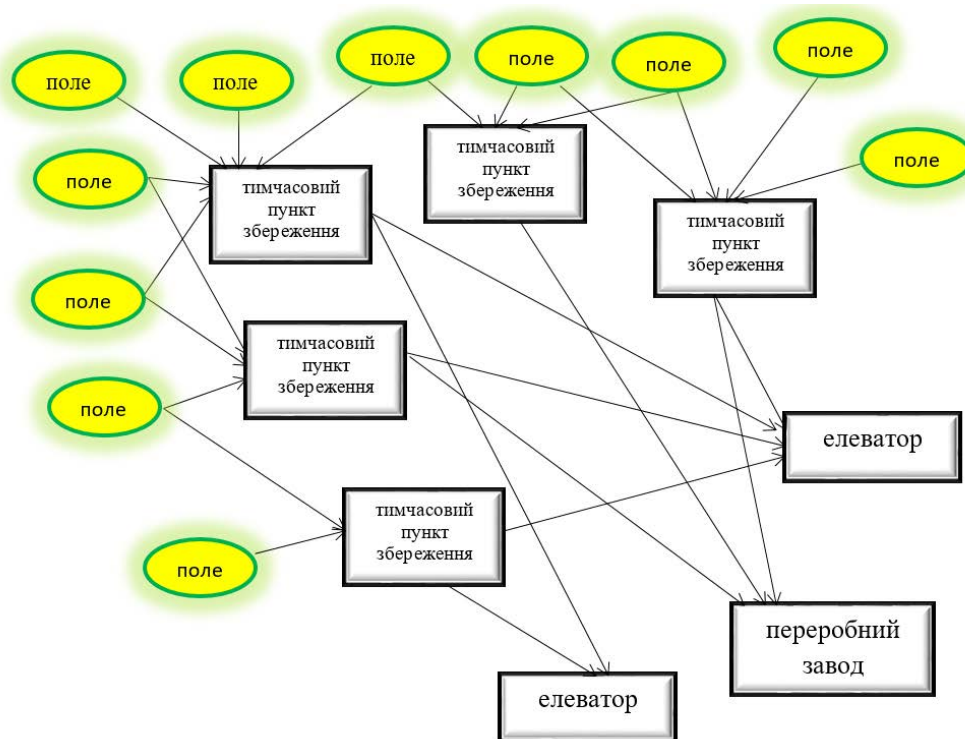


Рис. 1. Семантична схема перевезення автотранспортом зерна з поля до споживача через тимчасову точку зберігання

поля [9]. Тимчасовим пунктом зберігання може бути: відкритий або закритий майданчик, зерновий тік [10].

На другому етапі автотранспортними засобами великої вантажопідйомності зерно з тимчасового пункту зберігання перевозиться на зерносховище, яке обладнане сучасними високопродуктивними пристроями для первинної обробки та сушіння зерна [11].

Дана схема транспортування зернового збіжжя дозволяє вирішити проблеми зі зниження негативного антропогенного впливу автотранспорту за рахунок більш ефективної експлуатації автотранспортних засобів і підвищення якості та збереження зерна.

Аналіз досліджень і публікацій. Двоетапна схема перевезень зерна передбачає використання автотранспорту різної вантажопідйомності [12], що дозволяє раціональніше використовувати наявний типаж автотранспортних засобів. Перевезення зерна з поля на тимчасовий пункт зберігання передбачає використання автотранспорту меншої вантажопідйомності, який має велику маневреність, що відіграє дуже важливу роль при русі по полю від комбайна до комбайна і по ґрунтових дорогах сільської місцевості. До того ж він чинить менший тиск на орні шари ґрунту при русі по полю, а також за рахунок меншого об'єму двигуна викидає меншу масу вихлопних газів і менш згубний антропогенний вплив на навколишнє середовище [13].

