



<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-02-036>

DOI: 10.30890/2567-5273.2025-41-02-036

УДК 656.073.2:658.7.012.47

OPTIMIZATION OF BULK CARGO TRANSPORTATION TAKING INTO ACCOUNT LEGAL REGULATION AND REGULATORY COSTS

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НАЛИВНИХ ВАНТАЖІВ З УРАХУВАННЯМ ПРАВОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА РЕГУЛЯТОРНИХ ВИТРАТ

Prodashchuk S.M. / Продашук С.М.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-7673-3863

Kim K. V. / Кім К.В.

c.psych.s., as.prof. / к.псих.н., доц.

ORCID: 0000-0002-5231-2554

Bohomazova H.Ye. / Богомазова Г.Є.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-8042-0624

Kovalov A.O. / Ковальов А.О.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-8546-3183

Ukrainian State University of Railway Transport,

Kharkiv, Feuerbach Square 7, 61050

*Український державний університет залізничного транспорту,
м. Харків, м-н Фейєрбаха, 7, 61050*

Анотація. У статті запропоновано математичну модель визначення оптимальної технології перевезення наливних вантажів у пакувальній тарі (флексітанки, бочки, ІВС-контейнери). Модель враховує повні витрати на доставку вантажів від відправника до одержувача з урахуванням логістичних, часових, ризикових, інфраструктурних, метеорологічних та людських факторів. Розроблено формалізовану цільову функцію мінімізації витрат залежно від обсягу перевезення, типу тари та параметрів логістичної системи. За результатами моделювання визначено важливість сезонних, регуляторних та екологічних витрат. Зазначено, що оптимальність технології залежить не лише від обсягу перевезень. На вибір оптимальної технології впливають такі фактори, як: обсяг вантажу, доступність тари, інфраструктурні обмеження, вартість транспортування, наявність зворотної логістики, ризику пошкодження тари та регуляторні витрати.

Ключові слова. Наливні вантажі, флексітанк, ІВС-контейнер, бочка, повні витрати, оптимізація, математична модель, логістика, перевезення.

Вступ.

Перевезення наливних вантажів, особливо небезпечних речовин, набуває особливої актуальності в сучасних умовах, що зумовлено зростаючим попитом на паливно-енергетичні ресурси, хімічну продукцію та нафтопродукти. Незбережене перевезення таких вантажів становить суттєву загрозу для довкілля, здоров'я і життя людей. Це, у свою чергу, потребує впровадження



спеціалізованих технологій, оновлення інфраструктури та використання сучасних засобів, які гарантують безпечно й ефективно транспортування. Одночасно необхідно мінімізувати екологічне навантаження, підвищити рівень безпеки персоналу та запобігти виникненню аварійних ситуацій.

У зв'язку з цим дотримання правових вимог є критично важливим елементом логістичного процесу. В Україні регулювання перевезень наливних вантажів залізничним транспортом здійснюється на основі як національних нормативно-правових актів, так і міжнародних угод. Зокрема, ключовими документами виступають Правила перевезення небезпечних вантажів (ППНВ), Правила перевезення наливних вантажів, Угода про міжнародне залізничне вантажне сполучення (УМВС), Угода про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ), Регламент міжнародних залізничних перевезень небезпечних вантажів (RID) та Конвенція про міжнародні залізничні перевезення COTIF. Також враховуються вимоги Законів України («Про транспорт», «Про перевезення небезпечних вантажів»), постанов Кабінету Міністрів України та наказів відповідних міністерств.

Огляд останніх досліджень. Перевезення наливних вантажів займає важливе місце в системі сучасних логістичних процесів, забезпечуючи стабільне функціонування паливно-енергетичного, хімічного та аграрного секторів. При зростаючих вимогах до безпеки, ефективності та екологічної стійкості логістичних рішень, питання оптимізації таких перевезень є предметом активних наукових досліджень, як в Україні, так і на міжнародному рівні.

