

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СМІРНОВ АНАТОЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 625.768.5:004.942

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО
УТРИМАННЯ ДОРІГ У ЗИМОВИЙ ПЕРІОД

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ: 192 – БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ: АРХІТЕКТУРА ТА БУДІВНИЦТВО

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.М. Смірнов

Наукові керівники –
Харченко Анна Миколаївна
доктор технічних наук,
професор

Токін Олександр Павлович
кандидат технічних наук,
доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Смірнов А.М. Удосконалення технології експлуатаційного утримання доріг у зимовий період. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Національний транспортний університет, Київ, 2025.

У дисертаційній роботі розглянуто технологічні заходи та процеси боротьби з зимовою слизькістю на мережі автомобільних доріг. Наведено аналіз основних методів обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період за рахунок оптимізації ресурсів та маршрутизації спецтехніки. Виконано аналіз технологій та моделей утримання автомобільних доріг у зимовий період з урахуванням світового досвіду. Досліджено процеси управління витратами протиожеледних матеріалів при зимовому утриманні автомобільних доріг. Головною гіпотезою дослідження є застосування методів математичного моделювання до оптимізації витрат протиожеледних матеріалів, що дозволить удосконалити технологію зимового утримання автомобільних доріг. В дослідженні розглянуто фактори, які впливають на застосування як окремого виду, так і в цілому протиожеледних матеріалів. Визначено, що суттєвими факторами є температура покриття автомобільної дороги та обрана стратегія зимового утримання з урахуванням рівня обслуговування. Запропоновано для удосконалення технології зимового утримання застосувати математичну модель оптимізації витрат матеріалів, яка базується на двійковій системі числення. Встановлено додаткові обмеження до моделі, які визначають її технологічні параметри, зокрема, до них відносяться: відповідність критеріям надійності, збереження активів, безпеці дорожнього руху, відповідності очікуванням користувачів (соціальний фактор), екологічності, ефективності застосування матеріалів.

Визначено, що оцінка технологічних заходів зимового утримання доріг, що виконується у різних країнах, приймає різноманітні форми відповідно до: індикатору якості або стандарту; обліку та аналізу витрат; організованої системи управління; стандартів з огляду та моніторингу робіт; вимірювання відповідності надання послуг; аналізу скарг від користувачів дорожньої мережі; методів прогнозування та запобігання певних зимових явищ. Запропоновано використовувати для оцінки серйозності впливу погоди на зимове утримання, як технологічне рішення, індекс WSI (FHWA), який розраховується на підставі усередненого значення обсягу щоденного снігопаду, а також зафіксованої мінімальної та максимальної температур в середньому за сезон. Рекомендовано результати прогнозування опадів та рівень індексу WSI використовувати як підставу для визначення експлуатаційного рівня обслуговування, який формує набір потенційних заходів з зимового утримання доріг. Запропоновано виконувати обґрунтування рівня обслуговування за моделями зимового утримання, а також здійснювати прогнозування технологічних заходів, які дозволяють сформувати методичний підхід до утримання автомобільних доріг.

Розроблено методичний підхід використання удосконаленої технології, який ґрунтується на застосуванні математичної моделі утримання доріг у зимовий період, що є функцією мінімізації накопичених показників якості зимового утримання елементів дороги залежно від їх ваги для утримання. Побудовано послідовність (алгоритм) застосування удосконаленої технології зимового утримання автомобільних доріг. Визначено, що удосконалена технологія вирішує основну задачу мінімізації витрат протиожезедних матеріалів з урахуванням вимог рівня обслуговування, обраної стратегії, температури покриття автомобільної дороги та критеріїв впливу на зимове утримання. Для чисельної реалізації розрахунку витрат протиожезедних матеріалів за методом, що становить основу удосконаленої технології зимового утримання доріг, може бути застосоване програмне забезпечення з вбудованим

функціоналом пошуку рішення. Отримані результати за методом оптимізації, що базуються на реальних даних, показали можливість економії матеріалів близько 23 %, що підтверджує ефективність запропонованих рішень.

Результати розрахунків за математичною моделлю оптимізації витрат матеріалів мають практичну цінність та можуть слугувати інструментом для прийняття управлінських рішень щодо обґрунтування операцій з зимового утримання доріг. Запропоновані технологічні рішення можуть бути використані як для фази планування витрат, так для аналізу в поствиконавчий період. Це є важливим аспектом в умовах фінансової та ресурсної невизначеності, в тому числі, що пов'язано з обставинами непереборної сили, зокрема, воєнного стану в Україні.

Ключові слова: зимове утримання, слизькість, протижеледних матеріали, дорожнє покриття, експлуатаційний стан, рівень обслуговування, автомобільна дорога, погодні умови, снігоочисна техніка, транспортний потік, маршрутизація.

Список публікацій здобувача

Статті у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Kharchenko, A., Tsybulskyi, V., Sokolova, N., Shpyh, A., Kanin, A., Smirnov, O., & Smirnov, A. (2025). Devising a methodological approach to prioritizing road sections for maintenance work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (137), 83–95.

Quartile – Q3

(<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100450083&tip=sid&clean=0>)

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341939

URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/341939/330583>

ISSN 1729-3774 (Print)

ISSN 1729-4061 (Online)

2. Kharchenko, A., & Smirnov, A. (2023). Development of method for anti-icing materials consumption optimization during winter road maintenance. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(70), 19–23.

DOI: 10.15587/2706-5448.2023.278120

URL: <https://journals.urau.ua/tarp/article/view/278120>

ISSN 2226-3780 (print)

ISSN 2312-8372(on-line)

Статті у фахових виданнях:

3. Смірнов А.М. Розробка методичного підходу до утримання автомобільних доріг у зимовий період з урахуванням світового досвіду. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*, Київ, 2022. Вип. 111. С. 92-98.

DOI: 10.33744/0365-8171-2022-111-092-098

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/111/92-98.pdf

ISSN 0365-8171 (Print)

ISSN 2707-4080 (Online)

Статті, які додатково висвітлюють результати дисертаційного дослідження:

4. Tokin, O., & Smirnov, A. (2023). Development Of A Mathematical Model Of Vehicle Routing During Winter Road Infrastructure Maintenance. *Scientific Journal of Polonia University*, 60(5), 122-127.

DOI: 10.23856/6014

URL: <http://pnap.ap.edu.pl/index.php/pnap/article/view/1206>

ISSN 2957-1898 (Print)

ISSN 2957-2096 (Online)

5. Харченко А.М., Смірнов А.М. Основні дослідження в напрямку обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період.

Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», Київ, 2017.
Вип. 102. С. 131-143.

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/102/131-143.pdf

ISSN 0365-8171 (Print)

ISSN 2707-4080 (Online)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Смірнов А., Токін О. Сфера застосування інноваційної техніки та обладнання при зимовому утриманні доріг. *International scientific conference «Processes of globalisation and transformation »*. Riga, 2023. Р. 40-41.

DOI: 10.30525/978-9934-26-309-5-12

URL:

<http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/324/8952/18742-1>

ISBN: 978-9934-26-309-5

7. Токін О.П., Смірнов А.М. Перспективи використання комбінованої снігоочисної техніки в утриманні доріг. Збірник тез *Міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво»*. Одеса, 2023. С. 127-130.

URL:

https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_tez_konferentsii_GTB_2023.pdf

8. Смірнов А.М. Особливості зимового утримання доріг в різних країнах світу. *International scientific conference «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukrain and the European Union»*. the Republic of Poland, 2022. С. 63-66.

DOI: 10.46299/ISG.2022.2.14

URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/12/Modern-stages-of-scientific-research-development.pdf>

ISBN 979-8-88862-818-8

9. Смірнов А.М. Аналіз світового досвіду утримання автомобільних доріг у зимовий період. *International scientific and practical conference «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects»*. Prague, 2021. С. 109-111.

