

С. О. СЕМЕНОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
ORCID: 0000-0002-5236-4557

А. О. ГАГАРИНА

магістрант
Приазовський державний технічний університет
ORCID: 0009-0000-9216-910X

АНАЛІЗ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ

Стаття присвячена огляду наукових досліджень, пов'язаних з транспортуванням небезпечних вантажів залізницями. Зазначено, що перевезення вантажів даного напрямку з використанням залізничного транспорту потрібно здійснювати з мінімальними ризиками, що можливо лише за умови дотримання встановлених вимог, і є одним з найважливіших видів транспортування. При цьому забезпечення безпеки при транспортуванні вантажів – це актуальне завдання у сучасному світі, оскільки це безпосередньо впливає на безпеку громадян, довкілля та економічний розвиток.

Огляд наукових праць даного напрямку досліджень показав наявність значної кількості напрацювань і результатів досліджень, що направлені на опис та вивчення особливостей процесів транспортування небезпечних вантажів. Встановлено, що фахівці не лише аналізують та класифікують різноманітні види небезпечних матеріалів, але і проводять детальні дослідження, що присвячені вибору методів та стратегій, які спрямовані на мінімізацію ризиків в процесі перевезень, формуванню аналітичних моделей та проектуванню мереж. Важливою є специфіка перевезення небезпечних вантажів залізницею, внаслідок чого галузь стикається зі значними викликами і проблемами, які вимагають додаткової уваги та ретельного дослідження. Проаналізовано ключові аспекти, які потрібно врахувати при вивченні цього напрямку.

Сучасні наукові дослідження дозволяють вивчити ефективність перевезень подібних вантажів, розробляти стратегії для зменшення ризиків та вдосконалювати інфраструктуру для забезпечення надійності та ефективності залізничних перевезень. Висвітлено основні виклики і проблеми, що стоять перед галуззю перевезення небезпечних вантажів, такі як ризик аварій, забруднення навколишнього середовища, необхідність спеціалізованих інфраструктурних рішень, роль персоналу, а також проблеми в управлінні та моніторингу цих перевезень.

Ключові слова: небезпечний вантаж, аналіз, перевезення, ризики, безпека, залізничний транспорт.

S. O. SEMENOV

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Logistics Management
and Traffic Safety
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
ORCID: 0000-0002-5236-4557

A. O. HAHARINA

Master
Pryazovsky State Technical University
ORCID: 0009-0000-9216-910X

ANALYSIS OF DANGEROUS GOODS TRANSPORTATION BY RAIL

The article is devoted to a review of scientific research related to the transportation of dangerous goods by rail. It is noted that the transportation of goods of this direction using railway transport should be carried out with minimal risks, which is possible only if the established requirements are met, and is one of the most important types of Transportation. At the same time, ensuring safety during cargo transportation is an urgent task in the modern world, since it directly affects the safety of citizens, the environment and economic development.

A review of scientific works in this area of research has shown the presence of a significant number of developments and research results aimed at describing and studying the features of dangerous goods transportation processes. It is established that specialists not only analyze and classify various types of hazardous materials, but also conduct detailed research on the choice of methods and strategies that are aimed at minimizing risks in the transportation process, forming

analytical models and designing networks. The specifics of transportation of dangerous goods by rail are important, as a result of which the industry faces significant challenges and problems that require additional attention and careful research. The key aspects that need to be taken into account when studying this area are analyzed.

Modern scientific research allows us to study the efficiency of transportation of such goods, develop strategies to reduce risks and improve infrastructure to ensure the reliability and efficiency of railway transportation. The main challenges and challenges facing the dangerous goods transportation industry are highlighted, such as the risk of accidents, environmental pollution, the need for specialized infrastructure solutions, the role of personnel, as well as problems in the management and monitoring of these transportations.

Key words: *dangerous goods, analysis, transportation, risks, safety, railway transport.*

Постановка проблеми

Забезпечення безпеки при транспортуванні вантажів є важливим завданням у сучасному світі, оскільки це безпосередньо впливає на безпеку громадян, довкілля та економічний розвиток. Небезпечні вантажі, такі як хімічні речовини, вибухонебезпечні матеріали та радіоактивні відходи, становлять серйозну загрозу для суспільства, інфраструктури та навколишнього середовища. Тому їх перевезення будь-яким видом транспорту повинне відбуватися із забезпеченням відповідних умов.