У [1] представлено огляд застосування математичного моделювання в логістиці. Автори визначають основні напрями використання моделей: моніторинг, прогнозування та оптимізацію логістичних процесів. Водночас у роботі не висвітлено специфіку перевезень саме наливних рідких вантажів, не розглядаються питання інтеграції моделей з розрахунками повних витрат для різних типів тари. Дослідження [2] пропонує динамічну модель для оцінювання ризиків у перевезеннях, однак не містить порівняння ефективності використання різних типів тари (флексітанки, ІВС-контейнери, бочки). У роботі [3] Розкрита



проблема математичного моделювання в логістиці. Розглянуто відкритий доступ до даних, інтеграція, довгострокове використання. У [4] розглянуто математичну модель оптимізації завантаження небезпечних вантажів, проте не деталізовано розрахунки витрат залежно від параметрів маршруту та характеристик рідких вантажів. В [5] визначено ключові фактори, що впливають на логістику рідких вантажів у портовій інфраструктурі: наявність терміналів, регуляторні вимоги, динаміка енергетичних ринків. Однак модель витрат з урахуванням обсягу перевезення та технологій пакування не запропонована. У [6] представлено огляд методів прийняття рішень у сфері сталого транспорту (MCDM) із застосуванням PRISMA-огляду. Визначено ефективність SAISA та SALSA у виборі критеріїв для логістичних рішень. У [7] запропоновано модель оцінки ефективності мультимодальних перевезень із використанням генетичних алгоритмів. Оптимізація спрямована на зменшення витрат, часу доставки та викидів CO₂ на прикладі внутрішньої логістики у Гані. Однак не розглянуто типи тари, регуляторні, кліматичні або сезонні обмеження. Дослідження [8] висвітлює сучасні підходи до оптимізації технології перевезень вантажів з акцентом на маршрутизацію та скорочення викидів.

На сьогоднішній день у науковій літературі відсутні науково обґрунтовані моделі з перевезенням рідких наливних вантажів у флексітанках, ІВС-контейнерах або бочках, що спеціально адаптовані до особливостей транспортування в такій тарі. Також відсутнє комплексне моделювання технології перевезень наливних вантажів, яке враховувало б обсяг перевезення, відстань транспортування, параметрів доступу до транспортної інфраструктури, сезонні ризики та регуляторні витрати.

Тому виникає потреба у розробці нових науково обґрунтованих технологічних рішень, які дозволять створити адаптовану математичну модель визначення оптимальної технології перевезення рідких наливних вантажів у різних типах пакувальної тари з урахуванням впливу обсягу, відстані, кліматичних умов, доступу до інфраструктури, людського фактора та регуляторних обмежень.



Постановка проблеми.

Вибір раціональної технології перевезення наливних вантажів залишається ключовим завданням транспортної логістики. Основна проблема полягає в необхідності гармонійного поєднання таких критеріїв, як технічна надійність, екологічна безпека, ефективне використання тари й рухомого складу, а також економічна обґрунтованість. Застосування виключно традиційних логістичних підходів, що ґрунтуються на прямому аналізі витрат, уже не задовольняє вимог сучасної практики. Тому постає потреба у створенні комплексної математичної моделі, яка дозволила б врахувати всі релевантні чинники та приймати ефективні управлінські рішення щодо організації перевезень.

Виклад основного матеріалу.

Математична модель визначення оптимальної технології перевезення передбачає порівняння сукупних витрат для кожного з альтернативних варіантів доставки наливних вантажів (залізничні цистерни, контейнери-цистерни, флекситанки, бочки, ІВС-контейнери тощо). У традиційному підході до таких витрат відносять: витрати на операції навантаження та вивантаження; транспортні витрати (залізничні тарифи, автотранспортні перевезення); витрати, пов'язані з простоем рухомого складу; експлуатаційні витрати на тару (включаючи амортизацію, ремонт та очищення); витрати на зберігання вантажу.