DOI: 10.30525/978-9934-26-109-1-26

URL: <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/147/4397/9179-1>

ISBN: 978-9934-26-109-1

10. Харченко А.М., Смірнов А.М., Наumenко Е.А. Зимове утримання автомобільних доріг: досвід США. *LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету: тези доповідей*. К.: НТУ, 2021. С. 151.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view

11. Харченко А.М., Смірнов А.М. Досвід США з зимового утримання доріг. *LXXVI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету, присвячена 75-річчю з дня заснування університету: тези доповідей*. К.: НТУ, 2020. С. 135.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWIV/view>

12. Смірнов А.М. Підвищення продуктивності бригад з утримання доріг. *Ювілейна LXXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних*

підрозділів Національного транспортного університету : тези доповідей. Том 2 - К.: НТУ, 2019. С. 168.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL:

<https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtiHzjtrjsf/view>

13. Харченко А.М., Смірнов А.М. Вплив даних метеозведень на боротьбу з зимовою слизькістю на дорогах. *LXXIV Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету*: тези доповідей. К.: НТУ, 2018. С. 189.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL:

https://drive.google.com/file/d/1_uA1WGugEVOGtLukG_ZMX71VgXPIq98l/view

14. Смірнов А.М. Підготовка дорожніх організацій до зимового утримання доріг. *V міжнародна науково-практична конференція «Економічний розвиток: теорія, методологія, управління»*: збірник наукових праць та тез наукових доповідей. Прага, 2018. С. 261-263.

ISBN 978-617-673-833-6

URL: <https://surl.li/sqwoex>

Свідоцтва та патенти:

15. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір. № 120057. Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Методичний підхід до утримання автомобільних доріг у зимовий період». Харченко А.М., Смірнов А.М. Дата реєстрації 26.06.2023 р.

16. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір. № 120343. Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період». Харченко А.М., Смірнов А.М. Дата реєстрації 06.07.2023 р.

ABSTRACT

Smirnov A.M. Improving the technology of operational maintenance of roads in the winter period. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 “Construction and Civil Engineering”. – National Transport University, Kyiv, 2025.

The dissertation considers technological measures and processes for combating winter slipperiness on the road network. An analysis of the main methods for substantiating the levels of road maintenance in the winter period is presented by optimizing resources and routing special equipment. An analysis of technologies and models of road maintenance in the winter period is performed taking into account world experience. The processes of managing the costs of deicing materials during winter maintenance of roads are investigated. The main hypothesis of the study is the application of mathematical modeling methods to optimizing the costs of deicing materials, which will allow improving the technology of winter maintenance of roads. The study examined factors that influence the use of both individual types and deicing materials in general. It was determined that the significant factors are the temperature of the road surface and the selected winter maintenance strategy taking into account the level of service. It was proposed to apply a mathematical model of material consumption optimization based on the binary number system to improve winter maintenance technology. Additional restrictions were established for the model that determine its technological parameters, in particular, these include: compliance with the criteria of reliability, asset preservation, road safety, compliance with user expectations (social factor), environmental friendliness, and efficiency of material use.

It was determined that the assessment of technological measures for winter road maintenance performed in different countries takes various forms according to: a quality indicator or standard; accounting and analysis of costs; an organized

management system; standards for reviewing and monitoring work; measuring the conformity of service provision; analysis of complaints from road network users; methods for predicting and preventing certain winter phenomena. It is proposed to use the WSI index (FHWA) as a technological solution to assess the severity of the weather impact on winter maintenance, which is calculated based on the average value of the volume of daily snowfall, as well as the recorded minimum and maximum temperatures on average for the season. It is recommended to use the results of precipitation forecasting and the WSI index level as a basis for determining the operational level of service, which forms a set of potential measures for winter road maintenance. It is proposed to perform a justification of the level of service according to winter maintenance models, as well as to forecast technological measures that allow forming a methodological approach to road maintenance.

A methodological approach to using advanced technology has been developed, which is based on the application of a mathematical model of road maintenance in the winter period, which is a function of minimizing the accumulated indicators of the quality of winter maintenance of road elements depending on their weight for maintenance. A sequence (algorithm) for applying advanced technology for winter road maintenance has been constructed. It was determined that the improved technology solves the main problem of minimizing the cost of deicing materials, taking into account the requirements of the level of service, the chosen strategy, the temperature of the road surface and the criteria for influencing winter maintenance. For the numerical implementation of the calculation of the cost of deicing materials using the method that forms the basis of the improved technology for winter road maintenance, it is proposed to use the analytical toolkit Solver functionality of the software environment. The results obtained using the optimization method, based on real data, showed the possibility of saving materials by about 23%, which confirms the effectiveness of the proposed solutions. The results of calculations using the mathematical model for optimizing material costs have practical value and can serve as a tool for making management decisions regarding the justification of winter road

maintenance operations. The proposed technological solutions can be used both for the cost planning phase and for analysis in the post-implementation period. This is an important aspect in conditions of financial and resource uncertainty, including those associated with force majeure circumstances, in particular, martial law in Ukraine.

Keywords: winter maintenance, slipperiness, deicing materials, road surface, operational condition, level of service, highway, weather conditions, snow removal equipment, traffic flow, routing.

List of applicant's publications

Articles in publications included in international scientometric databases:

1. Kharchenko, A., Tsybulskyi, V., Sokolova, N., Shpyh, A., Kanin, A., Smirnov, O., & Smirnov, A. (2025). Devising a methodological approach to prioritizing road sections for maintenance work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (137), 83–95.

Quartile – Q3

(<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100450083&tip=sid&clean=0>)

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341939

URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/341939/330583>

ISSN 1729-3774 (Print)

ISSN 1729-4061 (Online)

2. Kharchenko, A., & Smirnov, A. (2023). Development of method for anti-icing materials consumption optimization during winter road maintenance. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(70), 19–23.

DOI: 10.15587/2706-5448.2023.278120

URL: <https://journals.uran.ua/tarp/article/view/278120>

ISSN 2226-3780 (print)

ISSN 2312-8372(on-line)

Articles in professional publications:

3. Смірнов А.М. Розробка методичного підходу до утримання автомобільних доріг у зимовий період з урахуванням світового досвіду. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*, Київ, 2022. Вип. 111. С. 92-98.

DOI: 10.33744/0365-8171-2022-111-092-098

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/111/92-98.pdf

ISSN 0365-8171 (Print)

ISSN 2707-4080 (Online)

Articles that further highlight the results of the dissertation research:

4. Tokin, O., & Smirnov, A. (2023). Development Of A Mathematical Model Of Vehicle Routing During Winter Road Infrastructure Maintenance. *Scientific Journal of Polonia University*, 60(5), 122-127.

DOI: 10.23856/6014

URL: <http://pnap.ap.edu.pl/index.php/pnap/article/view/1206>

ISSN 2957-1898 (Print)

ISSN 2957-2096 (Online)

5. Харченко А.М., Смірнов А.М. Основні дослідження в напрямку обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*, Київ, 2017. Вип. 102. С. 131-143.

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/102/131-143.pdf

ISSN 0365-8171 (Print)

ISSN 2707-4080 (Online)

Published works of an approbatory nature:

6. Смірнов А., Токін О. Сфера застосування інноваційної техніки та обладнання при зимовому утриманні доріг. *International scientific conference «Processes of globalisation and transformation»*. Riga, 2023. P. 40-41.

DOI: 10.30525/978-9934-26-309-5-12

URL:

<http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/324/8952/18742-1>

ISBN: 978-9934-26-309-5

7. Токін О.П., Смірнов А.М. Перспективи використання комбінованої снігоочисної техніки в утриманні доріг. Збірник тез *Міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво»*. Одеса, 2023. С. 127-130.

URL:

https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_tez_konferentsii_GTB_2023.pdf

8. Смірнов А.М. Особливості зимового утримання доріг в різних країнах світу. *International scientific conference «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukrain and the European Union»*. the Republic of Poland, 2022. С. 63-66.

DOI: 10.46299/ISG.2022.2.14

URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/12/Modern-stages-of-scientific-research-development.pdf>

ISBN 979-8-88862-818-8

9. Смірнов А.М. Аналіз світового досвіду утримання автомобільних доріг у зимовий період. *International scientific and practical conference «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects»*. Prague, 2021. С. 109-111.

