

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЧЕХУНОВ ДЕНИС МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 656.212.5:656.073.436

ДИСЕРТАЦІЯ

**ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
УПРАВЛІННЯ СОРТУВАЛЬНИМИ СТАНЦІЯМИ В УМОВАХ
ПЕРЕВЕЗЕНЬ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ**

05.22.01 – транспортні системи

275 – транспортні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
Д.М. Чехунов

Науковий керівник

БУТЬКО Тетяна Василівна,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Чехунов Д.М. Формування автоматизованої технології управління сортувальними станціями в умовах перевезень небезпечних вантажів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.01 – «Транспортні системи» (275 – Транспортні технології). – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2019.

Дисертацію присвячено питанню підвищення ефективності функціонування системи вантажних залізничних перевезень шляхом формалізації та автоматизації процесів планування роботи сортувальних станцій (СС) в умовах перевезень небезпечних вантажів (НВ) з урахуванням завдань ризик-менеджменту на основі системного підходу.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні наукового завдання удосконалення процесів управління СС шляхом формування автоматизованої технології управління, яка надасть можливість оптимізувати роботу СС на основі системного підходу і дозволить комплексно вирішувати технологічні задачі і задачі ризик-менеджменту в умовах перевезень НВ.

З цією метою вперше:

- сформовано критерій оцінки небезпек при оперуванні вагонами з НВ на основі експозиції ризиків, який виступає інтегральним показником рівня безпеки оперативного плану, та дозволяє в динаміці врахувати зміни оперативної ситуації на СС у просторі та часі;
- для вибору оптимального варіанту оперативного плану роботи СС на основі вищезазначеного критерію сформовано модель оцінювання ризиків в умовах обробки вагонів з НВ з використанням математичних апаратів Баєсових мереж та нечіткої логіки;
- формалізовано технологію управління оперативною роботою СС на основі математичної моделі багатоцільової оптимізації, яка дозволяє

оптимізувати технологічні витрати з урахуванням вирішення задач ризик-менеджменту на всіх стадіях обробки вагонопотоків з НВ включно з місцевою роботою;

Удосконалено:

– математичні моделі побудови плану формування поїздів (ПФП) та розподілу порожніх вагонів з урахуванням завдань ризик-менеджменту на СС в умовах перевезень НВ;

– систему АСК ВП УЗ Є за рахунок включення до її складу комплексу задач, які представлені на всіх рівнях управління перевізного процесу, та спрямовані на оптимізацію роботи СС з урахуванням завдань ризик-менеджменту в умовах перевезень НВ, які представляють автоматизовану технологію управління.

Практичні результати дисертаційного дослідження полягають в тому, що розроблені та удосконалені математичні моделі та сформована на їх основі технологія управління СС в умовах перевезень НВ дозволяють автоматизувати вироблення рішень на всіх рівнях процесу управління вантажними перевезеннями. Застосування даної автоматизованої технології при управлінні роботою СС дозволяє підвищити ефективність їх функціонування та рівень безпеки шляхом зниження експлуатаційних витрат за рахунок зменшення величини вагоно-годин простою вагонів та мінімізації ризику, що пов'язаний з обробкою вагонопотоків із НВ.

Одержані в дисертації результати використовуються при управлінні вагонопотоками та процесом формування поїздів на СС регіональної філії “Південна залізниця” АТ “Укрзалізниця”, в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ), а також при проведенні занять зі слухачами центру спеціального навчання працівників суб'єктів перевезень небезпечних вантажів при УкрДУЗТ. Практичне використання результатів роботи підтверджено актами впровадження.

За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з яких 6 статей (одна без співавторів), та 6 праць апробаційного характеру. Із шести статей п'ять опубліковані у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України, та одна у закордонному виданні. Всі шість статей включені до міжнародних наукометричних баз, дві з яких індексуються у базі Scopus.

Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, відображені наукова новизна та практична цінність, подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі проведено аналіз основних кількісних та якісних показників роботи підсистеми вантажних перевезень, та виявлені негативні тенденції щодо збільшення величини обігу вантажного вагону, зменшення величини середньодобового пробігу локомотива, обсягів середньодобового навантаження та річного вантажообігу. Разом з тим, на фоні цих негативних трендів було виявлене збільшення обсягів залізничних перевезень НВ в Україні, що відбувається з цілої низки причин. На основі аналізу перевезень НВ залізницями країн світу було встановлено, що така тенденція є загальносвітовою. Також було встановлено, що в середньому за добу СС обробляє декілька сотень вагонів із НВ, що відносяться до різних класів небезпеки. Здійснено аналіз аварійних ситуацій із вагонами з НВ на СС за видами, причинами і причетністю, в результаті якого зокрема було встановлено, що значна кількість інцидентів відбувається за участю «людського фактору».

Аналіз наукових праць вітчизняних та зарубіжних дослідників виявив відсутність єдиного підходу для оцінювання рівня небезпек в процесі функціонування складних залізничних систем, зокрема СС, в умовах перевезень НВ. Разом з тим було відмічено, що при оцінюванні рівня небезпеки, яка пов'язана з елементарними подіями, застосовується поняття технічного ризику, що дозволяє одночасно враховувати імовірність виникнення небажаної події та величину її можливих наслідків. Також було

зазначено, що масштаби можливих наслідків аварій із вагонами з НВ на території СС є значно вищими в порівнянні з іншими об'єктами залізничної мережі, так як окрім значних матеріальних збитків, шкоди здоров'ю та втрати життя персоналом станції та мешканцями прилеглих населених пунктів, така аварія може призвести до зниження операційної діяльності всієї залізничної системи, а також становить загрозу для безпеки країни.

Збільшення обсягів перевезень НВ в умовах збільшення простоїв та інших негативних тенденцій в роботі системи вантажних залізничних перевезень є причиною того, що СС перетворюються на термінали, на яких одночасно перебуває велика кількість вагонів, значна частка яких містять НВ. За таких умов, враховуючи критичний рівень зносу рухомого складу, значно підвищується імовірність виникнення техногенної аварії. Таким чином, СС є елементами залізничної транспортної системи, які потребують першочергового вирішення задачі мінімізації простоїв вагонів та управління ризиками. Вирішення цих задач є можливим за рахунок формалізації і автоматизації процесу оперативного планування роботи СС в умовах перевезень НВ.

У другому розділі проведено аналіз підходів щодо оцінювання небезпек в процесі функціонування технічних систем. Відзначено раціональність підходу, що полягає у застосуванні поняття технічного ризику для здійснення кількісних оцінок небезпек. Разом з тим було встановлено, що для оцінювання ризику при здійсненні оперативного планування роботи СС в умовах обробки вагонопотоків з НВ лише застосування даного підходу є недостатнім, адже він дозволяє оперувати ризиком лише як статичним параметром. Однак в процесі функціонування СС ситуація на станції постійно змінюється, тому для врахування цих змін при оцінці ризиків в процесі побудови оперативного плану роботи СС було запропоновано функцію поточного ризику та критерій експозиції ризику, який є інтегральним критерієм. Таким чином, експозиція ризику є інтегралом по

часу зі змінною верхньою межею від узагальненої функції ризику, яка є сумою функцій поточного ризику кожного окремого вагона з НВ.

Для розрахунку поточного ризику було розроблено модель, що використовує математичні апарати Баєсових мереж та нечіткої логіки. Модель надає можливість визначення імовірності настання небажаної події з вагоном із НВ з достатньою точністю, одночасно враховуючи як статистичні дані так і оперативну інформацію про поточну ситуацію на станції, а також вплив всіх основних факторів небезпек, включаючи й ті, які можуть надходити від інших вагонів з НВ, що перебувають на станції.

На основі критерію експозиції ризику сформовано модель управління ризиками при оперативному плануванні роботи СС в умовах перевезень НВ. Цільова функція сумісно із системою обмежень, що регламентують порядок обробки вагонів із НВ, представляє оптимізаційну модель управління ризиками. Сформована модель є основою для побудови системи управління ризиками в процесі реалізації змінно-добових завдань на станції.

У третьому розділі на основі аналізу наукової літератури було встановлено, що задача планування роботи СС, яка є задачею комбінаторної оптимізації, відноситься до класу NP-повних задач, а отже її вирішення може представляти значну обчислювальну складність. Однак СС залізничної мережі України виконують не лише роботу з розформування-формування составів, але й містять підсистему місцевої роботи, що може обслуговувати значну кількість об'єктів. Таким чином, задачу планування роботи СС можна класифікувати як унікальний тип задачі теорії розкладу, яка також є безпрецедентною за складністю з точки зору формалізації технологічних процесів.