Удосконалена модель враховує додаткові фактори, що відповідають сучасним вимогам логістики. Зокрема, враховуються: витрати, пов'язані з ризиками транспортування (ймовірність витоків, аварій, пошкодження вантажу, витрати на страхування); екологічні витрати, зокрема витрати на екологічний супровід, дотримання вимог екостандартів та мінімізацію впливу на довкілля; витрати на сертифікацію продукції та підготовку супровідної документації; витрати на організацію зворотної логістики тари (очищення, повернення в разі багаторазового використання або утилізація); витрати, пов'язані з людським чинником (заробітна плата, ризик затримок через персонал); митні витрати (часові та фінансові) у випадку міжнародних перевезень. Також до моделі введено коефіцієнт доступності інфраструктури (значення від 0 до 1), який



дозволяє враховувати технічну оснащеність маршрутів та станцій – наявність спеціалізованого обладнання, під'їзних колій, пунктів підігріву, пунктів очищення тари.

Комплексне дотримання регуляторних норм включає низку витрат, тому важливе значення в удосконаленій моделі займають витрати на дотримання регуляторних норм, які враховують зобов'язання перевізника перед державними та міжнародними нормами, серед яких: витрати на проходження обов'язкових державних перевірок і контролю якості; витрати на оновлення технічної документації відповідно до чинних стандартів; оплата ліцензій, дозволів та зборів, передбачених національним або міжнародним законодавством, витрати на приведення тари та транспортних засобів у відповідність до вимог безпеки перевезення небезпечних вантажів згідно з ДОПНВ (ADR), ППНВ, міжнародних залізничних угод (COTIF) тощо; витрати на навчання та сертифікацію персоналу згідно з чинними нормами транспортування спеціальних вантажів.

Дані витрати є обов'язковими і суттєво впливають на вибір технології перевезення, особливо при транспортуванні небезпечних вантажів. Це витрати, без урахування яких жодна технологія перевезення не може бути визнана легальною чи безпечною. Такий підхід дозволяє здійснити повну порівняльну оцінку варіантів перевезення з урахуванням реальних умов експлуатації та нормативно-правових вимог.

Таким чином, безпечне перевезення наливних вантажів вимагає не лише технічного забезпечення, але й постійного дотримання регуляторних норм, що формує додаткове економічне навантаження на учасників логістичного процесу.

Цільова функція моделі визначення оптимальної технології перевезення наливних вантажів в пакувальній тарі приймає вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} E(Q, L) \rightarrow E_{min}, \\ 0 \leq Q \leq Q_{max} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\begin{array}{l} \text{при обмеженнях} \\ t_x \geq 0, N \geq 0, \\ L \geq 0, T \geq 0. \end{array} \quad (2)$$



де Q – обсяг перевезення наливного вантажу, т або л/кг;

E та E_{\min} – витрати на перевезення наливних вантажів у пакувальній тарі загальні та мінімальні відповідно, грн;

Q_{\max} – максимальний обсяг перевезення наливного вантажу, який може бути перевезений за один рейс, т;

L – відстань перевезення, км;

T – час перевезення, год;

t_x – середній час затримки, год;

N – кількість персоналу.

У загальному вигляді витрати на перевезення наливних вантажів у пакувальній тарі можна представити у вигляді

$$E = C_{\text{osn}} + C_{\text{risk}} + C_{\text{ret}} + C_{\text{tar}} + C_{\text{inf}} + C_{\text{cl}} + C_{\text{pers}} + C_s + C_{\text{reg}}, \quad (3)$$

де C_{osn} – основні витрати на перевезення (паливо, амортизація, зарплата, інші прямі витрати), грн.

$$C_{\text{osn}} = C_{\text{tr}} + C_{\text{rob}} + C_{\text{vr}} + C_{\text{man}} + C_{\text{ob}}, \quad (4)$$

де C_{tr} – витрати на транспортні послуги (паливо, амортизація, плата за оренду транспортних засобів, експлуатаційні витрати), грн;

C_{rob} – витрати на робочу силу (зарплата водіїв, експедиторів, вантажників, податки і збори на фонд оплати праці), грн;

C_{vr} – витрати на навантажувально-розвантажувальні роботи на станціях, портах, терміналах (оплата праці вантажників, оренда техніки), грн;

C_{man} – витрати на маневрові роботи (вартість подачі/забирання вагонів, оплата роботи маневрового локомотива та локомотивної бригади, вартість простоїв при маневруванні), грн;