У зв'язку з ростом глобальної торгівлі та інтеграцією світових економік, обсяги перевезень небезпечних вантажів постійно зростають. Тому аналіз досліджень в цій галузі має вирішальне значення для розробки перспективних технічних рішень, вдосконалення нормативно-правових актів, технологій та стратегій безпеки.

Забезпечення ефективного контролю та управління перевезеннями небезпечних вантажів вимагає глибокого розуміння ризиків, визначення оптимальних маршрутів та розробки надійних систем безпеки. Підвищений ризик, пов'язаний з інцидентами, перевезенням небезпечних вантажів підвищив обізнаність уряду та наукових кіл. Дослідження в цій сфері допомагають вдосконалити процеси перевезення, зменшити ризики аварій та максимізувати захист громадського здоров'я і довкілля.

Отже, важливість наукових досліджень у галузі перевезення небезпечних вантажів полягає в забезпеченні безпеки, стійкості та сталого розвитку сучасного суспільства. В цьому контексті вивчення та аналіз цієї проблематики стає надзвичайно актуальним завданням для наукової спільноти та суспільства в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Детальний огляд наукових праць даного напрямку показав, що існують значна кількість напрацювань і результатів досліджень, що направлені на опис та вивчення особливостей процесів транспортування небезпечних вантажів. Так, Єрсут та ін. в роботі [1] пропонують найбільш всебічний і найновіший огляд перевезень небезпечних вантажів на сьогоднішній день, що включає в себе перевезення різними видами транспорту. Авторами запропонована умовна класифікація літератури на чотири основні категорії на основі типу проблеми:

- Оцінка ризиків,
- Локальна маршрутизація,
- Комбіноване розташування об'єктів і транспортування,
- Проектування мережі.

Також автори роботи [1] пропонують класифікувати роботи за відповідним видом транспорту, наприклад, залізниця та міські дороги. Крім того, Єрсут та ін. визначають важливі прогалини та проблеми в дослідженнях.

Нійоле Батарліене у роботі [2] присвятила розділ огляду останніх досліджень з тематики безпеки та оцінки ризиків перевезень небезпечних вантажів для виявлення основних факторів безпечного перевезення з метою зниження ризиків виникнення аварійних ситуацій.

Формулювання мети дослідження

Перевезення небезпечних вантажів залізницями є важливим і складним аспектом сучасної транспортної і логістичної інфраструктури.

Основними завданнями статті є:

- аналіз досліджень перевезень небезпечних матеріалів залізницею;
- визначення викликів та проблем, що стоять перед залізничними перевізниками у контексті перевезень небезпечних вантажів залізницею.

Об'єктом дослідження є процеси перевезення небезпечних вантажів залізницею в цілому, з урахуванням різних типів небезпечних матеріалів, ступенів їх небезпеки, технічних та технологічних аспектів, а також аспектів безпеки, логістики та сталості цього виду транспорту.

Метою цієї статті є проведення аналізу результатів досліджень, пов'язаних з перевезеннями небезпечних вантажів залізницею.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для отримання даних, безпосередньо відносних до предмету дослідження, авторами проведено детальний огляд наукової літератури щодо даної теми. Схема класифікації, запропонована науковцями [1], є двокритеріальною, де розглядаються такі критерії, як: тема, висвітлена в статті, та вид транспорту. Що стосується першого

критерію, то категорії в класифікаційній схемі, наведеній [1], є такими: оцінка ризиків, локальна маршрутизація, комбіноване розташування об'єктів і транспортування, і проектування мережі. На першому етапі дослідження пропонується використати перший критерій – тематика статей. Справедливо буде сказати, що численні роботи стосуються проблем, які знаходяться на перетині вищезгаданих областей.