Сформовано математичну модель, цільову функцію якої представлена у вигляді критерію експлуатаційних витрат. Було доведено, що найбільш раціональним підходом для вирішення задачі побудови оперативного плану роботи СС, який є оптимальним як за критерієм експлуатаційних витрат так і за критерієм експозиції ризику, є її формулювання у вигляді задачі

багатоцільової оптимізації. Таким чином, модель багатоцільової оптимізації містить цільову функцію експозиції ризику та цільову функцію експлуатаційних витрат, яка включає витрати, що пов'язані із вагоно-години перебування вагонів на СС, простоем поїзних локомотивів, маневровою та місцевою роботою, а також систему обмежень, яка регламентує операції з поїздами, що містять вагони з НВ, та забезпечує планування роботи станції в межах її технічних можливостей.

Для оптимізації моделі було сформовано процедуру, яка використовує генетичний алгоритм спеціального типу (NSGA-II) для отримання множини Парето-оптимальних рішень, та метод граничної корисності для виділення єдиного компромісного рішення. Розроблене на її основі програмне забезпечення, надає можливість представлення оптимального оперативного плану роботи СС у графічному вигляді.

За результатами моделювання було виявлено, що застосування розробленої моделі при побудові оперативного плану роботи СС дозволяє зменшити величину експозиції ризику на 8 % та загальні вагоно-години перебування вагонів на СС на величину 6,5 % у порівнянні із традиційною технологією планування.

У четвертому розділі у відповідності до основних вимог міжнародного стандарту ISO 31000 “Управління ризиками. Керівні принципи”, які наголошують про необхідність глибокої інтеграції системи ризик-менеджменту до системи управління технологічним процесом, було сформовано математичні моделі, які оптимізують роботу СС в умовах транспортування НВ на стратегічному і тактичному рівнях управління перевезеннями на основі системного підходу.

Сформовано математичну модель, що містить цільову функцію та систему обмежень, і дозволяє вирішувати задачу розрахунку ПФП, яка є стратегічною задачею планування вантажних перевезень. Використання даної моделі надає можливість, враховуючи технологічні обмеження по переробній і пропускній спроможності станцій та пропускній спроможності

дільниць, побудувати раціональний плану організації вагонопотоків на залізничній мережі, мінімізуючи як технологічні витрати, що пов'язані з накопиченням та обробкою составів, так і ризики, пов'язані із перебуванням вагонів з НВ на СС.

Окрім вагонів з НВ на СС небезпеку представляють також і вагони, що були розвантажені після перевезення НВ і не пройшли очистку адже існує, наприклад, можливість вибуху цистерн, що пов'язана із утворенням вибухонебезпечних газів в наслідок розкладання залишків нафтопродуктів. Сформовано математичну модель розподілу порожніх вагонів, оптимізація якої надає можливість для своєчасного виконання станціями завдань з навантаження шляхом побудови плану переміщення порожніх вагонів, визначаючи при цьому маршрути збірних поїздів, та мінімізуючи експлуатаційні витрати та ризики шляхом зменшення часу перебування таких вагонів на станціях.

Розроблений комплекс моделей і методів їх оптимізації становить основу автоматизованої технології управління СС, яка дозволяє вирішувати технологічні завдання та завдання ризик-менеджменту на стратегічному, тактичному та оперативному рівнях управління процесом перевезень. Дану технологію у вигляді автоматизованої підсистеми запропоновано включити до складу системи АСК ВП УЗ Є, розширивши коло її задач.

У ході дослідження економічної ефективності впровадження запропонованої технології було встановлено, що вона дозволяє зменшити величину обігу вантажного вагона на залізничній мережі на 3,25 % та величину можливих наслідків аварій при здійсненні залізничних перевезень НВ на величину 2,4 %. За 10 років використання даної технології очікуваний економічний ефект становитиме 181,6 млн. грн.

Ключові слова: обробка вагонів із небезпечними вантажами, ризик-менеджмент, оперативний план роботи сортувальної станції, автоматизована технологія управління роботою сортувальної станції.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Основні наукові праці.

1. Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №85(3Pt1). P. 55–61. (індексується у базі Scopus).

2. Чехунов Д.М. Формування моделі оцінки ризиків на сортувальній станції при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами із використанням математичних апаратів нечіткої логіки та Байєсових мереж. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №1. С. 35–41.

3. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М. Формалізація технології переробки вагонопотоків із небезпечними вантажами на сортувальній станції на основі експозиції ризику. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №2. С.18–22.

4. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М. Технологія інтелектуального управління сортувальною станцією на основі багатоцільової оптимізації із використанням генетичних алгоритмів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №4. С.45–55.

5. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М. Інтелектуальне управління сортувальними станціями при перевезеннях небезпечних вантажів на основі багатоцільової оптимізації. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2018. №5(77). С.41–52.

Публікації у закордонних виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз.

6. Prokhorov V., Kalashnikova T., Rybalchenko L., Riabushka Yu., Chekhunov D. Solution of the problem of empty car distribution between stations and planning of way-freight train route using genetic algorithms. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. №7 (4.3). P. 275–278. (індексується у базі Scopus).

Праці апробаційного характеру.

7. Бутько Т.В., Чехунов Д.М., Удосконалення планування роботи сортувальної станції в умовах ризиків. *Матеріали 30-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»* (26–27 жовтня 2017 р., Харків). ІКСТ №4 (додаток). 2017. С. 55–56.

8. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М. Формування системи управління ризиками при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами на основі моделі оцінювання ризиків. *Матеріали 80-ї міжнародної науково-технічної конференції* (24–28 квітня 2018р., Харків). Збірник наукових праць УкрДУЗТ. №177 2018. С. 114.

9. Чехунов Д.М. Організація вантажопотоків із небезпечними вантажами на основі оптимізації плану формування поїздів. *Матеріали 31-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»* (24–26 жовтня 2018 р., Харків). ІКСТ №4 (додаток) 2018. С. 33.

10. Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Forming of model of risk management at the switchyard station at operating railcar with dangerous goods on the basis of risk exposure. *Proceedings of International scientific and practical conference “Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport”* (1–10 May 2018, Rimini, Italy). P. 14–16.

11. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М., Гуровий С.А. Формування моделі оцінки ризиків на сортувальній станції при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами із застосуванням сучасних математичних апаратів. *Матеріали міжнародної науково-технічної*

конференції (14–16 травня 2018 р., Харків) Частина 1. УкрДУЗТ. 2018. С. 165–166.

12. Пархоменко Л.О., Чехунов Д.М. Дослідження показників вантажних перевезень в контексті обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. *Матеріали міжнародної науково-практичної Internet-конференції «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті»* (21–22 листопада 2018 р.) Харків. 2018. С. 171–177.

ABSTRACT

Chekhunov D.M. Formation of automated technology of management of switchyard stations in conditions of transportation of dangerous goods. – Qualifying scientific work – manuscript copyright.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (Ph.D. in technical sciences) in specialty 05.22.01 – "Transport systems" (275 – Transport technologies). – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to the issue of increasing the efficiency of the operation of the freight rail transport system by formalizing and automating the processes of planning the work of sorting stations (SS) in conditions of transportation of dangerous goods (DG) taking into account the tasks of risk management on the basis of the system approach.

The scientific novelty of the dissertation work is to solve the scientific problem of improving SS management processes by forming an automated management technology that will enable to optimize the work of SS on the basis of a system approach and will allow to solve complex technological problems and tasks of risk management in the conditions of transportation of DG.

To this end, for the first time:

- a criterion for assessing the hazards in the operation of carriages with DG on the basis of risk exposure, which serves as an integral indicator of the level of risk of the operational plan, is created and allows to take into account the dynamics of changes in the operational situation on the SS in space and time;

- in order to choose the optimal variant of the operational plan of work of the SS on the basis of the above criterion a model of risk assessment in the conditions of treatment of carriages with DG with the use of mathematical devices of Baisovye networks and fuzzy logic has been formed;

- the technology of management of operational work of the SS is formalized on the basis of a mathematical model of multi-purpose optimization,

which allows to optimize the technological costs taking into account the decision of the risk management problems at all stages of the processing of car traffic with DG, including local work;

Improved:

- mathematical models of construction of train formation plan (TFP) and distribution of empty cars taking into account the tasks of risk management on the SS in conditions of transportation of DG;

- the automated system of management of cargo transportation of Ukrainian railway (ASK VP UZ E) due to the inclusion of a set of tasks that are presented at all levels of the management of the transportation process and aimed at optimizing the work of the SS, taking into account the risk management tasks in the conditions of transportation of DG that represent automated control technology.

The practical results of the dissertation research are that developed and improved mathematical models and formed on their basis technology of control of the SS in the conditions of transportation DG allow to automate decision making at all levels of the process of managing freight traffic. The application of this automated technology in the management of the SS allows to increase the efficiency of their operation and the level of safety by reducing operating costs by reducing the size of wagon-hours of idle wagons and minimizing the risk associated with the processing of carriage streams with DG.

The results obtained in the dissertation are used in the control of car traffic and the process of formation of trains on the SS of the regional branch of the Southern Railway, JSC Ukrzaliznytsia, in the training process of the Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDUZT), as well as during classes with students of the special training center for employees of the subjects of transportation of dangerous goods at UkrDUZT. The practical use of the results of work is confirmed by the implementation acts.