C_{ob} – витрати на техобслуговування рухомого складу, грн;

C_{risk} – витрати, пов'язані з ризиком втрати/пошкодження вантажу, грн;

$$C_{\text{risk}} = (P_{\text{tar}} + P_{\text{krip}} + P_{\text{ush}}) \cdot Q \cdot C_v, \quad (5)$$

де P_{tar} – ймовірність пошкодження тари;

P_{krip} – ймовірність нестабільного кріплення;

P_{ush} – ймовірність недосконалого ущільнення;



Q – обсяг вантажу, т;

C_v – вартість одиниці вантажу, грн;

Нормувальна умова $P_{tar} + P_{krip} + P_{ush} \leq 1$.

Деякі види тари (ІВС-контейнери, бочки) можуть використовуватись повторно, тому витрати на зворотну логістику тари C_{ret} , грн, можна визначити

$$C_{ret} = N_t \cdot u \cdot (C_{tr}^t + C_{obr} - C_{tar}^n), \quad (6)$$

де N_t – кількість тари, що повертається, шт;

u – коефіцієнт повторного використання тари (від 0 до 1), де 1 – тара використовується багаторазово без втрат. Якщо тара повністю повторно використовується ($u = 1$) – вартість повернення включає лише обслуговування. Якщо тара одноразова ($u = 0$) – повна вартість закладається у витрати;

C_{tr}^t – витрати на транспортування тари, що повертається, грн;

C_{obr} – витрати на обробку тари (очищення, дезінфекція), грн;

C_{tar}^n – вартість купівлі нової тари, грн;

C_{tar} – додаткові витрати через нестачу тари (дефіцит або пошкодження), грн:

$$C_{tar} = N_n \cdot (C_{alt} - C_t) + C_o^{rer}, \quad (7)$$

де N_n – кількість відсутніх або непридатних одиниць тари, шт;

C_{alt} – вартість альтернативної (орендованої або закупленої терміново) тари, грн/од.;

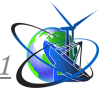
C_t – планова вартість штатної тари, грн/од.;

C_o^{rer} – втрати (штрафи, простой, зниження продуктивності) через затримку або простій через відсутність тари, грн.

Формула враховує як різницю у вартості між запланованою й фактично використаною тарою, так і затрати на затримку внаслідок її відсутності. Якщо немає затримок, то $C_o^{rer} = 0$, і враховується лише перевитрата на тару.

Використання цифрових систем (TMS, GPS, е-документообіг) знижують операційні витрати, скорочують час перевезення, зменшують людські помилки.

Витрати на використання інфраструктури C_{inf} (плата за користування коліями, терміналами, пунктами зливу/наливу; оренда спеціальних майданчиків та обладнання, TMS, GPS, е-документи), грн, можемо визначити за допомогою



наступної формули

$$C_{inf} = (C_{kor} - (\Delta C_{oper} + \Delta C_{time} + \Delta C_{pers}) I_{in}) / K_d, \quad (8)$$

де C_{kor} – плата за користування коліями, терміналами, пунктами зливу/наливу, оренда спеціальних майданчиків та обладнання, грн;

ΔC_{oper} – зниження операційних витрат (наприклад, завдяки автоматизації, оптимізації маршрутів тощо), грн;

ΔC_{time} – економія від скорочення часу на перевезення (наприклад, зменшення витрат на оренду транспорту, паливо, зарплату водіїв), грн;

ΔC_{pers} – уникнення втрати через зменшення кількості людських помилок (штрафи, перевитрати, повернення, тощо), грн.

I_{in} – рівень цифрової інфраструктури, показник впровадженості ІТ-технологій у логістиці: наявність GPS-трекінгу, електронного документообігу, диспетчеризації (0...1) (0 – немає автоматизації, 1 – повна цифровізація). Таким чином, чим ефективніше управління, менше затримок і витрат, тим вищий I_{in} і більше економія – і тим менший загальний рівень логістичних витрат.