Другий автотранспорт великої вантажопідйомності використовується для транспортування зерна з тимчасового пункту зберігання споживачеві. За рахунок того, що тимчасові пункти зберігання знаходяться безпосередньо біля доріг з асфальтовим покриттям, автотранспорту не доводиться заїжджати на поля і рухатися ґрунтовими дорогами з невеликою швидкістю. Даний факт дозволяє скоротити негативний вплив автотранспорту на екосистеми та зменшити матеріальні витрати на перевезення [14].

Застосування даної схеми передбачає, що зерно проходить обробку та сушіння не на низькопродуктивному обладнанні, використаному на токах і зерноприймальних пунктах, а на уніфікованому високопродуктивному обладнанні, встановленому на елеваторі та зерносховищі [15].

Внаслідок того, що більшість зерновиробників не мають власних елеваторів та потужностей по сушінню та обробці зерна, а добова пропускна здатність елеваторів не дозволяє прийняти все вироблене зерно, для скорочення втрат зерна зерновиробникам доводиться укладати договори на постачання зерна одночасно з кількома споживачами [16].

Цим зумовлено основну проблему – складність організації транспортного обслуговування всього комплексу об'єктів інфраструктури сільгосптоваровиробників.

Характерною рисою сучасних транспортних процесів при перевезенні зерна є висока динамічність самих транспортних процесів, що протікають, і тісний зв'язок їх з виробництвом. Часта зміна обсягів прибирання та високі вимоги до своєчасності транспортного обслуговування процесу збирання збіжжя змушують автотранспорт змінювати структуру обсягів потоків та організовувати транспортний процес з метою максимальної пристосованості до умов, що постійно змінюються [17]. Жорсткі вимоги своєчасного автотранспортного обслуговування збиральних операцій в умовах, що постійно змінюються, створюють об'єктивну необхідність гнучкої організації роботи автотранспорту. На підставі цього потрібно знайти найбільш правильний, раціональний план перевезень та визначити необхідну кількість автотранспортних засобів, яка дозволить виконати завдання з перевезення заданого обсягу збираного зерна в умовах діючої нерівномірності за мінімальних витрат.

**Формулювання цілей статті.** Мета статті полягає у формуванні методичних передумов обґрунтування моделі узгодження транспортних потоків перевезення збіжжя автотранспортними засобами з поля до тимчасового пункту зберігання.

З огляду на мету в статті окреслено такі завдання:

1. Обґрунтувати використання схеми двох стадій для транспортування збіжжя зі зменшенням негативного впливу на навколишнє середовище автотранспортних засобів.

2. Розробити математичну модель визначення обсягів транспортування обмолоченого зерна від комбайнів до пункту тимчасового зберігання з урахуванням втрат зерна при збиранні врожаю після оптимальних агротермінів.

3. Обґрунтувати доцільність цілочисельної виробничо-транспортної моделі, яка забезпечує максимальну адаптацію до реальних умов поставленого завдання перевезень збіжжя автотранспортом.



**Основний матеріал дослідження.** Для скорочення собівартості виробництва зерна процес доставки зерна з поля на тимчасовий пункт зберігання (рис. 2) необхідно розглядати разом із процесом збирання зерна.