DOI: 10.30525/978-9934-26-109-1-26

URL: <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/147/4397/9179-1>

ISBN: 978-9934-26-109-1

10. Харченко А.М., Смірнов А.М., Науменко Е.А. Зимове утримання автомобільних доріг: досвід США. *LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету*: тези доповідей. К.: НТУ, 2021. С. 151.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view

11. Харченко А.М., Смірнов А.М. Досвід США з зимового утримання доріг. *LXXVI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету, присвячена 75-річчю з дня заснування університету*: тези доповідей. К.: НТУ, 2020. С. 135.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWIV/view>

12. Смірнов А.М. Підвищення продуктивності бригад з утримання доріг. *Ювілейна LXXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. Том 2 - К.: НТУ, 2019. С. 168.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL:

<https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view>

13. Харченко А.М., Смірнов А.М. Вплив даних метеозведень на боротьбу з зимовою слизькістю на дорогах. *LXXIV Наукова конференція*

професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету: тези доповідей. К.: НТУ, 2018. С. 189.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL:

https://drive.google.com/file/d/1_uA1WGugEVOGtLukG_ZMX71VgXPIq98l/view

14. Смірнов А.М. Підготовка дорожніх організацій до зимового утримання доріг. *У міжнародна науково-практична конференція «Економічний розвиток: теорія, методологія, управління»*: збірник наукових праць та тез наукових доповідей. Прага, 2018. С. 261-263.

ISBN 978-617-673-833-6

URL: <https://surl.li/sqwoex>

Certificates and patents:

15. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір. № 120057. Україна. Літературний письмовий твір науково го характеру «Методичний підхід до утримання автомобільних доріг у зимовий період». Харченко А.М., Смірнов А.М. Дата реєстрації 26.06.2023 р.

16. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір. № 120343. Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період». Харченко А.М., Смірнов А.М. Дата реєстрації 06.07.2023 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАХОДИ БОРОТЬБИ З ЗИМОВОЮ СЛИЗКІСТЮ НА МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ.....	26
1.1 Нормативно-правова база та основні дослідження в напрямку обґрунтування технологічних заходів та методів боротьби із зимовою слизкістю.....	26
1.2 Проблеми обґрунтування рівнів обслуговування доріг у зимовий період.....	32
1.3 Зарубіжний досвід зимового утримання автомобільних доріг в різних країнах світу.....	37
Висновки до розділу 1.....	47
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ СПЕЦТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗИМОВОГО УТРИМАННЯ ДОРІГ.....	49
2.1 Аналіз сучасних технологій зимового утримання автомобільних доріг.....	49
2.2 Оцінка впливу технологічних параметрів – зимових гідрометеорологічних факторів на експлуатаційний стан дорожнього покриття та безпеку руху.....	52
2.3 Постановка проблеми маршрутизації спецтехніки з зимового утримання доріг.....	57
2.4 Методи оптимізації витрат протиожеледних матеріалів	76
Висновки до розділу 2.....	80

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО УТРИМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У ЗИМОВИЙ ПЕРІОД.....	82
3.1 Формування математичної моделі обґрунтування рівня обслуговування доріг з урахуванням зимових гідрометеорологічних чинників.....	82
3.2. Обґрунтування вдосконаленої технології застосування протиожедних матеріалів та оптимізація маршрутів снігоприбиральної техніки.....	89
3.3 Адаптація вдосконаленої технології до проєктів довгострокового експлуатаційного утримання доріг у зимовий період.....	97
Висновки до розділу 3.....	102
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ З БОРотьБИ З ЗИМОВОЮ СЛИЗКІСТЮ НА МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ.....	104
4.1 Визначення технолонічних параметрів витрат протиожедних матеріалів за запропонованим методом.....	104
4.2 Послідовність прийняття рішень за моделлю зимового утримання мережі автомобільних доріг.....	112
4.3. Визначення економічної та соціальної ефективності від впровадження запропонованих технологічних рішень	119
Висновки до розділу 4.....	127
ВИСНОВКИ.....	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	133
ДОДАТОК А ФРАГМЕНТ ДЕТАЛІЗОВАНОЇ ТАБЛИЦІ РІВНІВ ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	145

ДОДАТОК Б ФРАГМЕНТ СТАТИСТИЧНОЇ ТАБЛИЦІ ЗИМОВОГО УТРИМАННЯ ДОРІГ В М. КИЄВІ.....	152
ДОДАТОК В ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ ТА АВТОРСЬКІ СВІДОЦТВА.....	154
ДОДАТОК Г СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	162

ВСТУП

Актуальність теми. Утримання автомобільних доріг є найдовшою фазою життєвого циклу. Важливою особливістю утримання є його сезонність та необхідність врахування клімату території обслуговування мережі доріг. Суворі погодні умови, такі як снігопади, ожеледь та ожеледиця, знижують безпеку дорожнього руху, якість перевезень, пропускну здатність доріг. Таким чином, особливо для північних та західних регіонів України важливим для забезпечення безпеки дорожнього руху, мобільності та продуктивності транспортних систем є оптимізація операцій з зимового утримання доріг.

За даними Українського гідрометеорологічного центру Державної служби з надзвичайних ситуацій України понад 70 відсотків доріг країни розташовані в регіонах з періодичними сніговими опадами в зимовий період зі сніговим покривом щонайменше 30-40 мм. Боротьба зі сніговими опадами та їх наслідками для дорожніх організацій є складним процесом, що потребує координації роботи спеціалізованих бригад, застосування сучасних технологій, техніки та матеріалів. Найважливішими задачами дорожніх служб є оптимізація витрат протиожеледних матеріалів; раціональна маршрутизація спецтехніки по зимовому утриманню доріг; виконання встановлених рівнів обслуговування доріг з метою забезпечення безпеки та комфорту дорожнього руху.

Удосконалення технології експлуатаційного утримання автомобільних доріг у зимовий період дасть змогу мінімізувати соціальні, економічні та екологічні наслідки від застосування хімічних реагентів, солі та абразивів, а також знизить ризик настання дорожньо-транспортних пригод за рахунок обґрунтованого вибору найбільш оптимальної стратегії зимового утримання доріг.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Наукові результати роботи одержані в процесі виконання:

- плану науково-дослідних робіт кафедри транспортного будівництва та

управління майном Національного транспортного університету «Удосконалення системи управління станом автомобільних доріг та методів їх оцінки» (РК 0116U002491);

– плану науково-дослідних робіт Державного агентства автомобільних доріг України «Провести дослідження та розробити національні стандарти щодо експлуатаційних рівнів обслуговування елементів автомобільних доріг та їх обґрунтування при реалізації довгострокових контрактів на експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування» (договір № 98-17, РК 0117U005111).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є удосконалення технології експлуатаційного утримання автомобільних доріг у зимовий період шляхом розробки комплексної моделі, яка включає оптимізацію маршрутизації спецтехніки та обґрунтування раціонального застосування протиожеледних матеріалів, що забезпечить підвищення рівня обслуговування та економічної ефективності.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження були поставлені такі **задачі:**

1. Провести критичний аналіз нормативно-правової бази та існуючого світового досвіду зимового утримання доріг, ідентифікувати ключові проблеми технології утримання та обґрунтування рівнів обслуговування в умовах української дорожньої мережі.

2. Визначити та обґрунтувати основні технологічні параметри зимового утримання доріг. Систематизувати та оцінити вплив основних зимових гідрометеорологічних факторів на експлуатаційний стан дорожнього покриття та сформулювати вимоги до інформаційного забезпечення. Розробити математичну модель обґрунтування рівня обслуговування доріг у зимовий період, що враховує динаміку зимових гідрометеорологічних чинників, для підтримки прийняття рішень.

3. Обґрунтувати вдосконалену технологію зимового утримання,

включаючи оптимізацію норм застосування протиожеледних матеріалів та розробити алгоритм оптимальної маршрутизації спецтехніки для мінімізації часу реакції та витрат. Розробити послідовність (алгоритм) прийняття рішень щодо зимового утримання, інтегруючи прогностичну модель, рівні обслуговування та результати маршрутизації.