On the theme of the dissertation, 12 scientific works were published, of which 6 articles (one without co-authors), and 6 papers of approbatory character. Out of six articles, five have been published in professional scientific publications,

approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine, and one in a foreign publication. All six articles are included in international science and technology databases, two of which are indexed in the Scopus database.

The dissertation contains introduction, four sections, conclusions, list of used sources and applications. The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the purpose and objectives of the research, reflects the scientific novelty and practical value, gives a general description of the work.

In the first section, the analysis of the main quantitative and qualitative indicators of the operation of the subsystem of freight transport has been carried out, and negative tendencies have been identified regarding the increase of the freight wagon turnover, reducing the average daily mileage, average daily load and annual turnover. At the same time, on the background of these negative trends, an increase in the volume of rail transport of DG in Ukraine was detected, due to a number of reasons. On the basis of the analysis of transportation of DG by railways of the world, it was established that such a trend is global. It was also found that, on average, over the course of the day, the SS handled several hundred carriages from the DG, which belong to different classes of danger. The analysis of emergency situations with wagons from DG to the SS by types, causes and involvement, as a result of which it was found that a significant number of incidents occur with the participation of the "human factor".

The analysis of scientific works of domestic and foreign researchers revealed a lack of a unified approach for assessing the level of hazards in the process of functioning of complex railway systems, in particular SS, in the conditions of transportation of DG. At the same time, it was noted that in the assessment of the level of danger associated with elementary events, the concept of technical risk is used, which allows simultaneously to take into account the probability of occurrence of an undesirable event and the magnitude of its possible consequences. It was also noted that the magnitude of the possible consequences of accidents with carriages with DG on the territory of the SS is significantly higher compared to other objects of the railway network, since, in addition to significant material

damage, damage to health and loss of life by the staff of the station and inhabitants of the surrounding settlements, such an accident could lead to a reduction in the operational activities of the entire rail system, and also poses a threat to the security of the country.

The increase in the volume of transportation of DG in conditions of increasing downtime and other negative tendencies in the operation of freight rail transport is the reason that SSs are converted into terminals, which simultaneously there is a catching number of cars, a significant proportion of which contains DG. Under such conditions, taking into account the critical level of wear and tear of rolling stock, the probability of man-made disaster is significantly increased. Thus, SSs are elements of the railway transport system, which require a priority solution to the problem of minimizing downtime of wagons and risk management. The solution of these tasks is possible due to the formalization and automation of the process of operational planning of the SS in the conditions of transportation of DG.

In the second section, an analysis of approaches to assessing hazards in the process of functioning of technical systems. The rationality of the approach, which consists in applying the notion of technical risk to carry out quantitative assessments of hazards, is noted. At the same time, it was established that for the purpose of risk assessment in conducting operational planning of the SS in the conditions of treatment of carriage streams with DG only the application of this approach is inadequate, since it allows us to operate the risk only as a static parameter. However, in the course of the SS operation, the situation at the station is constantly changing, therefore, in order to account for these changes in risk assessment in the process of constructing the operational plan of the SS, the current risk function and the risk exposure criterion, which is an integral criterion, was proposed. Thus, exposure to risk is an integral over time with an interchangeable upper limit from the generalized risk function, which is the sum of the current risk functions of each individual car with DG.

To calculate the current risk, a model was developed that uses mathematical devices of Bayesian networks and fuzzy logic. The model provides an opportunity

to determine the probability of an unwanted event occurring with a car with DG with sufficient accuracy, while taking into account both statistics and operational information about the current situation at the station, as well as the impact of all major hazards, including those that may come from other wagons from DG who are at the station.

On the basis of risk exposure criteria, a risk management model was developed in operational planning of the SS operation in the conditions of transportation of DG. Target function is compatible with the system of restrictions governing the processing of cars with DG, presents an optimization model of risk management. The current model is the basis for building a risk management system in the process of implementing variable-day tasks at the station.

In the third section, based on the analysis of scientific literature, it was established that the task of planning the work of the SS, which is the task of combinatorial optimization, belongs to the class of NP-complete tasks, and therefore its solution may represent a significant computational complexity. However, the SS of Ukraine's rail network does not only work on the disbandment-formation of compilations, but also contain a subsystem of local work that can serve a large number of objects. Thus, the task of planning the work of the SS can be classified as a unique type of task theory of decomposition, which is also unprecedented in complexity in terms of formalization of technological processes.

A mathematical model is formed, the target function of which is presented as a criterion of operating costs. It has been proved that the most rational approach to solving the problem of constructing the operational plan of the SS, which is optimal both for the criterion of operating costs and for the risk exposure criterion, is its formulation as a multipurpose optimization problem. Thus, the multipurpose optimization model contains the target function of exposure to risk and the target function of operating costs, which includes the costs associated with carriage hours of carriages on the SS, the simplicity of train locomotives, maneuver and local work, as well as the system of restrictions that regulate operations involving trains

containing DG trains and ensures the planning of the station's operation within its technical capabilities.

For optimization of the model, a procedure was developed that uses a special type genetic algorithm (NSGA-II) to obtain a set of Pareto-optimal solutions, and a marginal utility method for selecting a single compromise solution. The software, developed on its basis, provides an opportunity to present the optimal operational plan of work of the SS in a graphical form.

According to the results of the simulation, it was found that the application of the developed model during the construction of the operational plan of the SS allows reducing the risk exposure by 8% and the total carriage-time of carriages on the SS by a value of 6.5% compared to the traditional planning technology.

In the fourth section, in accordance with the basic requirements of the international standard ISO 31000 "Risk Management. Guidelines that emphasize the need for a deep integration of the risk management system into the control system of the technological process, mathematical models that optimize the work of the SS in the conditions of transportation of the DG at the strategic and tactical levels of transportation management on the basis of the system approach were formed.

The mathematical model containing the target function and the system of constraints is formed and allows solving the problem of calculating the TFP, which is a strategic task of planning freight transport. The use of this model makes it possible, taking into account technological constraints on the processing and throughput capacity of stations and throughput capacity of stations, to build a rational plan for the organization of railway carriages on the railway network, minimizing both the technological costs associated with the accumulation and processing of compositions, as well as the risks, with the stay of carriages from DG to SS.

In addition to the carriages from the DG to the SS, the wagons that were unloaded after the carriage of DG and were not cleared are also a danger, as there is, for example, the possibility of an explosion of tanks associated with the

formation of explosive gases as a result of the decomposition of residual oil products. The mathematical model of hollow wagon distribution is formed, the optimization of which provides an opportunity for timely loading of tasks by stations by constructing a plan for the transfer of empty wagons, while defining the trains of the trains, and minimizing operational costs and risks by reducing the time spent by such wagons at the stations.

The developed set of models and methods for their optimization is the basis of automated SS management technology that allows solving technological problems and tasks of risk management at the strategic, tactical and operational levels of transportation process management. This technology in the form of an automated subsystem is proposed to be included in the system ASK VP UZ E, expanding its range of tasks.

During the study of the economic efficiency of the introduction of the proposed technology, it was found that it allows to reduce the turnover of the freight wagon on the railway network by 3.25% and the magnitude of the possible consequences of accidents in carrying out the rail transport of HB by 2.4%. For 10 years of using this technology, the expected economic effect will amount to 181.6 million UAH.

Keywords: processing of cars with dangerous goods, risk management, operational plan of work of the switchyard station, automated control technology of work of the switchyard station.

List of candidate's publications

Publications representing the main scientific results of dissertation.

Main publications.

1. Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №85(3Pt1). P. 55–61. (*indexed in Scopus database*).

2. Chekhunov D.M. Formuvannia modeli otsinky ryzykiv na sortuvalnii stantsii pry operuvanni vahonamy z nebezpechnymy vantazhamy iz vykorystanniam matematychnykh aparativ nechitkoi lohiky ta Baiiesovykh merezh. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. 2018. №1. S. 35–41.

3. Butko T.V., Prokhorov V.M., Chekhunov D.M. Formalizatsiia tekhnolohii pererobky vahonopotokiv iz nebezpechnymy vantazhamy na sortuvalnii stantsii na osnovi ekspozytsii ryzyku. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. 2018. №2. S.18–22.

4. Butko T.V., Prokhorov V.M., Chekhunov D.M. Tekhnolohiia intelektualnogo upravlinnia sortuvalnoiu stantsiieiu na osnovi bahatotsil'ovoi optymizatsii iz vykorystanniam henetychnykh alhorytmiv. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. 2018. №4. S.45–55.

5. Butko T.V., Prokhorov V.M., Chekhunov D.M. Intelektualne upravlinnia sortuvalnymy stantsiiamy pry perevezenniakh nebezpechnykh vantazhiv na osnovi bahatotsil'ovoi optymizatsii. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu*. 2018. №5(77). C.41–52.

Articles in foreign journals included in international scientometric databases.