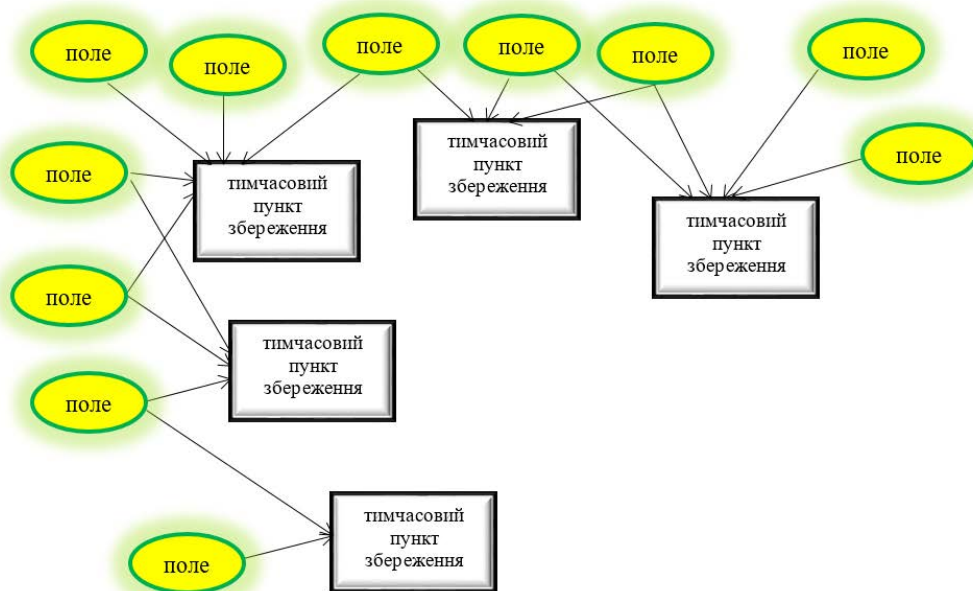


Рис. 2. Семантична схема перевезення автотранспортом зерна з поля на тимчасовий пункт зберігання

У Київській області найпоширенішими є прямі перевезення зерна, коли зерно з комбайна вивантажується в автотранспортний засіб, який може мати різну вантажопідйомність, і воно перевозить зерно на зерносховище. Такий вид перевезень при всіх своїх перевагах має одну негативну особливість: неузгодженість організації транспортного процесу призводить до простоїв комбайнів в очікуванні прибуття автотранспортного засобу, для вивантаження заповненого бункера та автомобілів в очікуванні наповнення бункера комбайна, що знижує ефективність використання автотранспорту.

Виявлення таких простоїв призводить до того, що комбайни не повністю обмолочують намічений змінний виробіток, що надалі призводить до втрат зерна при збиранні після оптимальних агротермінів. Після настання повного дозрівання в зернових культурах починаються незворотні процеси: солома швидше старіє, починають рости бур'яни в посівах, що призводить до лежання хлібів та суттєво ускладнюються умови проведення збиральної кампанії. До того ж відбуваються додаткові втрати, спричинені самоосипанням зерна, проростанням його на корені, обламуванням колосків, поїданням частини зерна гризунами в період збирання тощо. Перераховані вище фактори позначаються на значних втратах і негативно впливають на якість зерна.

Враховуючи це, необхідно раціональніше планувати процеси, що відбуваються під час жнив, при цьому звертати увагу на такі параметри, як: вантажопідйомність

кожної моделі автотранспортного засобу, продуктивність зернозбиральних комбайнів, пропускна здатність зерносховищ. Усе це допоможе скоротити взаємні простой комбайнів та автотранспорту, простой автотранспортних засобів при вивантаженні зерна на зерносховище, точно розрахувати необхідну кількість автотранспортних засобів для обслуговування комбайнів, все це згодом призведе до зниження собівартості збиральної кампанії, збереження виробленого зерна та покращення його якості.

Більшість сільськогосподарських організацій, не володіючи належним фінансуванням, мають недостатню матеріальну базу, внаслідок чого потрібно розробити модель транспортування зерна, що дозволяє з мінімальними витратами провести збирання та транспортування зерна з наявних площ.

Враховуючи вищеописане, загальне завдання розділимо на два етапи розв'язання:

- визначення обсягів прибирання із закріплення полів за тимчасовими пунктами зберігання та розподіл обсягів перевезення за маршрутами;
- розрахунок потреби в автотранспорті з вантажопідйомності та маршрутів перевезень.

В основі критерію оптимальності запропонованої моделі лежить мінімум витрат від збирання, перевезення та втрат зерна від невчасного збирання.