4. Запропонувати практичні рекомендації із застосування удосконаленої технології на практиці за рахунок результатів її апробації за реальними даними, а також визначити економічну та соціальну ефективність від її впровадження.

Об’єкт дослідження – технологічні заходи та процес експлуатаційного утримання мережі автомобільних доріг у зимовий період.

Предмет дослідження – сукупність теоретичних, методичних та технологічних положень, спрямованих на підвищення ефективності експлуатаційного утримання автомобільних доріг у зимовий період.

Методи дослідження – системний аналіз та синтез (використовувався для аналізу нормативно-правової бази, існуючих технологій та зарубіжного досвіду (розділ 1, 2) та для формулювання загальної концепції удосконаленої технології); методи теорії ймовірностей та математичного моделювання (застосовувалися для формування прогностичної моделі стану дорожнього покриття у зимовий період (розділ 3.1) та для формалізації проблеми маршрутизації спецтехніки); методи оптимізації та дослідження операцій (використовувалися для розробки алгоритму оптимальної маршрутизації з урахуванням обмежень та рівнів обслуговування (розділ 3.2, 4.2)); експериментально-польові та статистичні методи (застосовувалися для збору вихідних даних, обробки результатів апробації та статистичного підтвердження гіпотез); економіко-математичне моделювання (використовувався для оцінки економічної та соціальної ефективності удосконаленої технології за методом «вигоди – витрати»).

Наукова новизна дисертації полягає в наступному:

Вперше розроблено математичну модель обґрунтування рівня обслуговування доріг у зимовий період, яка, на відміну від існуючих, ґрунтується на динамічній оцінці факторів впливу та інтегрує прогностичні дані дорожніх метеорологічних інформаційних систем для визначення пріоритетів обслуговування;

Удосконалено метод оптимізації витрат протиожеледних матеріалів при зимовому утриманні автомобільних доріг, що комплексно враховує синергійний вплив технологічних параметрів – змінних зимових гідрометеорологічних чинників для превентивного ухвалення рішень;

Набула подальшого розвитку технологічна послідовність оптимізації маршрутизації спецтехніки при зимовому утриманні, який, на відміну від аналогів, одночасно мінімізує загальний пробіг та час реакції на виникнення слизькості, гарантуючи при цьому досягнення необхідного рівня обслуговування.

Практичне значення отриманих результатів.

Практична цінність результатів дослідження підтверджується можливістю їхньої безпосередньої імплементації:

1. Удосконалена технологія зимового утримання доріг та алгоритм прийняття рішень можуть бути впроваджені в роботу дорожньо-експлуатаційних організацій, що дозволить перейти до проактивного, превентивного утримання, знизити аварійність і підвищити безпеку руху.

2. Математична модель обґрунтування рівня обслуговування доріг у зимовий період може бути інтегрована у спеціалізоване програмне забезпечення ситуаційних центрів.

3. Методичні рекомендації щодо розрахунку потреби в протиожеледних матеріалах та оптимізації маршрутів дозволять досягти значної економії бюджетних коштів (за рахунок зменшення витрат реагентів та пального) при одночасному підвищенні якості послуг.

4. Сформовані положення щодо адаптації технології до довгострокових

контрактів можуть бути використані органами управління дорожнім господарством при плануванні закупівель та формуванні умов тендерної документації.

Результати дослідження впроваджено в роботу компаній та організацій, діяльність яких пов'язана з експлуатаційним утриманням доріг у зимовий період, що підтверджується відповідними актами про впровадження, а також в освітній процес в Національному транспортному університеті при підготовці фахівців за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (ОПП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів») як вихідні дані та методичні вказівки при виконанні курсових проектів студентами щодо розрахунку потреб у техніці та реагентах для зимового утримання (довідка №2749/02 від 03.11.2025 р.).

Особистий внесок здобувача.

Отримані автором результати теоретичних і прикладних досліджень, які виносяться на захист, відображені у публікаціях, оприлюднених у фахових виданнях, а також у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз.

У публікаціях [3, 5, 8–14, додаток Г] аспірантом Смірновим А.М. було: визначено та систематизовано основні технологічні параметри – гідрометеорологічні чинники, що впливають на якість та безпеку дорожнього руху в зимовий період, а також проаналізовано відповідну нормативно-правову базу; досліджено та узагальнено світовий досвід організації зимового утримання доріг, зокрема, досвід США, з акцентом на обґрунтування рівнів обслуговування та підготовку дорожніх організацій; сформульовано основні проблеми застосування рівнів обслуговування в українській практиці та обґрунтовано необхідність адаптації інноваційних підходів (вплив даних метеозведень, застосування комбінованої техніки). За результатами досліджень, відображених у публікаціях [1, 2, 4, 15, 16, додаток Г], здобувачем безпосередньо або у співавторстві було: розроблено методичний підхід до утримання автомобільних доріг у зимовий період, який враховує світовий

досвід та особливості національної мережі [3, 15, додаток Г]; сформовано модель оптимізації витрат протиожедних матеріалів під час зимового утримання доріг, що має вирішальне значення в умовах невизначеності [2, додаток Г]; розроблено математичну модель маршрутизації спецтехніки (Vehicle Routing Problem) при виконанні робіт з зимового утримання дорожньої інфраструктури [4, додаток Г], як складову запропонованої технології; обґрунтовано концептуальні основи рівнів обслуговування автомобільних доріг у зимовий період, що підтверджено свідоцтвом про реєстрацію авторського права [5, 16, додаток Г]; взято участь у розробці методологічного підходу до пріоритезації ділянок доріг для виконання експлуатаційних робіт [1, додаток Г]. Результати досліджень були апробовані на міжнародних та національних конференціях [6, 7, додаток Г], де здобувачем було: визначено сферу застосування інноваційної техніки та обладнання для підвищення продуктивності бригад з утримання доріг [6, 7, 12, додаток Г]; обґрунтовано перспективи використання комбінованої снігоочисної техніки в контексті вдосконаленої технології [7, додаток Г].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях професорсько-викладацького складу Національного транспортного університету №№ 74-77 в 2018-2021 рр.; на V міжнародна науково-практична конференція «Економічний розвиток: теорія, методологія, управління» в 2018 р., на Міжнародних конференціях: International scientific and practical conference «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects» в 2021 р., International scientific conference «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukrain and the European Union» в 2022 р., International scientific conference «Processes of globalisation and transformation» в 2023 р., Міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво» в 2023 р.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено у

14 публікаціях: 2 статті у виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, 1 стаття у фаховому виданні, 2 статті додатково висвітлюють результати наукових досліджень, 9 праць апробаційного характеру. За матеріалами дисертаційних досліджень отримано 2 охоронних документів (свідоцтва України про реєстрацію авторського права).

Структура дисертації. Дисертація викладена на 167 сторінках та складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел із 102 найменувань, а також чотирьох додатків. Основний текст викладений на 114 сторінках. Текст ілюструється 17 рисунками і містить 21 таблицю.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАХОДИ БОРОТЬБИ З ЗИМОВОЮ СЛИЗКІСТЮ НА МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

1.1 Нормативно-правова база та основні дослідження в напрямку обґрунтування технологічних заходів та методів боротьби із зимовою слизькістю

Зимове утримання доріг в Україні, згідно з «Єдиними правилами зимового утримання автомобільних доріг» ПГ.1-218-118 [1], визначає комплекс робіт, які проводяться дорожньо-експлуатаційними організаціями для забезпечення безперебійного та безпечного руху на автомобільних дорогах у зимовий період, і включають очистку доріг від снігу, їх захист від снігових заносів і боротьбу з зимовою слизькістю. Ці оперативні заходи значно впливають на безпеку руху, доступність, транспортні витрати та навколишнє середовище і, крім того, дуже витратні для організацій, що займаються експлуатаційним утриманням доріг. Тому розробка ефективних стратегій та методів оперативних заходів по боротьбі з зимовою слизькістю, що ґрунтуються на накопиченні історичних даних, знань та досвіду експертів про наслідки й витрати, пов'язані з забезпеченням різних зимових рівнів обслуговування автомобільних доріг для учасників дорожнього руху та експлуатаційних організацій, є актуальною в сучасних умовах.