Аналіз наукових праць, направлених на вивчення категорії «Оцінка ризиків» вказує на те, автори приділяли увагу методології оцінки ризиків, що включає аналіз ризиків залізничних перевезень та оцінку основних причин нещасних випадків, пов'язаних з залізничним транспортом. Зі збільшенням обсягів перевезень таких вантажів зростає і ризик, який вони становлять під час транспортування. У літературі зазначається, що необхідно гарантувати безпеку транспортних процесів, враховуючи, що небезпечні речовини становлять значну загрозу не тільки для навколишнього середовища і людей, а й для всієї транспортної інфраструктури. Ван дер Вліс та Суддел у роботі [3] зазначають, що ризики часто зумовлені не властивостями небезпечних речовин, а людськими помилками у виробництві та транспортуванні.

Дослідження Хассана та ін. [4] висвітлює значущість врахування впливу людських помилок на аналіз частоти відмов і їх вплив на вибрані сценарії відмов. Крім цього, підкреслило необхідність використання методу оцінки та зменшення людських помилок (HEART) як корисного інструмента для аналізу надійності, спільно з використанням нечіткої арифметики з метою зменшення невизначеностей, пов'язаних з оцінкою ймовірності людських помилок для скорочення ймовірності невірних оцінок ризиків, які оцінюються.

Категорії «Локальна маршрутизація» присвячено роботи вирішенню проблем маршруту(ів) між заданими пунктами відправлення та пунктами призначення для заданої небезпечної речовини та розробці моделей оптимізації пошуку маршрутів, які мінімізують витрати, кількість аварій, тощо.

Верма у роботі [5] розробив двоцільову оптимізаційну модель, в якій вартість визначається на підставі особливостей характеристик залізничної галузі, а врахування транспортного ризику базується на динаміці залізничних аварій. Додатково розроблено межу ризику та витрат, яка ілюструє прийняття рішень, що не мають вираженої переваги, з подальшим узагальненням результатів.

Бібік та ін. [6] висвітлює актуальне питання вдосконалення систем планування перевезень небезпечних вантажів залізничним транспортом за умови забезпечення рівня безпеки та мінімальних витрат. Авторами зазначено що розглянуте завдання необхідно вирішувати на основі двохетапної математичної моделі. Прикладом є розроблена математична модель пошуку оптимального маршруту на основі мінімізації ризиків. Застосування вказаного підходу до практики організації перевезень небезпечних вантажів залізничним транспортом дозволяє логістичному оператору приймати рішення щодо планування оптимальних маршрутів з мінімальним ризиком дорожньо-транспортних пригод. Також перевагою запропонованої моделі є її здатність до адаптації та врахування до інших практичних прикладів та різних завдань маршрутизації.

У тематиці «Розташування об'єкта та транспортування» автори статей розглядають рішення, щодо розміщення потенційно небезпечних для громадськості та екології об'єктів: пунктів відправки, наприклад, нафтопереробних заводів або атомних електростанцій та пунктів призначення поставок небезпечних речовин - автозаправні станції та центри обробки небезпечних відходів. Пропонують моделі для мінімізації часу в дорозі та мінімізації ризику утилізації.

Зографос і Андруцопулос у статті [7] представили систему підтримки прийняття рішень для оцінки альтернативних маршрутів розподілу з точки зору часу в дорозі, ризику та наслідків евакуації, а також для координації рішень щодо розгортання аварійного реагування з маршрутами перевезення небезпечних матеріалів.

Берглунд та Квон у статті [8] визначили точний метод повного прорахунку місця розташування об'єктів переробки небезпечних речовин (наприклад, сміттєспалювальних заводів), які мінімізують загальні витрати з точки зору фіксованої вартості об'єкту, транспортних витрат та ризику впливу на навколишнє середовище. Описали вплив невизначеності та оптимізації в комбінованій задачі визначення місцезнаходження та маршрутизації небезпечних вантажів.

«Проектування мережі» розглядає всі залучені сторони (уряд і перевізники), є відносно молодою темою дослідження. Автори статей займалися розширенням існуючих моделей у цій галузі, включенням невизначеності та розгляд кількох цілей, оскільки проблеми транспортування небезпечних речовин є високостохастичними за своєю природою та включають багато критеріїв та учасників.