В основі розробленої математичної моделі лежить клас динамічних транспортних поточкових моделей, що є модифікацією виробничо-транспортної моделі. Її перевагою є те, що вона розглядає процес виробництва та транспортування зерна як єдине ціле, а також пропонує вирішення поставленого завдання з урахуванням продуктивності автотранспортних засобів та комбайнів. Крім того, ця модель враховує значення втрат зерна від невчасного збирання, оскільки маса втрат, досягаючи 20 % від зібраного врожаю, є одним із ключових факторів зниження собівартості виробництва та підвищення обсягів зібраного врожаю. Для визначення обсягів збирання та транспортування зерна було обрано саме цілочисельну модель, оскільки вона в розрахунках враховує варіанти збирання цілим числом комбайнів. Таким чином, запропонована нами модель стала новою модифікацією цілісної виробничо-транспортної моделі, що дає можливість знизити сумарні витрати на збирання та перевезення зерна, що дозволяє знайти оптимальний план збирання та транспортування зерна, розглядаючи дані етапи як єдиний процес, та враховувати втрати зерна від невчасного збирання.

На підставі виробничих можливостей, вартості збирання та перевезення зерна, пропускної спроможності пунктів зберігання необхідно вирішити задачу визначення оптимальних планів збирання та розподілу транспортних потоків збіжжя серед тимчасових пунктів зберігання, за умови мінімізації суми витрат на збирання та транспортування зерна з урахуванням втрат зерна.

Вибір оптимального варіанта обсягів прибирання та розподілу транспортних потоків ставиться як завдання мінімізації витрат:

$$\left( \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left( c_{ij} z_{ij} + \sum_{j=1}^J q_{ijr} \delta_{ijr} c_{ij} \right) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K t_{ijk} x_{ijrk} \right) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ij} - \sum_{k=1}^K x_{ijrk} \geq 0, i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^R z_{ij} \leq 1, i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijrk} \geq b_{jk}, k = 1, \dots, K; j = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$x_{ijrk} \geq 0, i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K; \quad (5)$$

де  $\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R (c_{ijr} z_{ij})$  – затрати на збирання збіжжя по  $r$ -у варіанту збирання на  $i$ -у полі;

$\sum_{r=1}^R (Q_{ijr} c_{ij} \delta_{ijr})$  – вартість втрат незібраного обсягу збіжжя на  $i$ -у полі при  $r$ -у варіанту збирання;

$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (t_{ijrk} x_{ijrk})$  – затрати на перевезення збіжжя  $j$ -го виду з  $i$ -у поля на  $k$ -й пункт зберігання;

$j$  – вид сільськогосподарського збіжжя,  $j = 1, \dots, J$ ;

$k$  – пункт зберігання  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя,  $k = 1, \dots, K$ ;

$i$  – поле збирання  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя,  $i = 1, \dots, I$ ;

$r$  – варіанти кампанії  $i$ -го поля збирання  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя,  $r = 1, \dots, R$ ;

$c_{ij}$  – сумарні затрати або валова собівартість варіанту кампанії  $i$ -го поля збирання  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя;

$z_{ij}$  – інтенсивність застосування варіанту кампанії  $i$ -го поля збирання  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя,  $z_{ij} \in \{0; 1\}$ . Якщо в рішенні отримаємо  $z_{ij} = 1$ , тоді варіант входить в оптимальний план, а  $z_{ij} = 0$  означає, що не входить. За цим по кожному полю може бути задіяно не більше одного варіанту;

$Q_{ijr}$  – незібраний обсяг  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля збирання за  $r$ -им варіантом кампанії;

$\delta_{ijr}$  – втрати обсягу  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля за  $r$ -им варіантом кампанії;

$c_{ijr}$  – вартість одиниці обсягу  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля за  $r$ -им варіантом кампанії;

$d$  – кількість днів збільшення за агротерміни збирання в  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля за  $r$ -им варіантом кампанії;

$t_{ijrk}$  – затрати на перевезення одиниці обсягу  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля за  $r$ -им варіантом кампанії до  $k$ -го пункту зберігання;

$x_{ijrk}$  – об'єм перевезення обсягу  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля за  $r$ -им варіантом кампанії до  $k$ -го пункту зберігання;

$a_{ijr}$  – обсяг виробництва  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля за  $r$ -им варіантом кампанії;

$b_{ijrk}$  – сумарна потреба перевезення одиниці обсягу  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля за  $r$ -им варіантом кампанії до  $k$ -го пункту зберігання.