Зимове експлуатаційне утримання доріг включає специфічні операції, пов'язані з сезонною проблемою – боротьбою з зимовою слизькістю. Ці операції включають розповсюдження хімічних реагентів та абразивних матеріалів, прибирання снігу та льоду, вивезення снігу до місць утилізації та ін. (рис.1.1). У п.5.2 «Змін до Технічних правил ремонту і утримання вулиць та доріг населених пунктів» [2], затверджених наказом № 297 Міністерства розвитку

громад та територій України від 07.12.2020, визначено, що роботи, які виконуються дорожніми організаціями у зимовий період, можна умовно поділити на наступні групи: снігоочищення, видалення снігу та сколу, боротьба із слизькістю доріг, ліквідація ожеледі. При цьому в Україні в ДСТУ 8853:2019 «Матеріали протиожеледні для автомобільних доріг. Технічні умови» [3] встановлено вимоги до протиожеледних матеріалів для боротьби із зимовою слизькістю, а у Посібнику до ДСТУ 8853:2019 [4] – неведені рекомендації щодо практичного застосування сучасних матеріалів, зазначених у ДСТУ.

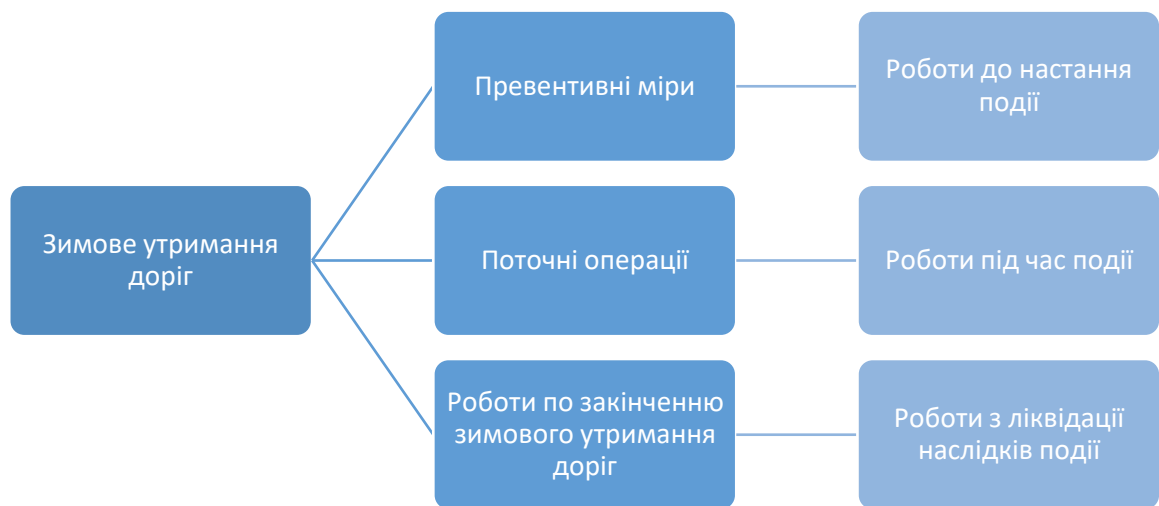


Рисунок 1.1 – Традиційний перелік робіт з зимового утримання доріг

Основною метою проведення робіт з утримання доріг в зимових умовах є усунення зимової слизькості на покритті у встановлені терміни, забезпечення можливості проїзду автомобільного транспорту, забезпечення необхідного зчеплення шин з поверхнею в місцях ускладнення руху за рахунок застосування протиожеледних матеріалів.

У зимовий період на автомобільних дорогах можливе утворення наступних основних видів зимової слизькості:

- пухкий сніг (який щойно випав або неущільнений рухом) переважно без опадів;
- накат (ущільнений рухом транспорту сніг аж до утворення за певних умов льодових поверхонь);
- ожеледиця (склоподібний лід), утворюється внаслідок замерзання рідких опадів на охолодженому покритті.

Всі види зимової слизькості значно знижують коефіцієнт зчеплення шин з поверхнею покриття, тому одним з основних завдань зимового утримання є боротьба із зимовою слизькістю.

Вимоги до транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг в зимовий період експлуатації та терміни снігоочищення доріг і ліквідації зимової слизькості визначаються за ДСТУ 3587 «Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану» [5], іншими державними стандартами з урахуванням народногосподарського та адміністративного значення дороги, оснащеності дорожньо-експлуатаційної служби необхідними машинами, обладнанням та матеріалами згідно П Г.1-218-113:2009 «Технічні правила ремонтів та утримання автомобільних доріг загального користування України» [6]. Також аспекти утримання автомобільних доріг у зимовий період стосовно забезпечення належного експлуатаційного стану висвітлені у «Змінах до Технічних правил ремонту і утримання вулиць та доріг населених пунктів» [2], ДСТУ 9185:2022 «Настанові щодо зимового утримування автомобільних доріг» [7].

Зимове утримання автомобільних доріг загального користування в Україні згідно П Г.1-218-113:2009 «Технічні правила ремонтів та утримання автомобільних доріг загального користування України» нормується за складністю робіт [6]:

- ступінь складності 1 – роботи виконуються в звичайному режимі з метою усунення незначних перешкод дорожньому руху силами і засобами, які є в наявності (снігоочищення, розподілення протиожеледних матеріалів);

- ступінь складності 2 – виникнення небезпеки появи перешкод руху на автомобільних дорогах (сильні снігопади та ожеледиця);
- ступінь складності 3 – можливість проїзду по дорогам знаходиться під загрозою зупинення (при хуртовинах з швидкістю вітру більше ніж 9 м/с та тривалістю більше двох діб; снігопадах інтенсивністю більше за 5 см/годину та тривалістю більше ніж 6 годин, а також при створенні ожеледі на великій протяжності автомобільної дороги).

Основними способами боротьби із зимовою слизькістю є механічний і хімічний. До хімічного способу відноситься використання хімічних, фракційних або комбінованих матеріалів.

У свій час було розроблено ряд методик та технологічних карт, які обґрунтовували використання обладнання та техніки для виконання робіт по зимовому утриманню. Зокрема, наприклад, М 218-03450778-644:2008 «Методика щодо вибору оптимальних моделей дорожніх машин для проведення зимового утримання доріг» [8], яка містить порядок визначення техніко-експлуатаційних та функціональних показників дорожньої техніки для зимового утримання автомобільних доріг; МРП 218-02071168-235:2004 «Методика розрахунку потреби в техніці для зимового утримання автомобільних доріг» [9], що присвячена організації та виконанні робіт боротьбі з зимовою слизькістю та очищення доріг від снігу. Проте, такі методики та технологічні карти вже є морально застарілими та потребують оновлення з урахуванням сучасних підходів до снігочищення та вимог до забезпечення безпеки дорожнього руху під час виконання робіт.

В даний час з 1 жовтня 2025 року запроваджуються сучасні документи на рівні державних стандартів. Зокрема, слід виділити ДСТУ EN 15144:2025 [10] «Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг. Термінологія. Терміни щодо зимового утримування» (EN 15144:2007, IDT), який гармонізує використання української та європейської термінології. А також ряд ДСТУ EN (ДСТУ EN 15518-1:2025 (EN 15518-1:2011, IDT) «Обладнання для зимового

утримування автомобільних доріг. Дорожні метеорологічні інформаційні системи. Частина 1. Загальні визначення і компоненти»; ДСТУ EN 15518-2:2025 (EN 15518-2:2011, IDT) «Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг Дорожні метеорологічні інформаційні системи. Частина 2. Рекомендоване спостереження і прогнозування»; ДСТУ EN 15518-3:2025 (EN 15518-3:2011, IDT) «Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг. Дорожні метеорологічні інформаційні системи. Частина 3. Вимоги щодо визначення параметрів стаціонарного обладнання»; ДСТУ CEN/TS 15518-4:2025 (CEN/TS 15518-4:2013, IDT) «Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг. Дорожні метеорологічні інформаційні системи. Частина 4. Методи випробування стаціонарного обладнання»), які присвячені дорожнім метеорологічним інформаційним системам [11-14].