6. Prokhorov V., Kalashnikova T., Rybalchenko L., Riabushka Yu., Chekhunov D. Solution of the problem of empty car distribution between stations and planning of way-freight train route using genetic algorithms. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. №7 (4.3). P. 275–278. (*indexed in Scopus database*).

Approbation publications.

7. Butko T.V., Chekhunov D.M., Udoskonalennia planuvannia roboty sortuvalnoi stantsii v umovakh ryzykiv. *Materialy 30-yi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti»* (26–27 zhovtnia 2017 r., Kharkiv). IKST №4 (dodatok). 2017. S. 55–56.

8. Butko T.V., Prokhorov V.M., Chekhunov D.M. Formuvannia systemy upravlinnia ryzykamy pry operuvanni vahonamy z nebezpechnymy vantazhamy na osnovi modeli otsiniuvannia ryzykiv. *Materialy 80-yi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (24–28 kvitnia 2018r., Kharkiv). Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT. №177 2018. S. 114.

9. Chekhunov D.M. Orhanizatsiia vantazhopotokiv iz nebezpechnymy vantazhamy na osnovi optymizatsii planu formuvannia poizdiv. *Materialy 31-yi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti»* (24–26 zhovtnia 2018 r., Kharkiv). IKST №4 (dodatok) 2018. S. 33.

10. Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Forming of model of risk management at the switchyard station at operating railcar with dangerous goods on the basis of risk exposure. *Proceedings of International scientific and practical conference “Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport”* (1–10 May 2018, Rimini, Italy). P. 14–16.

11. Butko T.V., Prokhorov V.M., Chekhunov D.M., Hurovyi S.A. Formuvannia modeli otsinky ryzykiv na sortuvalnii stantsii pry operuvanni vahonamy z nebezpechnymy vantazhamy iz zastosuvanniam suchasnykh matematychnykh aparativ. *Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (14–16 travnia 2018 r., Kharkiv) Chastyna 1. UkrDUZT. 2018. S. 165–166.

12. Parkhomenko L.O., Chekhunov D.M. Doslidzhennia pokaznykiv vantazhnykh perevezen v konteksti obrobky vahonopotokiv iz nebezpechnymy vantazhamy. *Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi Internet-konferentsii «Modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii v nautsi, tekhnitsi ta osviti»* (21–22 lystopada 2018 r.) Kharkiv. 2018. S. 171–177.

РОЗДІЛ 1_АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ
 ОБ'ЄКТАМИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ ОБРОБКИ
 ВАГОНОПОТОКІВ ІЗ НЕБЕЗПЕЧНИМИ ВАНТАЖАМИ ТА НАУКОВИХ
 ПІДХОДІВ ЩОДО ОЦІНКИ РИЗИКІВ **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

1.1 Аналіз техніко-експлуатаційних показників вантажних залізничних
 перевезень в Україні **Error! Bookmark not defined.**

1.2 Аналіз параметрів перевезень небезпечних вантажів залізницями
 країн світу і України **Error! Bookmark not defined.**

1.3 Аналіз причин виникнення аварій із небезпечними вантажами **Error! Bookmark not defined.**

1.4 Аналіз наслідків реалізації ризиків при здійсненні залізничних
 перевезень небезпечних вантажів **Error! Bookmark not defined.**

1.5 Аналіз наукових досліджень щодо удосконалення процесу
 управління залізничними перевезеннями небезпечних вантажів **Error! Bookmark not defined.**

1.6 Висновки до розділу 1 **Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 2 ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

2.1 Аналіз можливих підходів до побудови моделі оцінювання небезпек у
 ході реалізації технологічного процесу сортувальної станції в умовах
 оперування вагонами із небезпечними вантажами **Error! Bookmark not defined.**

2.2 Формування кількісного критерію оцінки небезпек при оперуванні
 вагонами з небезпечними вантажами на сортувальній станції **Error! Bookmark not defined.**

2.3 Формування моделі визначення поточної імовірності настання
 небажаної події із вагоном із НВ на сортувальній станції із застосуванням
 математичних апаратів Баєсових мереж і нечіткої логіки **Error! Bookmark not defined.**

2.4 Формування моделі оцінки ризику оперативного плану роботи
 сортувальної станції в умовах обробки вагонопотоків із НВ **Error! Bookmark not defined.**

2.5 Висновки до розділу 2 **Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 3 ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПЕРАТИВНОГО БАГАТОЦІЛЬОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

3.1 Важливість задачі побудови оперативного плану роботи сортувальної станції, її класифікація та обчислювальна складність **Error! Bookmark not defined.**

3.2 Формування моделі оперативного планування роботи сортувальної станції на основі критерія експлуатаційних витрат **Error! Bookmark not defined.**

3.3 Формалізація процесу побудови оперативного плану роботи сортувальної станції у вигляді задачі багатоцільової оптимізації. **Error! Bookmark not defined.**

3.4 Вибір методу оптимізації моделі побудови оперативного плану роботи сортувальної станції в умовах обробки вагонів із небезпечними вантажами. **Error! Bookmark not defined.**

3.5 Визначення кінцевого рішення із множини Парето-оптимальних рішень. **Error! Bookmark not defined.**

3.6 Аналіз отриманого рішення оперативного плану роботи сортувальної станції **Error! Bookmark not defined.**

3.7 Висновки до розділу 3 **Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 4 ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ІНТЕГРОВАНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ **BOOKMARK NOT DEFINED.**

4.1 Застосування системного підходу в процесі побудови систем ризик-менеджменту при управлінні залізничними перевезеннями в умовах обробки вагонопотоків із НВ **Error! Bookmark not defined.**

4.2 Вирішення задачі розподілу порожніх вагонів між станціями в умовах обробки вагонопотоків із НВ з урахуванням тактичних цілей системи ризик-менеджменту **Error! Bookmark not defined.**

4.3 Досягнення цілей ризик-менеджменту на стратегічному рівні управління перевезеннями в умовах організації вагонопотоків із НВ за рахунок вирішення задачі побудови плану формування поїздів **Error! Bookmark not defined.**

4.4 Структура автоматизованої системи управління сортувальною станцією **Error! Bookmark not defined.**

4.5 Розрахунок прогнозного економічного ефекту від впровадження автоматизованої технології **Error! Bookmark not defined.**

4.6 Висновки до розділу 4

Error! Bookmark not defined.

ВИСНОВКИ

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

32

Додаток А Динаміка середньодобового обігу вагона по регіональних

філіях АТ "Укрзалізниця" по місяцях

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Додаток Б Динаміка середньодобового пробігу локомотива по регіональних

філіях АТ "Укрзалізниця" по місяцях

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Додаток В Динаміка середньодобового навантаження по регіональних

філіях АТ "Укрзалізниця" по місяцях

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Додаток Г Фрагмент програми мовою Matlab

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Додаток Д Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості

про апробацію результатів дисертації

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Додаток Е Акти впровадження

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

ВСТУП

Актуальність теми. Збільшення обсягів перевезень небезпечних вантажів залізницями України, яке можна спостерігати останніми роками – відповідає світовому тренду. Однак, в Україні воно відбувається на фоні інших подій – таких як закриття деяких сортувальних станцій (СС) та підвищення концентрації роботи на тих, що залишилися. До того ж в умовах збільшення часу простою сортувальні станції перетворюються на термінали, на яких постійно перебувають великі кількості вагонів, значна частка з яких містить небезпечний вантаж.

За таких умов значимість сортувальних станцій, як головних опорних пунктів по організації вагонопотоків на залізничній мережі, тільки підвищується, а разом з цим підвищується і ціна управлінських помилок. Негативними наслідками таких помилок можуть стати не лише додаткові витрати в наслідок збільшення простоїв вагонів, несвоєчасного формування составів та відправлення поїздів, але й призупинення роботи крупної СС з причини аварії із вагонами із небезпечними вантажами (НВ) на її території, яке може спричинити збій в роботі всієї залізничної системи та невиконання мережевого плану перевезень. Статус сортувальних станцій як системоутворюючих об'єктів залізничної інфраструктури та близькість до великих міст лише підтверджує першочергову важливість питання контролю техногенної безпеки та управління ризиками під час їх функціонування.

Ці питання закріплені в положеннях Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, у якій першочерговими завданнями проголошено: забезпечення належного рівня безпеки та впровадження вимог законодавства ЄС у сфері перевезення небезпечних вантажів; скорочення макроекономічних втрат суспільства від аварій на транспорті на 50 відсотків; автоматизація управління транспортними процесами та впровадження інтелектуальних транспортних систем.

Вони узгоджуються із міжнародними стандартами з промислового ризик-менеджменту, які стверджують, що створення ефективних систем управління ризиками є можливим лише у складі комплексних систем управління виробничими процесами підприємства. Таким чином, представлена дисертаційна робота є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р), Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки (постанова Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. N 1390), Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії та їхніми державами-членами, з іншої сторони, (ратифікованої Законом № 1678-VII від 16.09.2014 р.), Директиви 2008/68/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 24.09.2008 р. “Про внутрішні перевезення небезпечних вантажів”, а також науково-дослідної роботи за темою “Правила перевезення швидкопсувних вантажів” (ДР №0118U000124).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності системи вантажних залізничних перевезень шляхом формалізації та автоматизації процесів планування роботи сортувальних станцій в умовах перевезень небезпечних вантажів з урахуванням завдань ризик-менеджменту на основі системного підходу.