Пара  $\langle z, x \rangle$  характеризує лише тоді виробничо-транспортний план, якщо  $z$  задовольняє умовам виразів (1), (2), (3), (4) і (5). При цьому  $z$  описує компоненту виробничого плану, а  $x$  – транспортного плану. Доданки цільової функції (2) представимо у виді таких рівнянь, що відображають відповідно виробничі та транспортні витрати з реалізації плану  $\langle z, x \rangle$ :



$$f_2(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K t_{ijk} x_{ijk} \quad (6)$$

$$f_1(z) = \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \left( c_{ij} z_{ij} + \sum_{j=1}^J Q_{ijr} \delta_{ijr} c_{ij} \right) \quad (7)$$

Виробничо-транспортний план  $\langle z, x \rangle$  вважаємо допустимим, якщо він задовольняє умовам виразів (2)–(5), і оптимальним, якщо, крім того, доставляє мінімум функції (1).

Вирішення виразів (1)–(5) є рішенням задачі часткового цілочисельного лінійного програмування і характеризується низкою специфічних особливостей, зокрема:

- кожна змінна виду  $x_{ijk}$  входить лише у два обмеження, при чому в одне з обмежень з коефіцієнтом +1, а в інше – з коефіцієнтом –1;
- сукупність змінних  $x_{ijk}$  розпадається на кілька груп за кількістю вироблених  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя;
- цілочисельні змінні можуть набувати лише два значення – 0 або 1;
- множина цілочисельних змінних розбита на групи, що не перетинаються за кількістю  $k$ -х пунктів зберігання, у кожній з яких лише одна змінна може бути відмінна від нуля.

Для вирішення цієї моделі розіб'ємо вихідну модель на дві складові: виробничу та транспортну. При цьому як навантаження (кінцева потреба) будемо розглядати сумарний попит по кожному  $i$ -у полю.

Отже, виробничу модель можна записати так:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ij} \geq \sum_{k=1}^K b_{ijk}; j = 1, \dots, J; \quad (8)$$

$$\sum_{r=1}^R z_{ij} \leq 1, i = 1, \dots, I; \quad (9)$$

$$z_{ij} = 0, z_{ij} = 1; i = 1, \dots, I; r = 1, \dots, R; \quad (10)$$

$$f_1(z) = \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left( c_{ij} z_{ij} + \sum_{j=1}^J Q_{ijr} \delta_{ijr} c_{ij} \right) \rightarrow \min. \quad (11)$$

Якщо рішення даної моделі існує, інакше і вихідна виробничо-транспортна модель не має рішення, то можна сформулювати  $I$  (за кількістю полів) транспортних завдань, де як обсяги поставок використовувати ті обсяги збирання, які зібрані у виробничій моделі представленій вище.

Приймаємо, що  $z^0 = \{z_{ir}^0\}$  – оптимальний план виробничої моделі:

$$\sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ir}^0 = A_{ij0}, j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, I; \quad (12)$$

де  $A_{ij0}$  – обсяг виробництва  $j$ -го сільськогосподарського збіжжя з  $i$ -го поля за  $r$ -им варіантом кампанії до  $k$ -го пункту зберігання, і можна сформулювати  $I$  транспортних задач виду:

$$\sum_{k=1}^K x_{ijk} \leq A_{ij0}; i = 1, \dots, I; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijrk} \geq b_{ijrk}; k = 1, \dots, K; \quad (14)$$

$$f_{2j0}(z_0) = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K f_{ijrk} x_{ijrk} \rightarrow \min. \quad (15)$$