Уся ця прийнята нормативно-правова база має на меті узагальнити вимоги до технології проведення робіт у зимовий період та забезпечити її належне обґрунтування у світлі забезпечення безпеки та комфорту дорожнього руху, а також відповідності встановленим рівням експлуатаційного утримання доріг.

В Україні розвитком теоретико-методологічної бази питань експлуатаційного утримання, в тому числі у зимовий період, у свій час займалися Вирожемський В. К., Гамеляк І. П., Догадайло О.О., Жданюк В. К., Іваниця Е., Канін О.П., Каськів В.І., Кіяшко І.В., Кизима С.С., Ліпський Г.Є., Лихоступ М.М., Мозговий В.В., Нагайчук В.М., Павлюк Д.О., Прусенко Є.Д., Руденко Д.О., Савенко В. Я., Сєдов А.В., Славінська О. С., Стороженко М.С., Тюпаков С.В., Харченко А.М., Химерик Т.Ю., Чечуга О.С., Шимчук О. П., Шуляк І.С. та інші.

Зокрема, за участі цих вчених було прийнято ряд нормативно-технічних документів, які і на теперішній час так чи інакше регулюють питання експлуатаційного утримання доріг у зимовий період [1-9, 15-17].

Безпосередньо технології боротьби із зимовою слизькістю була присвячена дисертаційна робота українського вченого [18]. В цьому дослідженні був запропонований кількісний критерій, який дозволяє впорядкувати однорідні ділянки при зимовому утриманні автомобільних доріг за ступенем терміновості їх обслуговування [18]. Автором вперше було запропоновано укрупнений алгоритм розрахунку показників терміновості обслуговування доріг у зимовий період, який реалізовано на ЕОМ. Показник терміновості обслуговування запропоновано визначати за критерієм соціально-економічного збитку від зниження швидкості руху міського автомобільного транспорту з урахуванням транспортно-експлуатаційних витрат. В подальших дослідженнях автором було розроблено та запропоновано імітаційну модель патрульного снігоочищення вулиць.

В більш сучасному дослідженні – монографії науковців Харківського національного автомобільно-дорожнього університету [19] запропоновано розрахункову модель в середовищі Microsoft Excel для визначення потреби протиожедних матеріалів, що враховує дані про фактичні погодні умови. Дана модель може слугувати інструментом для дорожньо-експлуатаційних організацій при плануванні поточних та перспективних запасів протиожедних матеріалів. Крім того, ряд останніх досліджень українських науковців присвячений підвищенню ефективності застосування протиожедних реагентів та зниженню їх впливу на навколишнє середовище [20-21]; аналізу ефективності снігоочисної техніки та заходів, які направлені на покращення зимового утримання автомобільних доріг [22]; узагальненню зарубіжного досвіду та пропозиціям щодо використання кращих практик у вітчизняному виробництві [23]. Проте, ці дослідження потребують певного узагальнення з метою удосконалення технології експлуатаційного утримання доріг у зимовий період.

Аналізуючи закордонні дослідження, слід зазначити, що останнім часом спостерігається виконання теоретико-аналітичних досліджень та оглядів [24-

25]. Це здебільшого пов'язано з світовими трендами стосовно екологічних методів та стратегій сталого обслуговування доріг взимку [26], які першочергово включають:

- потребу у зборі інформації про найновіші технології та стратегії, що використовуються дорожніми службами у зимовий період як на міській мережі доріг, так і на дорогах загальнодержавного значення;

- створення документу – довідника-посібника про кліматичні умови та рішення щодо зимового утримання в різних країнах;

- проведення аналізу впливу робіт по зимовому утриманню на безпеку, комфорт дорожнього руху, пропускну здатність та експлуатаційний стан доріг.

Крім того спостерігається тенденція до використання зарубіжними дослідниками методів машинного навчання для вирішення задач оптимізації кількості використаних протижеледних матеріалів [27-28], визначення впливу погодних умов на безпеку дорожнього руху через обрахунок коефіцієнта зчеплення [29], прогнозування температури дорожнього покриття в зимовий період [30-31] тощо.

1.2 Проблеми обґрунтування рівнів обслуговування доріг у зимовий період

Аналіз досліджень та публікацій показав, що в роботах [19-23] були визначені основні положення обґрунтування методів боротьби з зимовою слизькістю в умовах України. Проте, слід зазначити, що в цих дослідженнях чітко не визначено порядок обґрунтування рівнів зимового обслуговування доріг (Level of Service – LOS). Деякі аспекти з цього питання були закладені в ДСТУ 8992:2020 «Автомобільні дороги. Настанова з обґрунтування рівнів обслуговування під час експлуатаційного утримання», ДСТУ 8993:2020 «Автомобільні дороги. Рівні обслуговування під час експлуатаційного утримання», проте, ці стандарти вже потребують певної актуалізації та

доповнення стосовно зимового утримання доріг у зв'язку із прийняттям нових нормативно-технічних документів, що регламентують витрати протиожедних матеріалів, використання більш сучасної снігоочисної техніки, зміни часу реагування на зимові погодні умови. Вивчення зарубіжного досвіду дозволить сформулювати основні напрямки подальших досліджень з цієї проблематики.

Згідно проведеного аналізу світового досвіду, зазвичай, застосування хімічних реагентів, включаючи витрати на матеріал, робочу силу та обладнання, складає приблизно одну третину прямих витрат [32]. Витрати піску та інших абразивів складають більше ніж 10 відсотків бюджетних коштів виділених на зимове утримання [33]. Використання хімічних речовин та абразивних матеріалів також пов'язано з багатьма непрямими витратами, що включає пошкодження автотранспортних засобів, вплив на інфраструктуру та навколишнє середовище [34-35].

В останні роки у світі широко використовуються так звані служби прогнозування снігових опадів та термічне картографування (більшість дорожніх агентств Європи, Японії, Китаї, США). Зокрема, у дослідженні [36] запропоновано геостатистичну модель термічного картографування дорожнього покриття у зимовий період. Проте, автори у своїй моделі зробили акцент лише на одному чиннику – температурі дорожнього покриття.

Слід зазначити, що до недавнього часу більшість досліджень, спрямованих на формулювання технології зимового експлуатаційного утримання доріг, містили прості моделі, приділяли недостатню увагу обґрунтуванню рівнів обслуговування, не враховували ймовірнісну природу факторів та характеристик зимового утримання.

Деякі дослідники [33-37] окремо виділяють також проблему маршрутизації спецтехніки, автомобільного транспорту, задіяного в виконанні робіт по зимовому утриманню, проблему раціонального розміщення експлуатаційних служб та обґрунтування витрат матеріалів й інших ресурсів.

Зокрема, авторами [37] наголошено на проблемі врахування взаємодії спецтехніки по прибиранню снігу з учасниками дорожнього руху. При цьому, визначено, що слід мінімізувати час роботи техніки в так званій «дорожній системі», зберігаючи ефективність процесу прибирання снігу, оскільки стратегія маршрутизації має покращувати продуктивність снігоприбиральних машин, зменшуючи як час прибирання, так і загальний час подорожі учасників дорожнього руху.

Вплив робіт з зимового утримання доріг на безпеку дорожнього руху є беззаперечним, що було доведено аналізом за даними, отриманими з датчиків транспортних засобів за різних погодних умов у дослідженні [38] США. Автори зробили акцент на удосконаленні технології зимового утримання за рахунок зменшення затримок, спричинених дорожньо-транспортних пригод на рівні транспортного потоку та зменшення кількості випадків різкого гальмування на рівні окремого транспортного засобу, підкресливши важливість маршрутизації спецтехніки.