Гзара [9] розглянув задачу проектування мережі для транспортування небезпечних матеріалів, яка моделюється як дворівнева модель потоку багатотоварної мережі. Дослідив комбінаторне дворівневе формулювання задачі та представили результати щодо простору її розв'язків. Запропонував сімейство допустимих розрізів та включення їх до алгоритму точної побудови площини розрізу. Провів чисельне тестування з використанням реальних та випадкових наборів даних. Результати показують, що метод площини розрізу є швидшим за інші методи, описані в літературі для тієї самої постановки задачі.

Сінь, Луту та Бай у дослідженні [10] використали підхід оптимізації за критерієм максимальної шкоди для моделювання проблеми як дворівневої задачі цілочисельного програмування в умовах невизначеності крайового ризику. Автори застосували евристичний підхід, який знаходить надійну і стабільну мережу перевезень

небезпечних вантажів. Протестували метод на прикладі з мережі провінції Гуандун у Китаї, для проілюстрування ефективності моделі та алгоритму.

Маркотт та ін. [11] досліджували встановлення плати за проїзд як інструмент регулювання використання доріг для перевезення небезпечних вантажів. Запропонували математичне формулювання та метод розв'язання задачі про плату за перевезення небезпечних матеріалів.

Проведений огляд показав, що академічні дослідження спираються на три основні компоненти: розуміння проблеми, збір та аналіз даних і розробку моделей. Якщо хоча б один із цих компонентів не має належного обґрунтування, то всі наявні знання можуть бути вразливими.

Для оцінки обсягу досліджень у галузі перевезення небезпечних вантажів в контексті цих компонентів, пропонується класифікувати наукові праці на три категорії, відповідно до їх внеску в загальний обсяг знань. Перша категорія включає роботи, які переважно зосереджені на зборі та аналізі даних. Друга категорія охоплює праці, в яких головною метою є опис аналітичних моделей. Нарешті, третя категорія включає роботи, які розглядають теоретичні аспекти проблеми та спрямовані на глибоке розуміння відповідної ситуації. Остання категорія включає в себе наукові праці, які концентруються на розробці теоретичних засад, якісному аналізі або перевірці гіпотез. Результати наведені на рис. 1.

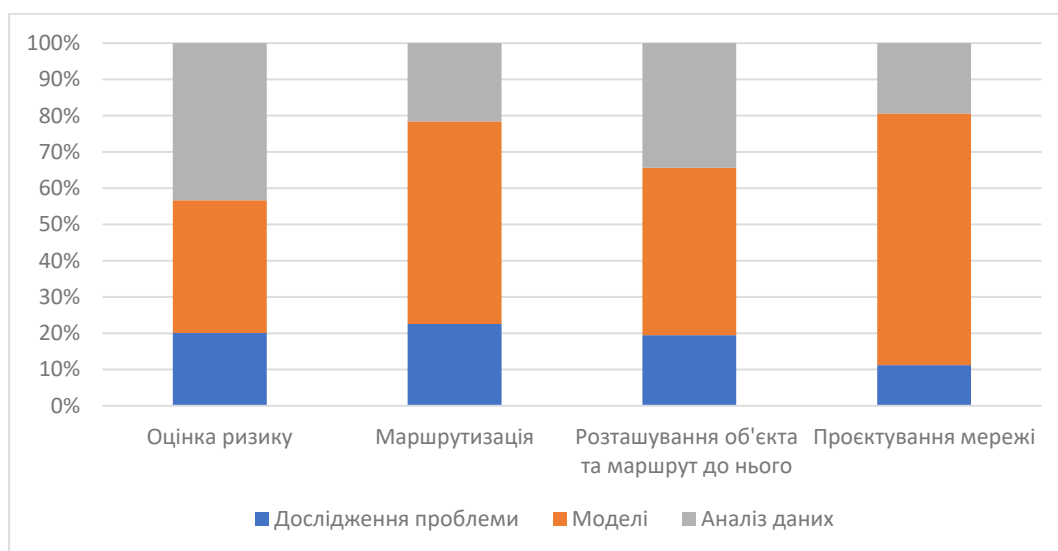


Рис. 1. Типи дослідницьких внесків

Аналіз рис. 1, вказує на те, що переважна кількість вчених в обраному напрямі дослідження більш схильні до розвитку математичного моделювання, аніж до розглядання теоретичних аспектів проблеми. Математичне моделювання є важливим завданням, але воно має супроводжуватися належним статистичним аналізом даних, а також глибоким концептуальним і теоретичним аналізом проблеми.