Сумарні виробничі та транспортні витрати на цьому кроці після вирішення серії транспортних завдань становитимуть:

$$F = f_1(z_0) + \sum_{j=1}^J f_{2j0}(z_0) \quad (16)$$

Алгоритм передбачає побудову послідовності таких виробничих планів, котрим сума виробничих і транспортних витрат мінімальна. Оскільки отриманий на першому кроці виробничий план є найкращим з позиції витрат на виробництво продукції, поліпшення цієї суми можна досягти лише гірший виробничий план, але при цьому отримуючи велику економію на транспортних витратах.

Розглянуті нижче способи виключення неперспективних, які не призводять до суттєвої економії транспортних витрат, виробничих планів засновані на використанні подвійно допустимих систем потенціалів транспортних завдань. З їхньою допомогою формуються додаткові лінійні обмеження. Якщо виробничий план не задовольняє якомусь із таких обмежень, він свідомо є неперспективним і може бути виключений, тобто відповідні транспортні задачі не вирішуються. Приймаємо:  $F$  – сумарні виробничі та транспортні витрати на цьому поточному кроці, після вирішення серії транспортних задач;  $u_{ij}$  – подвійна змінна транспортної задачі, яка відповідає обмеженням виразу (17) на цьому ж кроці;  $v_{jk}$  – подвійна перемінна транспортної задачі, яка відповідає обмеженням виразу (18) на цьому ж кроці.

Запишемо сумарне значення витрат, використовуючи подвійне подання функціоналів транспортних задач:

$$F = \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R c_{ij} z_{ij} + \left( \sum_{j=1}^J \left( \sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} - \sum_{i=1}^I a_{ijr} u_{ij} \right) \right) \quad (17)$$

Введемо таке обмеження для пошуку перспективного виробничого плану:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R c_{ij} z_{ij} + \left( \sum_{j=1}^J \left( \sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} - \sum_{i=1}^I a_{ijr} z_{ij} u_{ij} \right) \right) \quad (18)$$

приведені подібні та перенісши незалежні від вибору виробничого плану складові в праву частину співвідношення:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R c_{ij} z_{ij} - \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ij} u_{ij} < F + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} \quad (19)$$

або

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left( c_{ij} - \sum_{j=1}^J a_{ijr} u_{ij} \right) z_{ij} < F + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} \quad (20)$$

Варто відзначити, що величина:

$$\left( \sum_{j=1}^J \left( \sum_{k=1}^K b_{ijrk} v_{jk} - \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R a_{ijr} z_{ij} u_{ij} \right) \right) \quad (21)$$

є оцінкою транспортних витрат знизу для транспортного плану  $x(z)$ , якщо останній існує. Це є наслідком того, що допустимість, але не оптимальність, рішень двоїстих транспортних задач:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left( c_{ij} - \sum_{j=1}^J a_{ijr} u_{ij} \right) \leq z_{ij} F + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K b_{jrk} v_{jk} - \varepsilon \quad (22)$$

не залежить від вибору виробничого плану.

Відзначимо, що напрямок до оптимального виробничо-транспортного плану здійснюється за багатьма виробничими планами, для яких вирішуються транспортні задачі. Системи потенціалів, одержувані внаслідок розв'язання транспортних завдань, служать для побудови додаткових лінійних обмежень, що використовуються для відсівання неперспективних виробничих планів.

Таким чином, вирішення даної моделі дозволяє отримати:

- обсяги збирання збіжжя, тобто які поля необхідно почати прибирати в першу чергу і з якої площі;
- закріплення полів за тимчасовими пунктами зберігання дозволяє визначити обсяги зерна, які необхідно перевезти з кожного поля на потрібні тимчасові пункти зберігання;
- маршрути перевезень із мінімальними витратами;
- економічну оцінку виконаної роботи, тобто витрати на перевезення та збирання з урахуванням втрат зерна за кожним варіантом кампанії збирання, також можна отримати загальний результат оптимізації .