В роботах [33, 39-48] автори пропонують використання різних підходів і моделей маршрутизації спецтехніки та визначення оптимальної кількості ресурсів для експлуатаційної організації. Здебільшого, ці моделі маршрутизації ґрунтуються на основних положеннях теорії графів, однак, автори не наводять опису методів оптимізації запропонованих моделей. В роботах [49-55] наведено використання евристичних методів, які поділяються на: конструктивні, композитні та змішані (метаевристичні) методи. Застосування останніх дозволяє виконати оптимізацію моделей маршрутизації спецтехніки, яка використовується для боротьби з зимовою слизькістю.

Оптимізації автопарку для розробки ефективної політики зимового утримання доріг присвячені роботи [56-57]. Зокрема, в [56] розглядається оптимізація конфігурації автопарку та методів обслуговування доріг у зимовий період за рахунок введення показника кліматичної невизначеності. В дослідженні [57] звертається увага не тільки на проблему маршрутизації та

оптимальні розміри автопарку для зимового утримання, а й на обґрунтування рівня обслуговування доріг у зимовий період (LOS).

В дослідженні [58], враховуючи досвід Норвегії, наголошено, що математичну модель зимового утримання доріг слід будувати з урахуванням наступних змінних:

- 1) рівня обслуговування (LOS);
- 2) ширини проїзної частини;
- 3) висоти над рівнем моря;
- 4) середньодобової інтенсивності дорожнього руху;
- 5) тривалості снігопаду;
- 6) товщини снігового покриву;
- 7) кількості днів із несприятливими зимовими умовами;
- 8) кількості днів з крижаним дощем;
- 9) кількості холодних днів;
- 10) кількості днів з коливаннями температури.

Для удосконалення технології зимового утримання доріг використано багатолінійну регресійну модель, засновану на методі Гауса/найменших квадратів.

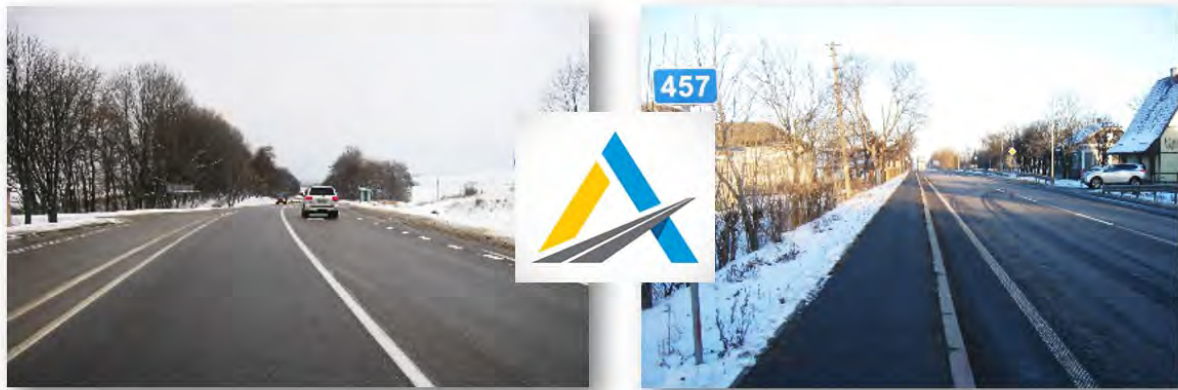
В Україні у 2014-2021 роках реалізовувався пілотний проєкт з експлуатаційного утримання ділянки М-06 Київ-Чоп км 434+230 – км 621+500 за рівнями обслуговування, які, в тому числі, включали і визначені рівні для зимового утримання (рис. 1.2). Цей проєкт мав на меті стати рушійною силою до змін у державних стандартах України стосовно утримання доріг. Не залежно до того факту, що дійсно за результатами проєкту було проведено великий обсяг досліджень [59-62] та створено нові нормативно-правові документи, проте на даний час ще багато стандартів потребують оновлення та удосконалення.

Перевагами зимового утримання доріг, організованого за принципом дотримання встановленого рівня обслуговування (LOS), є перехід від

реактивного прибирання (наприклад, прибирання після снігопаду) на проактивне та кероване прибирання процесами обслуговування. Крім того, зарубіжний досвід засвідчує, що встановлення чітких рівнів обслуговування дозволяє провести умовну класифікацію мережі. Тобто, найважливіші за статусом та високоінтенсивні маршрути будуть обслуговуватися першочергово, при цьому концентрація ресурсів (техніки, реагентів, робочої сили) буде там, де вони принесуть найбільшу користь.

OUTPUT & PERFORMANCE-BASED ROAD CONTRACT (OPRC)
 m06 Kyiv-Chop: KM434+230 – KM621+500
 УТРИМАННЯ ДОРІГ НА ОСНОВІ КІНЦЕВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ пілотний проект
 m06 КИЇВ-ЧОП: KM434+230 – KM621+500

Залучення компанії консультанта
 Involvement of a consultant company



**Фіксована плата - однаковий результат. Зима / літо Fixed fee – the same result.
 Winter / summer**

Рисунок 1.2 – Приклад експлуатаційного утримання ділянки автомобільної дороги за рівнем обслуговування в Україні (адаптовано з презентації проєкту)

Встановлені цільові показники рівня обслуговування не націлені на виконання об'ємів робіт, оскільки вони чітко прив'язані до очікуваного результату. Це дасть змогу краще планувати бюджет та мінімізувати перевитрати реагентів і паливно-мастильних матеріалів. Проте рівні обслуговування вимагають заздалегідь визначених процедур і чітких зон

відповідальності, що має бути визначено внутрішньою нормативно-правовою базою.

Встановлюючи конкретні цільові показники до експлуатаційного стану дорожнього покриття (наприклад, мінімальний коефіцієнт зчеплення, максимальна висота снігу на проїзній частині, максимально-можлива пропускна здатність дороги під час снігочищення), рівні обслуговування можуть безпосередньо впливати на зниження аварійності та підвищення безпеки [37-38, 56-58].

Збір даних про досягнення (або недосягнення) цільових рівнів обслуговування слугує основою для методичного аналізу та постійного вдосконалення технологій з зимового утримання в наступних сезонах.

1.3 Зарубіжний досвід зимового утримання автомобільних доріг в різних країнах світу

Зарубіжний досвід зимового утримання автомобільних доріг був детально проаналізований в дослідженнях [23, 63-67]. Зокрема, в роботі [23] визначено, що тривалість контракту на зимове утримання мережі доріг в середньому складає 5 років. Основу специфікації з утримання доріг у зимовий період у зарубіжній практиці становить обрана снігоочисна техніка, оскільки саме її застосування в подальшому формує технологію та стратегію зимового утримання. До снігоочисної техніки відносять: піскорозкидачі, навантажувальна техніка, трактори, автогрейдери, роторні снігоочишувачі, солерозподільувачі, бульдозери, а також навісне обладнання. В різних країнах світу в залежності від кліматичних зон техніка може відрізнятися за своїми конструктивними якостями.

Наприклад, у Фінляндії зими дуже сніжні, тому до прибирання снігу тут ставляться доволі серйозно і використовують снігоприбиральну техніку із двома відвалами (рис. 1.3). Така техніка дає можливість за один прохід

розчистити відразу дві полоси. Хоча є і очевидний мінус — необхідність перекривати дорогу на час прибирання [68]. Цікаво відзначити, що снігоприбиральна техніка у Фінляндії рухається з доволі високою швидкістю (близько 90 км/год).



Рисунок 1.3 – Снігоприбиральна техніка з двома відвалами

У Фінляндії дороги всередині країни мають три категорії важливості щодо зимового утримання. Спочатку прибирають найактивніші вулиці та траси, де часто ходить громадський транспорт, потім менш завантажені, в останню чергу – пішохідні доріжки та тротуари. Перший клас доріг повинен бути вичищений до початку робочого дня. На прибирання другого класу відведено п'ять годин, третього – одна доба. У разі рясного снігопаду невеликі вулиці спальних районів мають бути очищені від снігу не пізніше трьох днів після закінчення цього погодніх явища.