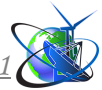
K_d – коефіцієнт доступності інфраструктури ($0 \leq K_d \leq 1$), що відображає рівень готовності інфраструктури (обладнання, під'їзні колії, резервуари, пункт підігріву) на всьому маршруті. K_d враховує, наскільки технічно можливо реалізувати обрану технологію перевезення на маршруті. Наприклад, якщо відсутнє обладнання для підігріву на проміжних станціях, ефективність знижується, а витрати зростають. Він дозволяє враховувати інфраструктурні обмеження як фактор, що непрямо збільшує повні витрати.

Витрати від впливу кліматичних і температурних факторів на перевезення C_{cl} , грн, залежать від

$$C_{cl} = (1 + K_{cl}) \cdot C_{osn} \cdot R_{risk} + C_{temp}, \quad (9)$$

де K_{cl} – індекс кліматичних факторів (0...1), що відображає рівень погодного ризику (чим ближче до 1 – тим сильніший вплив). Якщо кліматичний фактор впливає на час перевезення або інші змінні витрати, то при $K=0$ немає додаткових витрат, при $K=0,2$ витрати збільшуються на 20% і т.д.

R_{risk} – імовірність виникнення погодного інциденту (від 0 до 1);



C_{temp} – очікувані втрати від температурного впливу, грн.

$$C_{temp} = C_{spol} + C_{prom} + C_{herm}, \quad (10)$$

де C_{spol} – втрати від псування вантажу, грн;

C_{prom} – втрати від промерзання тари, грн;

C_{herm} – втрати через розгерметизацію, грн.

$$C_{spol} = Q \cdot \alpha_t \cdot C_{oth}, \quad (11)$$

де α_t – частка вантажу, що псується через температуру (коефіцієнт псування);

C_{oth} – вартість 1 т втраченої рідини, грн/т.

$$C_{prom} = N_{tara} \cdot C_{rem}, \quad (12)$$

де N_{tara} – кількість ушкоджених ємностей;

C_{rem} – середня вартість ремонту/заміни однієї тари, грн.

$$C_{herm} = Q_{vt} \cdot C_{oth} + C_{str} + C_{eco}, \quad (13)$$

де Q_{vt} – обсяг витоку, т;

C_{oth} – вартість втраченої рідини, грн/т;

C_{str} – штрафи, компенсації за витік, грн;

C_{eco} – витрати на ліквідацію наслідків (екологічні збитки, рекламації), грн.

Формула (9) враховує як зростання витрат через погодні умови, так і прямі збитки від температурного впливу. R_{risk} діє як ймовірнісний фактор: чим вища ймовірність погодного інциденту – тим більші додаткові витрати.

Витрати через людський та управлінський фактор C_{pers} , грн, будемо визначати:

$$C_{pers} = C_{hr} + C_{upr}, \quad (14)$$

де C_{hr} – витрати через неефективність персоналу.

$$C_{hr} = (1 - H) \cdot C_{osn}, \quad (15)$$

де H – коефіцієнт ефективності людського ресурсу, коефіцієнт ($0 < H \leq 1$). Враховує рівень кваліфікації персоналу (водії, експедитори, вантажники), їх здатність діяти у нестандартних ситуаціях, дотримання регламентів, продуктивність. Якщо $H = 1$, персонал працює ідеально, витрати мінімальні – $C_{hr} = 0$. Якщо H менше 1 – ефективність нижча, витрати зростають. Наприклад, якщо $H = 0.8$, витрати зростають на 20% через помилки, порушення регламентів та



інше;

C_{upr} – витрати через неефективне управління, грн

$$C_{upr} = (P_{nav} + P_{pers} + P_{upr}) \cdot t_{pr} \cdot C_{pr}, \quad (16)$$

де P_{nav} – імовірність затримки при навантаженні;

P_{pers} – затримка через людський фактор;

P_{upr} – затримка через помилки в керуванні (диспетчеризація, планування, TMS);

t_{pr} – очікувана тривалість простою, год;

C_{pr} – вартість простою (грн/год).