Реалізація цієї мети потребує постанови та вирішення наступних задач дослідження:

- провести аналіз техніко-експлуатаційних показників вантажних залізничних перевезень в Україні з урахуванням процесу транспортування небезпечних вантажів в країні та за кордоном;
- проаналізувати наукові дослідження щодо удосконалення процесу управління залізничними перевезеннями небезпечних вантажів;

- сформуванати підходи до побудови моделі оцінювання ризиків у ході реалізації технологічного процесу роботи СС в умовах оперування вагонами із НВ;
- визначити критерії оцінки небезпек та сформуванати модель управління ризиками при функціонуванні сортувальної станції в умовах обробки вагонопотоків із НВ;
- сформуванати комплексну модель оперативного управління роботою СС, яка формалізує технологію обробки вагонопотоків, в тому числі вагонів з НВ, включно з місцевою роботою з урахуванням завдань ризик-менеджменту;
- розробити процедуру оптимізації моделі та провести моделювання роботи СС з метою порівняння техніко-експлуатаційних показників оперативного плану роботи СС за традиційною та запропонованою технологіями;
- сформуванати моделі побудови плану формування поїздів (ПФП) та розподілу порожніх вагонів в умовах перевезень НВ з урахуванням завдань ризик-менеджменту на СС.
- сформуванати комплексну інтегровану автоматизовану підсистему управління вантажними залізничними перевезеннями з урахуванням завдань ризик-менеджменту;
- провести техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів.

Об'єкт дослідження – процес управління вантажними залізничними перевезеннями.

Предмет дослідження – технологія управління сортувальними станціями в умовах перевезення небезпечних вантажів.

Методи дослідження. При здійсненні аналізу основних кількісних та якісних показників роботи підсистеми вантажних перевезень були застосовані методи математичної статистики та теорії ймовірностей, при побудові математичної моделі оцінки ризиків, що пов'язані з перебуванням

вагонів з НВ на СС, використовувались методи побудови систем нечіткого виводу та Баєсових мереж, для оптимізації моделей побудови оперативного плану роботи СС використовувались методи багатоцільової і комбінаторної оптимізації, метод комбінаторної оптимізації застосовувався також для оптимізації моделей побудови плану формування поїздів в умовах обробки вагонопотоків з НВ та розподілу порожніх вагонів в умовах перевезень НВ, для оптимізації перелічених моделей застосовувались методи математичного апарату генетичних алгоритмів, метод граничної корисності було використано для виділення єдиного рішення на множині Парето-оптимальних рішень для отримання та побудови оперативного плану роботи СС.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційній роботі на основі системного підходу вирішене наукове завдання формування автоматизованої технології управління роботою СС, яка дозволяє одночасно вирішувати технологічні задачі та задачі ризик-менеджменту в умовах перевезень НВ.

З цією метою вперше:

- сформовано критерій оцінки небезпек при оперуванні вагонами з НВ на основі експозиції ризиків, який виступає інтегральним показником рівня небезпеки оперативного плану, та дозволяє в динаміці врахувати зміни оперативної ситуації на СС у просторі та часі;

- для вибору оптимального варіанту оперативного плану роботи СС на основі вищезазначеного критерію сформовано модель оцінювання ризиків в умовах обробки вагонів з НВ з використанням математичних апаратів Баєсових мереж та нечіткої логіки;

- формалізовано технологію управління оперативною роботою СС на основі математичної моделі багатоцільової оптимізації, яка дозволяє оптимізувати технологічні витрати з урахуванням вирішення задач ризик-менеджменту на всіх стадіях обробки вагонопотоків з НВ включно з місцевою роботою;

Удосконалено:

- математичні моделі побудови ПФП та розподілу порожніх вагонів з урахуванням завдань ризик-менеджменту на СС в умовах перевезень НВ;
- систему АСК ВП УЗ Є за рахунок включення до її складу комплексу задач, які представлені на всіх рівнях управління перевізного процесу, та спрямовані на оптимізацію роботи СС з урахуванням завдань ризик-менеджменту в умовах перевезень НВ, які представляють автоматизовану технологію управління.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження, що представляють автоматизовану технологію управління, використовуються в оперативному плануванні роботи сортувальної станції і дозволяють підвищити ефективність її функціонування та рівень безпеки шляхом зниження експлуатаційних витрат за рахунок зменшення величини вагоно-годин простою вагонів та величини ризику, що пов'язаний з обробкою вагонопотоків із НВ.

Одержані в дисертації результати використовуються при управлінні вагонопотоками та процесом формування поїздів на сортувальних станціях регіональної філії “Південна залізниця” АТ “Укрзалізниця”, в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) при підготовці фахівців зі спеціальності «Організація перевезень і управління на транспорті (залізничний транспорт)» з дисциплін «Управління експлуатаційною роботою» та «Сучасні інформаційні технології в управлінні залізничними підрозділами», в курсовому та дипломному проектуванні при підготовці фахівців за освітньою програмою «Транспортні технології», а також при проведенні занять зі слухачами центру спеціального навчання працівників суб'єктів перевезень небезпечних вантажів при УкрДУЗТ.

Практичне використання результатів роботи підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, особистий внесок полягає у такому: у [1] проведено аналіз наукових досліджень, проведено моделювання, здійснено порівняльний аналіз результатів моделювання та сформовано висновки щодо ефективності запропонованого методу розрахунку ПФП, у [3] запропоновано критерій експозиції ризику та на його основі сформовано математичну модель оцінки рівня ризику оперативного плану роботи СС в умовах обробки вагонопотоків із НВ, у [4] сформовано математичну модель побудови оперативного плану роботи СС на основі критерію сумарних експлуатаційних витрат, задачу побудови оперативного плану роботи СС в умовах обробки вагонопотоків з НВ сформульовано як задачу багатоцільової оптимізації та сформовано відповідну математичну модель на основі цільових функцій експозиції ризику та експлуатаційних витрат, запропоновано технологію отримання єдиного кінцевого рішення як результат оптимізації даної моделі шляхом застосування генетичного алгоритму спеціального типу та виділення компромісного рішення із множини Парето-оптимальних рішень із застосуванням методу граничної корисності, у [5] здійснене моделювання та представлено його результати у вигляді плану-графіку роботи СС, проведено аналіз результатів моделювання та зроблені висновки щодо ефективності запропонованого методу оперативного планування роботи СС, у [6] сформовано математичну модель розподілу порожніх вагонів між станціями залізничного полігону та запропоновано застосування математичного апарату генетичних алгоритмів у якості механізму його оптимізації, у [7] запропоновано підходи щодо безпечного оперування вагонами з НВ на СС, у [8] запропоновано підхід до оцінювання ризиків в умовах обробки вагонів з НВ на СС, у [10] запропоновано застосування критерію експозиції ризику, як основи для побудови моделі управління ризиками при оперативному плануванні роботи СС в умовах перевезень НВ, у [11] запропоновано використання математичних апаратів Баєсових мереж і нечіткої логіки в моделях оцінки ризиків при оперуванні вагонами з НВ на СС, у [12]

проведено аналіз показників роботи підсистеми вантажних залізничних перевезень АТ “Укрзалізниця”.

Дослідження, що висвітлені в усіх наукових працях, проводилися в УкрДУЗТ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися та ухвалені на таких конференціях:

- 30-й міжнародній науково-практичній конференції УкрДУЗТ “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”, (м. Харків, 26–27 жовтня 2017 р.);

- 80-й міжнародній науково-технічній конференції УкрДУЗТ “Розвиток наукової та інноваційної діяльності”, (м. Харків, 24–28 квітня 2018 р.);

- 31-й міжнародній науково-практичній конференції УкрДУЗТ “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”, (м. Харків, 24–26 жовтня 2018 р.).

- Міжнародній науково-практичній конференції “Глобалізація наукового та навчального простору. Інновації транспорту”, (Італія, Ріміні, 1–10 травня 2018 р.);

- Міжнародній науково-технічній конференції “Технології та інфраструктура транспорту”, (м. Харків, 14–16 травня 2018 р.);

- Міжнародній науково-практичній Internet-конференції “Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті”, (м. Харків, 21–22 листопада 2018 р.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту.