Виходячі зі своєї специфіки, перевезення небезпечних вантажів залізницею стикається зі значними викликами і проблемами, які вимагають уваги та ретельного дослідження. Таким чином, перед дослідниками стоять наступні ключові аспекти, які потрібно врахувати при вивченні цього напрямку досліджень:

1. Організація безпеки під час перевезень:

– Запобігання аваріям: небезпечні матеріали можуть викликати серйозні аварії в разі пошкодження чи розливу під час перевезення. Дослідники повинні розробляти та впроваджувати стратегії для запобігання аваріям та мінімізації їх наслідків.

– Роль персоналу та його підтримка: персонал, який здійснює нагляд за небезпечними вантажами та реагує на непередбачені ситуації, повинен мати високий рівень підготовки та знань, щоб забезпечити безпеку перевезень.

2. Вимоги до інфраструктури та технічних рішень:

– Спеціалізована інфраструктура: розвиток та підтримка інфраструктури, яка відповідає потребам перевезення небезпечних матеріалів, включаючи відповідні термінали та зупинки для завантаження та розвантаження.

– Технічні рішення для безпеки: впровадження технічних засобів, таких як системи автоматичного керування, моніторингу та виявлення невідповідностей, для забезпечення безпеки та надійності перевезень.

3. Екологічна безпека:

– Зменшення впливу на навколишнє середовище: перевезення небезпечних матеріалів може мати негативний вплив на довкілля. Дослідники мають розробляти та впроваджувати стратегії для зменшення цього впливу та дотримання екологічних норм.

– Відповідність екологічним стандартам: Забезпечення відповідності нормам та стандартам щодо екологічної безпеки у процесі перевезення небезпечних вантажів.

4. Забезпечення ефективності та сталості:

– Ефективність та економія ресурсів: Розвиток стратегій для оптимізації використання ресурсів та зниження витрат у процесі перевезень небезпечних вантажів.

– Сталість перевезень: Забезпечення сталості та надійності послуг у сфері перевезень небезпечних матеріалів.

5. Правові та регуляторні вимоги:

– Дотримання правових норм Виконання вимог та стандартів, які регулюють перевезення небезпечних вантажів.

– Узгодження з регуляторами: Співпраця з органами регулювання для забезпечення відповідності всіх норм.

Висновки

Проведений огляд показав, що наукові дослідження, присвячені перевезенням небезпечних вантажів залізничним транспортом, розкривають широкий спектр аспектів цієї галузі. Вони не лише аналізують та класифікують різноманітні види небезпечних матеріалів, але і досліджують методи та стратегії, спрямовані на мінімізування ризиків в процесі перевезень, формують аналітичні моделі, проєктують мережі.

Сучасні наукові дослідження дозволяють вивчити ефективність та сталість перевезень небезпечних вантажів, розробити стратегії для зменшення ризиків та вдосконалити інфраструктуру для забезпечення надійності та ефективності залізничних перевезень. Це особливо актуально в умовах зростаючого обсягу небезпечних матеріалів, які перевозяться залізницею у всьому світі.

Важливим є особливості розвитку технічних та інфраструктурних рішень для залізничних перевезень небезпечних вантажів. Актуальність досліджень, які спрямовані на створення нових методів та технологій для запобігання аваріям та мінімізації їх наслідків також не викликає сумнівів. Вивчення екологічних аспектів перевезень небезпечних вантажів та розвиток перспективних підходів щодо зменшення впливу на довкілля є особливим критерієм. Співпраця з правовими та регуляторними органами може допомогти впровадити інновації та зміни, які сприятимуть безпеці та сталості залізничних перевезень небезпечних вантажів.

Науковцями приділено увагу дослідженню та вдосконаленню особливостей планування та організації перевезень небезпечних вантажів на залізничному транспорті з використанням інформаційних технологій. Цей напрямок є перспективним в світі застосування сучасних технологій в перевізному процесі, що є доцільним для розгляду у подальших дослідженнях.