#### Висновки.

1. Для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище автотранспортних засобів пропонується використовувати схему двох стадій для транспортування збіжжя, які поєднуються зі споживачем через тимчасовий пункт зберігання, яка використовує невелику площу. Крім того, ця схема перевезення дозволяє підвищити ефективність автотранспортних засобів, а саме: раціонально використовувати транспортні засоби різної вантажопідйомності, використовувати поточну інфраструктуру сільськогосподарських виробників .

2. Розроблена математична модель визначення обсягів транспортування обмолоченого зерна від комбайнів до пункту тимчасового зберігання з урахуванням втрат зерна при збиранні врожаю після оптимальних агротермінів розглядає операції збирання та транспортування зерна як єдиний неподільний процес і дозволяє, завдяки раціональному розподілу транспортних потоків зібраного зерна, зменшити втрати зерна при збиранні врожаю за обмеження оптимальних агротермінів.

3. Використання цілочисельної виробничо-транспортної моделі забезпечує максимальну адаптацію розробленої моделі до реальних умов поставленого завдання, оскільки в розрахунках обсяг перевезень характеризується продуктивністю зернозбиральних комбайнів, що потім враховується для визначення раціональної кількості автотранспортних засобів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Tihanov G. Effect of transport vehicles on the grain harvester idle time during harvesting. *Agricultural Science and Technology*. 2021. Vol. 13, No 2, pp. 163–166. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.02.027>.

2. Saparbayev A., Makulova A., Bayboltaeva N., Sarsenbieva N. & Imatayeva A. Modeling grain transportation in the system of grain processing industries. *SHS Web of Conferences*. 2021. Vol. 107. P. 06003. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110706003>.
3. Dubbini M., Pezzuolo A., De Giglio M., Gattelli M., Curzio L. & Covi D. Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. *CIGR Journal*. 2017. Vol. 19. P. 158–163.
4. Brown R., Richards A. Engineering principles of agricultural machinery. *ASABE*. 2018. Vol. 84 (2). P. 1120–1132.
5. Šotnar M., Pospíšil J., Mareček J., Dokukilová T. & Novotný V. Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018. Vol. 3. P. 105–108. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>.
6. Jain A., Palekar U. Aggregate production planning for a continuous reconfigurable manufacturing process. *Computers & Operations Research*. 2005. Vol. 32 (5). P. 1213–1236. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2003.11.001>.
7. Almosawi A., ALkhafaji A. & Alqazzaz K. Vibration transmission by combine harvester to the driver at different operative conditions during paddy harvest. *International Journal of Science and Nature*. 2016. Vol. 7(1). P. 127–133.
8. Samà M., Pellegrini P., D'Ariano A., Rodriguez J. & Pacciarelli D. On the tactical and operational vehicle routing selection problem. *Transportation Research*. 2017. Vol. 76 (1). P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.010>.
9. Kuzmich I.M., Rogovskii I.L., Titova L.L. & Nadtochiy O.V. Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. P. 052002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>.
10. Matindi R., Masoud M., Hobson P., Kent G. & Liu S. Harvesting and transport operations to optimise biomass supply chain and industrial biorefinery processes. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2018. Vol. 9 (3). P. 265–288. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.9.001>.
11. Yezekyan T., Marinello F., Armentano G., Trestini S. & Sartori L. Modelling of harvesting machines' technical parameters and prices. *Agriculture*. 2020. Vol. 10. P. 194–203. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060194>.
12. Воронков О. А., Роговський І. Л. Модель технологічної системи перевезення збіжжя збирально-транспортного комплексу агрохолдингу. *Розвиток транспорту*. Одеса. 2022. № 2(13) С. 42–52. <https://doi.org/10.33082/td.2022.2-13.04>
13. Воронков О. А., Роговський І. Л. Аналітичні положення ефективності роботи збирально-транспортного комплексу зернового збіжжя. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Вип. 1 (51). С. 74–83. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-074-083>.