Витрати на супутні послуги C_s , грн:

$$C_s = C_{str} + C_{exp} + C_{mut} + C_{sert} + C_{lic} + C_{san}, \quad (17)$$

де C_{str} – вартість страхування вантажу, грн;

C_{exp} – оплата послуг експедитора/перевізника, грн;

C_{mut} – витрати на митне оформлення (при експорті/імпорті), грн;

C_{sert} – сертифікація тари або продукції (одноразово або на партію), грн;

C_{lic} – витрати на отримання ліцензій, дозволів і страховок, грн;

C_{san} – витрати на санітарно-гігієнічні та екологічні вимоги, грн

Витрати, пов'язані з дотриманням регуляторних норм C_{reg} , грн:

$$C_{reg} = C_{na} + C_{st} + C_{pp} + C_{ins}, \quad (18)$$

де C_{na} – витрати на дотримання національних актів (ЗУ, постанов КМУ тощо).

Це витрати, що виникають у процесі приведення діяльності у відповідність до вимог: Законів України (наприклад, «Про транспорт», «Про автомобільний транспорт», «Про залізничний транспорт», «Про охорону праці», тощо); Постанов Кабінету Міністрів України, які регламентують порядок здійснення перевезень, порядок ліцензування, охорони праці, екології, поводження з небезпечними вантажами; Інших нормативно-правових актів, які встановлюють правові умови функціонування логістичних/транспортних процесів.

$$C_{na} = \Sigma (K_{act} \cdot T_{act} \cdot N_{op}), \quad (19)$$

де K_{act} – нормативна ставка витрат на забезпечення виконання акту (грн/операцію),



T_{act} – кількість операцій, на які поширюється дія акту;

N_{op} – кількість об'єктів/транзакцій (рейсів, вантажів, співробітників);

C_{st} – витрати на відповідність державним стандартам і технічним умовам. Це витрати на забезпечення відповідності матеріально-технічної бази, процесів і документації вимогам: ДСТУ, ISO та іншим нормативним документам, технічним умовам на використання тари, вантажів, устаткування, транспортних засобів.

$$C_{st} = \Sigma K_{st} \cdot Q_{tr}, \quad (20)$$

де K_{st} – витрати на одиницю відповідності стандарту, грн/од.;

Q_{tr} – кількість одиниць транспорту, тари, процесів, що стандартизуються.

Витрати на підготовку/перепідготовку персоналу відповідно до нормативів C_{pp} , що складаються з витрат на навчання персоналу щодо правил перевезення небезпечних вантажів, охорони праці, пожежної безпеки, електробезпеки, роботи з ТСД; сертифікацію/атестацію водіїв, машиністів, експедиторів, операторів тощо

$$C_{pp} = C_p \cdot N_{pers} + C_{pk} \cdot N_{pk}, \quad (21)$$

де C_p – вартість одноразового навчання одного працівника, грн;

C_{pk} – вартість регулярного підтвердження кваліфікації, грн;

N_{pers} – кількість персоналу;

N_{pk} – кількість періодичних курсів.

Витрати на інспекції, аудит, перевірки уповноважених органів C_{ins} складаються з витрат, які підприємство несе у зв'язку з підготовкою та проходженням планових і позапланових перевірок (ДСНС, Держпраці, Державної служби з безпеки на транспорті, екологічних служб); оплатою ліцензійних зборів, реєстраційних дій, обстежень, аудитів:

$$C_{ins} = C_{aud} \cdot N_{aud} + C_{serv} \cdot N_{serv}, \quad (22)$$

де C_{aud} – вартість підготовки та проведення аудиту, грн;