Список використаної літератури

1. Erkut E, Tjandra SA, Verter V. Hazardous materials transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science*. 2007. № 14. С. 539–621.
2. Batarlienè N. Improving Safety of Transportation of Dangerous Goods by Railway Transport. *Infrastructures*. 2020. № 5 (7). С. 54.
3. Van der Vlies A, Suddle S. Structural measures for a safer transport of hazardous materials by rail: the case of the basic network in The Netherlands. *Safety Science*. 2008. № 46(1). С. 119–131.
4. Hassan C.R.C., Balasubramaniam P.A., Raman A.A.A., Mahmood N.Z., Hung F.C., Sulaiman NMN, та ін. Inclusion of human errors assessment in failure frequency analysis a case study for the transportation of ammonia by rail in Malaysia. *Process Safety Progress*. 2009. № 28(1). С. 60–67.
5. Verma M. A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2009. № 14(5). С. 300–308.
6. Bibik S, Strelko O, Nesterenko N, Muzykin M., Kuzmenko A. Formulation of the mathematical model for the planning system in the carriage of dangerous goods by rail. *Problems of the railway transport mechanics: матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 27–29 травня 2020р., № 985*. С. 175–182.
7. Zografos K.G., Androusoopoulos K.N. A decision support system for integrated hazardous materials routing and emergency response decisions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2008, № 16(6). С. 684–703.
8. Berglund PG, Kwon C. Robust facility location problem for hazardous waste transportation. *Network Spatial Econ*. 2014. № 14(1). С. 91–116.
9. Gzara F. Acutting plane approach for bilevel hazardous material transport network design. *Operations Research Letters*. 2013. № 41(1). С. 40–46.
10. Xin C, Letu Q, Bai Y. Robust optimization for the hazardous materials transportation network design problem. *Combinatorial Optimization and Applications*. 2013. p. 373–386.
11. Marcotte P, Mercier A, Savard G, Verter V. Toll policies for mitigating hazardous materials transport risk. *Transportation Science*. 2009. № 43(2). С. 228–243.

References

1. E. Erkut, S. A. Tjandra, V. Verter (2007) «Hazardous materials transportation», *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14, pp. 539–621.
2. N. Batarlienė (2020) «Improving Safety of Transportation of Dangerous Goods by Railway Transport», *Infrastructures*. № 5 (7). C. 54.
3. A. Van der Vlies, S. Suddle (2008) «Structural measures for a safer transport of hazardous materials by rail: the case of the basic network in The Netherlands», *Safety Science*, vol. 46, no. 1, pp. 119–131.
4. C.R.C. Hassan, P.A. Balasubramaniam, A.A.A., Raman, N.Z. Mahmood, F.C. Hung, N.M.N. (2008) Sulaiman et al, «Inclusion of human errors assessment in failure frequency analysis a case study for the transportation of ammonia by rail in Malaysia», *Process Safety Progress*, vol. 28, no.1, pp. 60–67, Nov.
5. A. Verma (2009) «A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 14, no. 5, pp. 300–308, July.
6. S. Bibik, O. Strelko, N. Nesterenko, M. Muzykin, A. Kuzmenko (2020) «Formulation of the mathematical model for the planning system in the carriage of dangerous goods by rail», *Problems of the railway transport mechanics: 15th International Scientific and Technical Conference*, Dnipro, vol. 985, pp. 175–182.
7. K.G. Zografos, K.N. (2008) Androutsopoulos, «A decision support system for integrated hazardous materials routing and emergency response decisions», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol 16, no. 6, pp. 684–703.
8. P.G. Berglund, C. Kwon (2014) «Robust facility location problem for hazardous waste transportation», *Network Spatial Econ*, vol. 14, no. 1, pp. 91–116.
9. F. Gzara (2013) «Acutting plane approach for bilevel hazardous material transport network design», *Operations Research Letters*, vol. 41, no.1, pp. 40–46.
10. C. Xin, Q. Letu, Y. Bai (2013) «Robust optimization for the hazardous materials transportation network design problem», *Combinatorial Optimization and Applications*, pp. 373–386.
11. P. Marcotte, A. Mercier, G. Savard, V. Verter (2009) «Toll policies for mitigating hazardous materials transport risk», *Transportation Science*, vol. 43, no. 2, pp. 228–243.