Публікації. Відповідно до теми дисертації опубліковано 12 наукових праць, з яких 6 статей (одна без співавторів), та 6 праць апробаційного характеру. Із шести статей п’ять опубліковані у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України, та одна у закордонному виданні. Всі шість статей включені до міжнародних наукометричних баз, дві з яких

індексуються у базі Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Повний обсяг тексту дисертації 213 сторінок, з яких обсяг основного тексту складає 153 сторінки друкованого тексту, 45 ілюстрацій, 7 таблиць, список використаних джерел включає 145 найменувань і 6 додатків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №85(3Pt1). P. 55–61.
2. Чехунов Д.М. Формування моделі оцінки ризиків на сортувальній станції при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами із використанням математичних апаратів нечіткої логіки та байєсових мереж. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №1. С. 35–41.
3. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М. Формалізація технології переробки вагонопотоків із небезпечними вантажами на сортувальній станції на основі експозиції ризику. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №2. С.18–22.
4. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М. Технологія інтелектуального управління сортувальною станцією на основі багатоцільової оптимізації із використанням генетичних алгоритмів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №4. С.45–55.
5. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М. Інтелектуальне управління сортувальними станціями при перевезеннях небезпечних вантажів на основі багатоцільової оптимізації. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2018. №5(77). С.41–52.
6. Prokhorov V., Kalashnikova T., Rybalchenko L., Riabushka Yu., Chekhunov D. Solution of the problem of empty car distribution between stations and planning of way-freight train routeu genetic algorithms. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. №7 (4.3). P. 275–278.
7. Бутько Т.В., Чехунов Д.М., Удосконалення планування роботи сортувальної станції в умовах ризиків. *Матеріали 30-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»* (26–27 жовтня 2017 р., Харків). ІКСТ №4 (додаток). 2017. С. 55–56.

8. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М. Формування системи управління ризиками при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами на основі моделі оцінювання ризиків. *Матеріали 80-ї міжнародної науково-технічної конференції* (24–28 квітня 2018 р.). Збірник наукових праць УкрДУЗТ. №177 2018. С. 114.
9. Чехунов Д.М. Організація вантажопотоків із небезпечними вантажами на основі оптимізації плану формування поїздів. *Матеріали 31-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»* (24–26 жовтня 2018 р., Харків). ІКСТ №4 (додаток) 2018. С. 33.
10. Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Forming of model of risk management at the switchyard station at operating railcar with dangerous goods on the basis of risk exposure. *Proceedings of International scientific and practical conference “Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport”* (1–10 May 2018 Rimini, Italy). P. 14–16.
11. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Чехунов Д.М., Гуровий С.А. Формування моделі оцінки ризиків на сортувальній станції при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами із застосуванням сучасних математичних апаратів. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції* (14–16 травня 2018 р., м. Харків) Частина 1. УкрДУЗТ. 2018. С. 165–166.
12. Пархоменко Л.О., Чехунов Д.М. Дослідження показників вантажних перевезень в контексті обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. *Матеріали міжнародної науково-практичної Internet-конференції «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті»* (21–22 листопада 2018 р.) Харків. 2018. С. 171–177.
13. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 16 груд. 2009 р. № 1390 [в редакції Постанови Кабінету Міністрів України від 26 жовт. 2011 р. № 1106]. Дата оновлення: 02.11.2012. URL:

- <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-%D0%BF> (дата звернення 01.09.2018)
14. Бутько Т.В., Данько М.І., Сіконенко Г.М. До питання визначення оптимальної кількості сортувальних станцій. *Коммунальное хозяйство городов*. 2003. №45. С. 237–242.
 15. Аналіз перевезення зернових вантажів. Офіційний сайт Американської торговельної палати в Україні. Дата оновлення: 01.08.2017. URL: http://publications.chamber.ua/Grain_Transportation_08.06._PDF.pdf (дата звернення 01.09.2018).
 16. Ейтутіс Г., Зіць О. Продуктивність вагона – комплексний показник використання вантажних вагонів ПАТ "Укрзалізниця". *Економіст*. 2016. № 3. С. 9–11.
 17. Зіць О. Удосконалення факторно-критеріальної моделі оцінки ефективності використання рухомого складу. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2018. № 62. С. 64–75.
 18. Бараш Ю.С., Булгакова Ю.В., Марценюк Л.В. Визначення економічного ефекту від зменшення терміну простою рухомого складу. *Сборник научных трудов Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Проблемы экономики транспорта*. 2012. №3. С. 9–17.
 19. Белецкий Ю.В., Будников Е.Д., Полякова Т.Ю. Разработка модели прогнозирования значения оборота грузового вагона. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. №1. С. 130–132.
 20. Про перевезення небезпечних вантажів: Закон України від 6 квітня 2000 р. № 1644-III. Дата оновлення: 04.10.2018. URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1644-14> (дата звернення 01.12.2018).
 21. Orange book: Recommendations on the transport of dangerous goods. United Nations. 17th edition. Vol. I. Update: 11.12.2015. URL:

- https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/unrec/rev19/Rev19e_Vol_I.pdf (access date 03.09.2018).
22. Regulation concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID). Intergovernmental Organisation for International Carriage by Rail (2017). Update: 11.12.2017. URL: https://otif.org/fileadmin/new/2-Activities/2D-Dangerous-Goods/RID_2017_E.pdf (access date 07.11.2018).
23. Кацман М.Д. Методологічні засади організації управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті : дис. ... докт. техн. наук : 21.06.01. Київ, 2018. 420 с.
24. Аналіз стану безпеки руху поїздів у комерційному господарстві залізниць за 2017 рік. Заходи, спрямовані на покращення стану безпеки руху: Внутрішній документ ПАТ "Укрзалізниця". Сектор аналітики комерційної діяльності та безпеки руху, 2018. 16 с.
25. Katsman M.D., Myronenko V.K., Matsiuk V.I. Mathematical models of ecologically hazardous rail traffic accidents. *Reliability: theory & applications*. 2015. №1(36). P. 28–39.
26. Lac-Mégantic runaway train and derailment investigation summary. Transportation Safety Board of Canada's: Railway Investigation Report R13D0054. Update: 30.10.2014. URL: <http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/rail/2013/r13d0054/r13d0054-r-es.pdf> (access date 06.12.2018).
27. Official site of National Transportation Safety Board. Report of Railroad Accident: Collision of Norfolk Southern Freight Train 192 with Standing Norfolk Southern Local Train P22 With Subsequent Hazardous Materials Release. Graniteville, South Carolina. January 6, 2005. (November 29, 2005). URL: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/RAR0504.pdf> (access date 10.09.2018).
28. EU Open Data Portal: Annual number of accidents involving the transport of dangerous goods (2004-2015). URL:

http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=rail_ac_dnggood
(access date 12.09.2018).

29. Про затвердження порядку і правил проведення обов'язкового страхування відповідальності суб'єктів перевезення небезпечних вантажів на випадок настання негативних наслідків під час перевезення небезпечних вантажів: Постановами Кабінету Міністрів України від 01.06.2002 р. № 733 Дата оновлення: 05.04.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/733-2002-п> (дата звернення 01.09.2018).
30. Glickman T.S., Erkut E. Assessment of hazardous materials risks for rail yard safety. *Safety Science*. 2007. Vol.45. P. 813–822.
31. Barkan C.P.L., Dick C.T., Anderson R.T. Analysis of railroad derailment factors affecting hazardous materials transportation risk. *Transportation Research Record*. 2003. No. 1825. P. 64–74.
32. Anderson R.T., Barkan C.P.L. Railroad accident rates for use in transportation risk analysis. *Transportation Research Record*. 2004. No. 1863. P. 88–98.
33. Liu X., Saat M.R., Barkan C.P.L. Probability analysis of multiple-tank-car release incidents in railway hazardous materials transportation. *Journal of Hazardous Materials*. 2014. (276). P. 442–451.
34. Verma M., Verter V. Railroad transportation of dangerous goods: population exposure to airborne toxins. *Computers & Operations Research*. 2007. 5(34). P. 1287–1303.
35. Erkut E., Verter V. Modeling of transport risk for hazardous materials. *Operations Research*. 1998. №5(46). P. 625–642.
36. Турчик П.М., Петрук В.Г., Гикавчук Л.В. Моделі кількісної оцінки ризиків перевезення небезпечних відходів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 6. С. 46–51.
37. Glickman T.S. An expeditious risk assessment of the highway transportation of flammable liquids in bulk. *Transportation Science*. 1991. № 25(2). P. 115–123.
38. Aboutahoun A.W. Combined distance-reliability model for hazardous waste transportation and disposal. *Life Science Journal*. 2012. №9(2). P. 1286–1295.