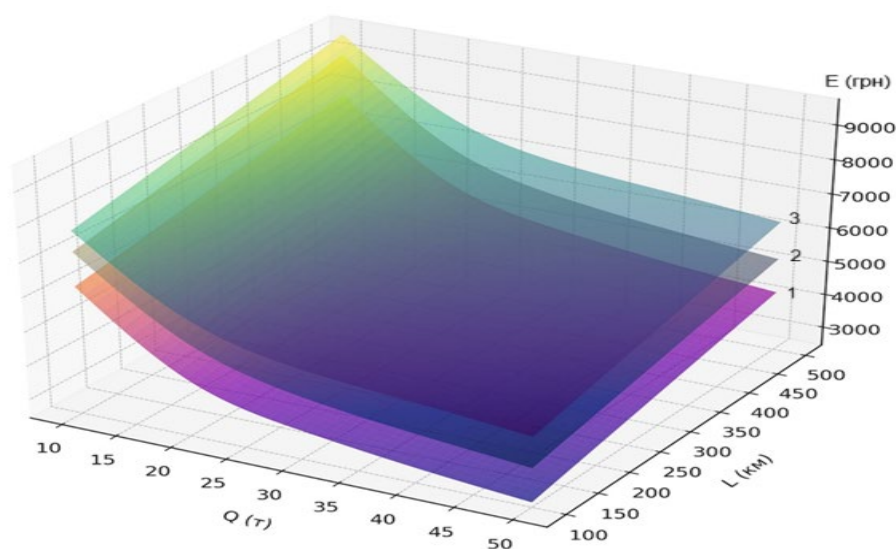
N_{aud} – кількість аудитів;

C_{serv} – інші супутні витрати на послуги й обстеження, грн;

N_{serv} – кількість сукупних послуг та обстежень.



Результати досліджень. Реалізація запропонованої моделі показала, що можливо визначити оптимальну технологію перевезення наливних вантажів при обсягах роботи, що постійно змінюються (рисунок 1).



1 – флексітанк; 2 – ІВС-контейнер; 3 - бочка

Рисунок 1 – Повні витрати для трьох типів тари

Авторська розробка

Для визначення витрат від перевезення наливного вантажу в пакувальній тарі при використанні різних засобів пакування за трьома основними типами тари (флексітанк, ІВС-контейнер, бочка) були використані показники різного обсягу перевезень від 5 до 50 тонн та варіативної дальності транспортування.

Результати розрахунку моделі визначення оптимальної технології перевезення наливних вантажів (нафтохімічна продукція, технічні рідини, харчові олії) в пакувальній тарі при використанні різних засобів пакування в залежності від обсягу вантажу та дальності перевезень показали, що найменші витрати на 1 приведеної тонни спостерігаються у флексітанків, однак тільки за умови внутрішніх перевезень, відсутності суворих регуляторних вимог та особливо у теплий період року. Витрати на зворотну логістику відсутні – тара одноразова. Однак вони чутливі до сезонних факторів – взимку потребують герметизації, підігріву, що збільшує експлуатаційні витрати та не підходять для



небезпечних вантажів, оскільки потребують додаткових витрат на сертифікацію, страхування і дотримання стандартів безпеки.

Бочки є універсальним і прийнятним варіантом для перевезень зі змінним вантажопотоком або нестабільною географією доставки: придатні при середніх відстанях, гнучкі до умов, не потребують спеціалізованої інфраструктури (ефективні навіть при $K_d \approx 0.6-0.7$). Перевагами такого способу перевезень є: простота обробки, широка поширеність тари, легкість завантаження. Недоліки: високі витрати на повернення тари (зворотна логістика); ризик механічних пошкоджень або втрат через неякісне кріплення, особливо на далеких маршрутах; у середньому мають помітні витрати на упаковку та додаткове транспортування тари.

ІВС-контейнери стають економічно обґрунтованими та доцільними лише за умов великих обсягів ($Q \geq 400$ т). Коефіцієнт доступності інфраструктури $K_d \geq 0.9$, що свідчить про наявність відповідного обладнання на всьому маршруті. Відсутність міжнародних кордонів, що дозволяє уникнути витрат на виконання стандартів та повторну сертифікацію. Недоцільні, якщо: виникає потреба в перевезенні в зимовий період (додаткові витрати на підігрів, утеплення), здійснюється міжнародне перевезення (зростання витрат на сертифікацію та відповідність регуляторним нормам), інфраструктура обмежена ($K_d \leq 0.6$), що унеможливорює використання спеціалізованої тари.