14. Воронков О. А., Роговський І. Л. Інженерний менеджмент моніторингу потоків транспортних засобів при збиранні збіжжя. *Автошляховик України*. 2023. № 3. С. 42–49. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-3-275-42-49>.
15. Rogovskii I.L. Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics*. 2019. Vol. 10 (4). P. 145–150. <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.04.145>.
16. Zagurskiy O. M., Pokusa Z. S., Pokusa F., Titova L. & Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2020; ISBN 978-83-66567-13-9. P. 162.

#### REFERENCES

1. Tihanov, G. (2021). Effect of transport vehicles on the grain harvester idle time during harvesting. *Agricultural Science and Technology*. 13(2): 163–166. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.02.027>.
2. Saparbayev, A., Makulova, A., Bayboltaeva, N., Sarsenbieva, N. & Imatayeva, A. (2021). Modeling grain transportation in the system of grain processing industries. *SHS Web of Conferences*. 107: 06003. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110706003>.
3. Dubbini, M., Pezzuolo, A., De Giglio, M., Gattelli, M., Curzio, L. & Covi, D. (2017). Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. *CIGR Journal*. 19: 158–163.
4. Brown, R., Richards, A. (2018). Engineering principles of agricultural machinery. *ASABE*. 84 (2): 1120–1132.
5. Šotnar, M., Pospíšil, J., Mareček, J., Dokukilová, T. & Novotný, V. (2018). Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses. *Acta Technologica Agriculturae*. 3: 105–108. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>.
6. Jain, A., Palekar, U. (2005). Aggregate production planning for a continuous reconfigurable manufacturing process. *Computers & Operations Research*. 32 (5): 1213–1236. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2003.11.001>.
7. Almosawi, A., Alkhafaji, A. & Alqazzaz, K. (2016). Vibration transmission by combine harvester to the driver at different operative conditions during paddy harvest. *International Journal of Science and Nature*. 7 (1): 127–133.
8. Samà, M., Pellegrini, P., D'Ariano, A., Rodriguez, J. & Pacciarelli, D. (2017). On the tactical and operational vehicle routing selection problem. *Transportation Research*. 76 (1): 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.010>.
9. Kuzmich, I.M., Rogovskii, I.L., Titova, L.L. & Nadtochiy, O.V. (2021). Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 677: 052002. Retrieved from: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>.



10. Matindi, R., Masoud, M., Hobson, P., Kent, G. & Liu, S. (2018). Harvesting and transport operations to optimise biomass supply chain and industrial biorefinery processes. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 9 (3): 265–288. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.9.001>.
11. Yezekyan, T., Marinello, F., Armentano, G., Trestini, S. & Sartori, L. (2020). Modelling of harvesting machines' technical parameters and prices. *Agriculture*. 10: 194–203. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060194>.
12. Voronkov, O.A. & Rogovskyi, I.L. (2022). Model of the technological system of grain transportation of grain harvesting and transport complex of agricultural holding. *Transport Development*. 2(13): 42–52. <https://doi.org/10.33082/td.2022.2-13.04>
13. Voronkov, O.A. & Rogovskyi, I.L. (2022). Analytical provisions of the efficiency of the grain grain harvesting and transport complex. *Bulletin of the National Transport University. Series: technical sciences*. 1(51): 74–83. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-074-083>.
14. Voronkov, O.A. & Rogovskyi, I.L. (2023). Engineering management of monitoring vehicle flows during grain harvesting. *Road Worker of Ukraine*. 3: 42–49. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-3-275-42-49>.
15. Rogovskii, I.L. (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics*. 10(4): 145–150. <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.04.145>.
16. Zagurskiy, O.M., Pokusa, Z.S., Pokusa, F., Titova, L. & Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. *Monograph*. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 162. ISBN 978-83-66567-13-9.