39. Abkowitz M.D. Transportation risk management: a new paradigm. *Security Papers, Southeastern Transportation Center, University of Tennessee*. 2002. P. 93–103.
40. Safico S., Graziano D., Blasi N. Risk assessment on railway transportation of hazardous materials. *Risk Analysis*. 2014. №36. P. 97–106.
41. Bagheri M., Saccomanno F., Fu L. Effective placement of dangerous goods cars in rail yard marshaling operation. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2010. №5(37): P. 753–762.
42. Музикіна С.І. Удосконалення управління процесом просування вагонів з небезпечними вантажами на залізничній мережі : дис....канд. техн. наук : 05.22.01. Дніпропетровськ, 2013. 168 с.
43. Hwang S.T., Brown D.F., O'Steen J.K., Policastro A.J., Dunn W. Risk assessment for national transportation of selected hazardous materials. *Transportation Research Record, Journal of Transportation research Board*. 2001. №1763. P. 114–124.
44. Leeming D.G., Saccomanno F.F. Use of quantified risk assessment in evaluating the risks of transporting chlorine by road and rail. *Transportation Research Record, Journal of Transportation research Board*. 1994. №1430. P. 27–35.
45. Glickman T.S., Erkut E., Zschocke M.S. The cost and risk impacts of rerouting railroad shipments of hazardous materials. *Accident Analysis & Prevention*. 2007. №39 1015–1025.
46. Bubbico R. Cave S., Mazzarotta B. Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a GIS approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2004. №6 (17). P. 483–488.
47. Bagheri M., Verma M., Verter V. An expected risk model for rail transport of hazardous materials. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2012. №126. P. 207–226.

48. Verma M. Railroad transportation of dangerous goods: A conditional exposure approach to minimize transport risk. *Transportation Research, Part C*. 2011. №19. P. 790–802.
49. Lin B. Integrating car path optimization with train formation plan: a non-linear binary programming model and simulated annealing based heuristics. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.08326.pdf> Update: 26.07.2017. (access date 01.10.2018).
50. Janno J., Koppel O. Human factor as the main operational risk in dangerous goods transport chain. *Proceedings of the 17th International Scientific Conference Business Logistics in Modern Management* (12–13 October 2017). 2017. Osijek, Croatia. P. 63–78.
51. Інструкція з оперативного планування поїзної і вантажної роботи на залізницях України № 969-ЦЗ, ЦД-0052. Київ: Укрзалізниця. 2004. 38 с.
52. Choi T.M., Chiu C.H., Chan H.K. Risk Management of Logistics Systems, *Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review*. 2016. №(90). P. 1–6.
53. A Risk Management Standard 2012. The Institute of Risk Management, URL: https://www.theirm.org/media/886059/ARMS_2002_IRM.pdf Update: 10.07.2012. (access date 15.04.2017).
54. Pradhananga R., Taniguchi E., Yamada T. Minimizing exposure risk and travel times of hazardous material transportation in urban areas. *Infrastructure Planning Review*. 2009. №26. 689–701.
55. Verma M. Railroad transportation of dangerous goods: A conditional exposure approach to minimize transport risk. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2011. №5(19). P. 790–802.
56. Kmec P. Temporal hierarchy in enterprise risk identification. *Management Decision*. 2011. №9(49). P. 1489–1509.
57. Hillson D. Understanding risk exposure using multiple hierarchies. Paper presented at PMI® Global Congress 2007. URL:

<https://www.pmi.org/learning/library/understanding-risk-exposure-multiple-hierarchies-7367> (access date 15.10.2017).

58. Rafele C., Hillson D.A., Grimaldi S. Understanding project risk exposure using the two-dimensional risk breakdown matrix. Paper presented at PMI® Global Congress 2005. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/risk-exposure-two-dimensional-rbm-7537> (access date 16.10.2017).
59. Sun L., Srivastava R.P., Mock T.J. An information systems security risk assessment model under Dempster-Shafer theory of belief functions. *Journal of Management Information Systems*. 2006. №4(22). P. 109–142.
60. Jones B., Jenkinson I., Yang Z., Wang J. The use of Bayesian network modeling for maintenance planning in a manufacturing industry. *Reliability Engineering and System Safety*. 2010. №3(95). P. 267–277.
61. Puga J.L., Krzywinski M., Altman N. Bayes' theorem. *Nature Methods*. 2015. №4(12). P. 277–278.
62. Price R. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. By the Late Rev. Mr. Bayes, F. R. S. Communicated by Mr. Price, in a Letter to John Canton, A. M. F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1763. №53. P. 370–418.
63. Barua S., Gao X., Paskan H., Mannan M.S. Bayesian network based dynamic operational risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. №41. P. 399–410.
64. Zhao L.J., Wang X.L., Qian Y. Analysis of factors that influence hazardous material transportation accidents based on Bayesian networks: a case study in China. *Safety Science*. 2012. №4(50). P. 1049–1055.
65. Leoni L., Bahootoroody A., Carlo F.D., Paltrinieri N. Developing a risk-based maintenance model for a natural gas regulating and metering station using Bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. №57. P. 17–24.
66. Li H-L., Kao H-Y. Constrained abductive reasoning with fuzzy parameters in Bayesian networks. *Computers & Operations Research*. 2005. №32. P. 87–105.

67. Heni A., Alimi A.M. Approximate inference in dynamic possibilistic networks. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2007. P. 1240–1246.
68. Huang C., Darwiche A.. Inference in belief networks: A procedural guide. *International Journal of Approximate Reasoning*. 1996. №3(15). P. 225–263.
69. Viertl R. Foundation of fuzzy Bayesian inference. *Journal Of Uncertain Systems*. 2008. №2(3). P. 187–191.
70. Viertl R., Sunanta O. Fuzzy Bayesian inference. *Metron*. 2013. №3(71). P. 207–216.
71. Stein M., Beer M., Kreinovich V. Bayesian approach for inconsistent information. *Information Sciences*. 2013. №(245). P. 96–111.
72. Sun D., Jia Y., Yang Y., Li H., Zhao L. Fuzzy-Bayesian-network-based safety risk analysis in railway passenger transport. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2018. №3(46). P. 135–141.
73. Ling C.X., Zhang H. The representational power of discrete Bayesian networks. *Journal of Machine Learning Research*. 2002. №3. P. 709–721.
74. Fogelberg C., Palade V., Assheton P. Belief propagation in fuzzy Bayesian networks. *Proceedings of the 1st International Workshop on Combinations of Intelligent Methods and Applications(CIMA) at ECAI'08*. University of Patras, Greece. (21–22 July 2008). P. 19–24.
75. Cooper G. Probabilistic Inference Using Belief Networks is NP-Hard, *Artificial Intelligence*. 1990. №42. P. 393–405.
76. Pokoradi L. Fuzzy logic based risk assessment. *Academic and Applied Research in Military Science*. 2002. №1. P. 63–73.
77. Drivas P.J. Calculation of evaporative emissions from multicomponent liquid spills. *Environmental Science and Technology*. 1982. №16. P. 726–728.
78. Інструкція з руху поїздів і маневрової роботи на залізницях України. ЦД-0058. К.: Транспорт України, 2005. 464 с
79. Кучумов Р.В. Требования к системе автоматического оперативного планирования управления перевозочным процессом на крупной станции.-

- СПб.: *Сборник трудов Петербургского гос. университета путей сообщения*. 2007. №3(12). С. 5–16.
80. Малашкін В. В. Підвищення ефективності функціонування залізничних станцій на основі реалізації раціональної черговості заходів по удосконаленню їх техніко-технологічних параметрів. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень*. 2014. №8. С. 100–109.
81. Бардась О.О. Удосконалення критерію вибору черговості розпуску составів з урахуванням завдань попереднього сортування вагонопотоків. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2013. №6. С. 5–9.
82. Dahlhaus E., Horak P., Miller M., Ryan J.F. The train marshalling problem. *Discrete Applied Mathematics*. 2000. №103(1–3). P. 41–54.
83. Бутько Т.В., Ломотько Д.В., Прохорченко А.В., Олійник К.О. Формування логістичної технології просування вантажопотоків за жорсткими нитками графіка руху поїздів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2009. №111. С. 23–31.
84. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: МГУ, 2011. 224 с.
85. Мацюк В. І. Дослідження технологічної надійності парків технічних станцій дискретно-подієвим моделюванням. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2015. № 26–27. С. 268–272.
86. Нестеренко Г.І., Музикін М.І., Горобець В.Л., Музикіна С.І. Дослідження структури вагонопотоків по прибутті та відправленні сортувальної станції Х. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. №1(61). С. 85–99.
87. Шульга А.М., Смахова Н.Г. Себестоимость железнодорожных перевозок : учебник для вузов. М.: Транспорт, 1985. 280 с.