Висновок. Запропонована модель дозволяє комплексно оцінювати ефективність різних технологій перевезення наливних вантажів, враховуючи як економічні, так і нормативно-правові аспекти.

Результати моделювання перевезень наливних вантажів свідчать, що ігнорування сезонних, регуляторних та екологічних витрат призводить до штучного заниження вартості, особливо в моделі з ІВС-контейнерами. Без цих витрат перевезення у ІВС-контейнерах виглядали б привабливіше, на практиці вимагають значних додаткових фінансових вкладень на сертифікацію, страхування, утеплення й дотримання технічних умов. Отже, для обґрунтованого рішення важливо враховувати повний набір факторів.



Удосконалена математична модель перевезень наливних вантажів дозволяє формувати обґрунтовані рішення щодо вибору технології транспортування, враховуючи тип вантажу, сезонність, географічні особливості маршруту та наявність регуляторних бар'єрів. Застосування цієї моделі сприяє зниженню ризиків, уникненню прихованих втрат і підвищенню ефективності логістичних рішень як для транспортних операторів, так і для вантажовідправників. Крім того, модель дозволяє оптимізувати планування обігу тари, мінімізувати екологічне навантаження та забезпечити відповідність актуальним технічним та нормативним вимогам. У сучасних умовах безпеки, екології та правової відповідальності саме інтеграція логістики з правовим полем є основою сталої та ефективної транспортної системи.

Список літератури

1 Le Tho V., Fan Ruoling. Digital Twins for Logistics and Supply Chain Systems: Literature Review, Conceptual Framework, Research Potential, and Practical Challenges. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835223007921>

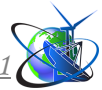
2 Ivanov D., Dolgui A. A Digital Supply Chain Twin for Managing the Disruption Risks and Resilience in the Era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*. 2020. Vol. 32. P. 775–788. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>

3 Digital Twins for Production and Logistics Systems. *Industry 4.0 Science*. URL: <https://industry-science.com/en/articles/digital-twins/>

4 Digital Twins in Logistics: Requirements, Application and Potentials. URL: https://www.researchgate.net/publication/372607650_Digital_Twins_in_Logistics_Requirements_Application_and_Potentials

5 Decision-making and logistics for energy-related liquid bulk within the port URL: <https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/241773432/DECISION-MAKING-AND-LOGISTICS-FOR-ENERGY-RELATED-LIQUID-BULK-WITHIN-THE-PORT.pdf>

6 Šikšnelytė Butkienė I., Štreimikienė D. Multi criteria decision making for



solving transport sustainability issues: an overview. *Transport*. 2024. Vol. 39, № 3. P. 264–286. URL: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/view/22915>

7 Okyere S., Yang J., Adams C. A. Optimizing the Sustainable Multimodal Freight Transport and Logistics System Based on the Genetic Algorithm. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, № 18. Article № 11577. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11577>

8 Javanpour S., et al. Sustainable Multi Modal Transportation and Routing focusing on Costs and Carbon Emissions Reduction. URL: https://www.researchgate.net/publication/388657635_Sustainable_Multi-Modal_Transportation_and_Routing_focusing_on_Costs_and_Carbon_Emissions_Reduction.

Abstract. *The article proposes a mathematical model for determining the optimal technology for transporting liquid bulk cargo in packaging (flexitanks, drums, IBC containers). The model takes into account the total costs of delivering goods from the sender to the recipient, considering logistical, temporal, risk-related, infrastructural, meteorological, and human factors. A formalized objective function has been developed to minimize costs depending on the transportation volume, type of packaging, and parameters of the logistics system. The modelling results highlight the importance of seasonal, regulatory, and environmental costs. It is noted that the optimality of the chosen technology depends not only on the transportation volume. Factors such as cargo volume, packaging availability, infrastructure constraints, transportation costs, reverse logistics, risk of package damage, and regulatory costs significantly influence the choice of the optimal transportation technology.*

Keywords: *Liquid bulk cargo, flexitank, IBC container, drum, total costs, optimization, mathematical model, logistics, transportation.*

Статтю надіслано: 19.10.2025 р.

© Богомазова Г.Є.