88. Данько М.І., Бутько Т.В., Березань О.В., Кулешов В.М., Кулешов В.В., Калашникова Т.Ю., Малахова О.А., Лаврухін О.В., Сіконенко Г.М. Управління експлуатаційною роботою і якістю перевезень на залізничному транспорті: навчальний посібник. Харків: УкрДАЗТ. 2008. 174 с.
89. Практичні рекомендації щодо складання технологічного процесу роботи сортувальної станції, затверджені Наказом Укрзалізниці від 22.12.2009 р. № 715-Ц (ЦД-0081). – К.: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2010. 230 с.
90. Музикіна С.І., Музикін М.І., Нестеренко Г.І. Дослідження пропускної спроможності сортувальної станції. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2016. № 2. С. 47–60.
91. Matsiuk V. A study of the technological reliability of railway stations by an example of transit trains processing. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies: Control processes*. 2017. №(1). P. 12–17.
92. Мацюк В. І. Визначення оптимального місця концентрації технічної переробки місцевого вагонопотоку за критерієм відстані. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2010. №17. С. 249–255.
93. Ногин В.Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2008. №1. С. 98–112.
94. Edwards W., Barron F.H. SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organization behavior and human processes*. 1994. №(60). P. 306–325.
95. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология: учебное пособие. 2-е изд., стер. М.: Высшая школа, 1988. 208 с.
96. Chong Wu, Tao Wu, Kaiyuan Fu, Yuan Zhu, Yongbo Li, Wangyong He, Shengwen Tang. AMOBH: Adaptive multiobjective black hole algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2017. №(9). P. 1–19.

97. Kannan S., Baskar S., McCalley J.D., Murugan P. Application of NSGA-II Algorithm to Generation Expansion Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2009. №1(24). P. 454–461.
98. Khishtandar S., Zandieh M. Comparisons of some improving strategies on NSGA-II for multi-objective inventory system. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2017. №1(34). P. 61–69.
99. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. №2(6). P. 182–197.
100. Omagari H., Higashino S-I. Aspiration-point-based multi-objective path planning method for an unmanned aerial vehicle. *Transactions of the Japan society for aeronautical and space sciences, aerospace technology Japan*. 2017. №(15), P. a99–a108.
101. Saaty T.L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors – the analytic hierarchy/network process. *Review of the Royal Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, Series A: Mathematics*. 2008. №2(102). P. 251–318.
102. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*. 2015. №53. P. 49–57.
103. Triantaphyllou E.; Mann S.H. An examination of the effectiveness of multi-dimensional decision-making methods: a decision-making paradox. *International Journal of Decision Support Systems*. 1989. №(5). P. 303–312.
104. Tofallis C. Add or multiply? A tutorial on ranking and choosing with multiple criteria. *INFORMS Transactions on Education*. 2014. №3(14). P. 109–119.
105. Padhye M., Deb K. Multi-objective optimization and multi-criteria decision making for FDM using evolutionary approaches. *In: Multiobjective Evolutionary optimisation for Product Design and Manufacturing*. 2011. P. 219–247.

106. Branke J., Deb K., Dierolf H., Osswald M. Finding knees in multi-objective optimization. *Lecture Notes in Computer Science*. 2004. №2(3242). P. 722–731.
107. Ormazabal K.M. The law of diminishing marginal utility in alfred marshall's principles of economics. *European Journal of the History of Economic Thought*. 1995. №1(2). P. 91–126.
108. Hayhurst E.R. Review of industrial accident prevention: a scientific approach. *American Journal of Public Health and the Nation's Health*. 1932. №1(22). P. 119–120.
109. ISO 31000/2018 Risk Management – Guidelines. Geneva. Switzerland: International Organization for Standardization. Update: 10.10.2018. URL: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en> (access date 27.12.2018).
110. Dejax P., Crainic T. A review of empty flows and fleet management models in freight transportation. *Transportation Science*. 1987. №4(21). P. 227–248.
111. Sifaleras A. Minimum cost network flows: Problems, algorithms, and software. *Yugoslav journal of operations research*. 2013. №1(23). P. 3–17.
112. Laporte G., Toth P., Vigo D. Vehicle routing: historical perspective and recent contributions. *EURO Journal on Transportation and Logistics*. 2013. №2(1-2). P. 1–4.
113. Lei Z., He S., Song R., Cai J. Stochastic chance-constrained model and genetic algorithm for empty car distribution in railway transportation. *Journal of the China Railway Society*. 2005. №5(27). P. 1–5.
114. Zhang X., Zhang Q. Study on the optimization method of empty wagon distribution based on knowledge constraints. *Journal of the China Railway Society*. 2003. №6(25). P. 14–20.
115. Xiong H., Lu W., Wen H. Genetic algorithm used in railway empty car allocating problem. *China Railway Science*. 2002. №4(23). P. 118–121.

116. Wang D., Yan H., Tan Y. Network node of railway refrigerator empty car adjustment in ant colony algorithm. *China Railway Science*. 2008. №2(29). P. 131–135.
117. Ce Zhao, Lixing Yang, Shukai Li. Allocating Freight Empty Cars in Railway Networks with Dynamic Demands. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2014. №3. P. 1–12.
118. Guo P., Lin B., Yu Y. Section center optimization method in large-scaled network car deployment. *China Railway Science*. 2001. №2(22). P. 122–128.
119. Heydari R., Melachrinoudis E. A path-based capacitated network flow model for empty railcar distribution. *Annals of Operations Research*. 2017. №2(253). P. 773.
120. Rakhmangulov A.N., Kolga A.D., Osintsev N.A., Stolpovskikh I.N., Sladkowski A.V. Mathematical model of optimal empty rail car distribution at railway transport nodes. *Transport Problems*. 2014. №3(9). P. 125–132.
121. Wang H., Yan, Tan Y. Network node of railway refrigerator empty car adjustment in ant colony algorithm. *China Railway Science*. 2008. №2(29). P. 131–135.
122. Lin C.K.Y. A vehicle routing problem with pickup and delivery time windows, and coordination of transportable resources. *Computers & Operations Research*. 2011. №11(38). P. 1596–1609.
123. Chongshuang Chen, Twan Dollevoet, Jun Zhao. One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm. 2018. *Transportation Research Part B Methodological*. №118. P. 1–30.
124. Ahuja R.K., Jha K.C., Liu J. Solving Real-Life Railroad Blocking Problems. *Interfaces*. №5(37). P. 404–419.
125. Van Dyke C.D. The automated blocking model: A practical approach to freight railroad blocking plan development. *Transportation Research Forum*. 1986. №27. P. 116–122.

126. Thomet, A. A user-oriented freight railroad operating policy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1971. №1. P. 349–356.
127. Bodin L.D., Golden B.L., Schuster A.D., Romig W. A model for the blocking of trains. *Transportation Research, part B*. 1980. №14. P. 115–120.
128. Keaton, M.H. Designing railroad operating plans: A dual adjustment method for implementing Lagrangian relaxation. *Transportation Science*. 1992. №26. №263–279.
129. Keaton, M.H. Designing optimal railroad operating plans: Lagrangian relaxation and heuristic approaches. *Transportation Research, part B*. 1989. №23. №415–431.
130. Newton H.N., Barnhart C. Vance P.H. Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs. *Transportation Science*. 1998. №32. P. 330–345.
131. Assad A.A. Analysis of rail classification policies. *Information Systems and Operational Research*. 1983. №21. P. 293–314.
132. Gorman M.F., An application of genetic and tabu searches to the freight railroad operating plan problem. *Annals of Operations Researches*. 1998. №(78). P. 51–69.
133. Yang L., Gao Z., Li K. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness. *Applied Soft Computing*. 2010. №1(11). P. 778–792.
134. Ahuja R.K., Jha K.C., Liu J. Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*. 2007. № 5(37). P. 404–419.
135. Jha K.C., Ahuja R.K., Şahin G. New approaches for solving the block-to-train assignment problem. *Networks*. 2008. №1(51). P. 48–62.
136. Hasany R.M., Shafahi Y. Two-stage stochastic programming for the railroad blocking problem with uncertain demand and supply resources. *Computers & Industrial Engineering*. 2017. №106. P. 275–86.
137. Yaghini M., Foroughi A., Nadjari B. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*. 2011. №12(35). P. 5579–5591.

138. Chen C., Dollevoet T., Zhao J. One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018. №118. P. 1–30.
139. Martinelli D.R. Teng H. Neural Network Approach for Solving the Train Formation Problem. *Transportation Research Record*. 1994. №1470. P. 38–46.
140. Шабалин, Н. Н. Оптимизация процесса переработки вагонов на станциях. М.: Транспорт, 1973. 184 с.
141. Кудрявцев В.А. Способ расчета плана формирования одногруппных поездов. *Железнодорожный транспорт*. 2004. №(5). С. 46–50.
142. Кудрявцев В.А. Расчет плана формирования одногруппных технических маршрутов методом последовательного укрупнения струй вагонопотоков: учебное пособие. СПб: Петербургский государственный университет путей сообщения. 2003. 36 с.
143. Кириченко Г.І. Стрелко О.Г., Бердниченко Ю.А., Макарова О.О. Організація роботи сортувальної станції в умовах автоматизації. Збірник наукових праць *Державного економіко-технологічного університету транспорту: серія Транспортні системи і технології*. 2013. №23. С. 150–154.
144. Макарова В.А. Анализ и оценка экономической эффективности риск-менеджмента. *Эффективное антикризисное управление*. 2015. № 3. С. 72–83.
145. Балака Є.І., Зоріна О.І., Колеснікова І.М. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті : навч. посіб. Харків :Транспорт, 2005. 186 с.