Якщо розглянути досвід зимового утримання Сполучених Штатів Америки [69], що географічно охоплюють велику територію, яка має як зони вічної мерзлоти на Алясці, так і клімат пекучих пустель у Каліфорнії й Аризоні, то снігові опади для одних регіонів є постійним явищем, для інших – суцільною катастрофою. Зокрема, навіть для середньої полоси континентальної частини США, де розташований, наприклад, Вашингтон і прилеглі штати, снігопади

просто паралізують всю роботу. Столичний округ бачить сніг кілька разів на рік, переважно в січні-лютому. Тому місцеві служби майже не мають снігоприбиральної техніки. Її тут мінімальна кількість, що обмежується звичайними вантажівками з підвісними грейдерами, а також пристроями для розкидування реагентів на пікапах.

У регіонах США, де клімат є порівняно м'яким, але снігові опади все ж трапляються, вважається менш витратним заходом зимового утримання для місцевої економіки зупинити рух по дорогах, комерцію та соціальну сферу на декілька днів, ніж купувати та утримувати великий парк снігоприбиральних машин. Коли за вікном починає сніжити, мешканці спостерігають за повідомленнями муніципальних служб (по радіо, інтернету, іноді у вигляді СМС на телефон), які повідомляють, чи працюватимуть сьогодні школи та офіси.

В штатах з більш холодним кліматом, таких як Нью-Йорк, Массачусетс, Нью-Гемпшир, парк снігоприбиральних машин все ж присутній. Зокрема, використовується снігоприбиральна техніка класифікації TowPlow (керований плуг на причепі, що тягнеться за снігоочисною технікою), яка дозволяє одній сніговій машині одночасно прочищати до двох смуг (рис. 1.4). Причіп також оснащений розкидачем, який розподіляє пісок, дорожню сіль або рідкий розсіл. Це дозволяє вантажівці очистити дорогу за два-три проходи, а не за чотири чи п'ять, що можливо з використанням звичайних плугів. За даними компанії-виробника цієї техніки, такий підхід зменшує споживання палива майже на 30 відсотків, подвоює продуктивність роботи однієї вантажівки та прискорює розчищення доріг, щоб зменшити обмеження руху після негоди.



Рисунок 1.4 – Техніка TowPlow

Таким чином в США успішно використовують комбіновані снігоприбиральні машини TowPlow (виробник – США), специфікою яких є наявність керованого плугу на причепі, що тягнеться за снігоочисною технікою. Оскільки плуг машини TowPlow здатен маневрувати та змінювати кут розташування відносно тягача, це дозволяє одній машині одночасно прочищати до двох смуг [69]. Крім того, причіп додатково оснащений розкидачем протиожедних матеріалів.

Компанія Clear Roads (США), вбачаючи перспективу використання комбінованої снігоприбиральної техніки, ініціювала та профінансувала у 2008-2009 роках розробку інноваційних прототипів снігоочисних машин, здатних долати низку проблем зимового утримання за допомогою комбінованих плугів, які були успішно протестовані на дослідних ділянках та запущені у серійне виробництво.

У Сполучених Штатах Америки діє так зване правило трьох годин, відповідно до якого щонайменше впродовж трьох годин після початку снігопаду водії не повинні виїжджати на дороги без крайньої необхідності. За цей час дорожники мають привести автомобільні шляхи у стан, прийнятний для

проїзду. Попри дисциплінованість більшості американських водіїв, це правило не завжди спрацьовує за умови надзвичайно сильних снігопадів.

Благоустрій населених пунктів у Канаді входить до обов'язків місцевої влади, яка й оплачує його з власних коштів [70]. Якщо говорити про найбільше місто Торонто, то 115 мм снігу, які вкривають його вулиці щороку, досить оперативно прибираються комунальними службами, однак, лише після рясних снігопадів. Якщо ж товщина снігового покриву не перевищує 2 см (у листопаді та квітні – 8 см), то снігоприбиральна техніка на вулиці навіть не вирушає. Міська влада керується затвердженими детальними інструкціями стосовно прибирання снігу із зазначенням кількості опадів та часу, на це відведеного. Однак, до обов'язків комунальних служб міста входить очищення від снігу проїжджих частин та тротуарів лише завантажених вулиць. Мешканцям і підприємцям маленьких вуличок доводиться очищати тротуари самостійно. Засоби боротьби із ожеледицею, такі як сіль та пісок, часто надають безкоштовно.

Досвід зимового утримання Німеччини полягає у використанні превентивних заходів [68]. Зокрема, комунальні служби заздалегідь намагаються готуватися до приходу зими і оперативно випускати на вулиці снігоприбиральну техніку. Служби займаються в основному очищенням трас та великих доріг. Прибирання ж від снігу та льоду тротуарів нерідко покладається на власників точок торгівлі і громадського харчування, домовласників (або їх квартирантів, що має бути обумовлено в контракті на оренду). Причому роблять вони це досить дисципліновано, адже за законом саме їм доведеться оплачувати лікування у разі травми перехожого, якщо той впаде.

Загалом, аналіз зарубіжного досвіду зимового утримання доріг свідчить, що навіть у розвинених країнах погодні умови цілком спроможні паралізувати життя того чи іншого мегаполіса.

Проблема оптимізації робіт з зимового утримання згідно зарубіжного досвіду вирішуються в першу чергу за рахунок використання високоточної

комбінованої снігоочисної техніки. Зокрема, така техніка може використовуватися цілий рік, що підвищує ефективність її використання та знижує час простоїв. Так, у літній період техніка може бути використана як поливомийна машина, у зимовий – як техніка для снігоочистки та посипання протиожедними матеріалами. Таким чином, виконуючи цілий спектр робіт, така техніка здатна замінити в дорожній організації декілька типів вузькоспеціалізованої спецтехніки. Обладнання та техніку необхідно підбирати відповідно до конструктивних особливостей мережі доріг, які входять у сферу обслуговування. Зокрема, слід враховувати наступні аспекти:

- доступність дорожніх активів;
- ширина узбіччя;
- облаштування дороги та наявність штучних споруд, наприклад, міст, підпірна стінка, вказівники, висота та глибина розміщення електромереж, трубо та газопроводів тощо;
- наявність снігозахисних огорож та інше.

Крім того, використання комбінованих машин дозволяє вирішити питання сезонного зберігання техніки.

Проблема розміщення депо (автобаз) в умовах зимового утримання доріг вирішується за допомогою економіко-математичного моделювання, мережевого планування. Оскільки для зимового утримання доріг можуть використовуватися одні і ті самі види транспортних засобів, що і для іншої діяльності з експлуатації доріг, у разі використання комбінованих машин розташування автобаз може бути засноване за принципом нагромадження цілорічних операцій.

У країнах з значними сніговими опадами, наприклад, у Фінляндії використовують комбіновану снігоприбиральну техніку із двома відвалами. Така техніка забезпечує зменшення проходів, оскільки дозволяє за один прохід розчистити відразу дві полоси дороги [68].

Останнім часом у європейських для зимового утримання використовується прогресивне обладнання RASCO (Хорватія), яке вже здобуло схвальні відгуки користувачів. Воно поєднує функціонал розкидачів SOLID C або LIQUID і снігоочисників MOSOR, що значно розширює спектр його застосування в зимовому утриманні. Оскільки крім снігоочищення це обладнання може здійснювати розкид сухого та/або вологого протиожедного матеріалу. Асортимент професійних снігоочисних машин RASCO включає плуги для всіх типів транспортних засобів, починаючи від вантажівок і багатоцільових автомобілів, і закінчуючи тракторами, будівельними машинами та невеликою вузькоспеціалізованою технікою. Конструкція плугів адаптована до різних поверхонь, що очищаються, і до висоти снігу. Усі транспортні засоби також оснащені системою дистанційного моніторингу та управління автопарком RASCO – ARMS. Розширена система управління дорогами (ARMS) від Rasco поєднує в собі картографування, відстеження та відстеження, а також оперативний моніторинг і запис і сумісна з усіма відкритими платформами комунікаційних систем. Унікальною особливістю є те, що дані, необхідні для програмування блоку керування розкидачем, такі як планування маршруту, можуть бути завантажені зі стандартного USB-накопичувача даних, а не з дорогої нестандартної карти пам'яті. ARMS складається з двох робочих елементів: обладнання для збору даних із датчиків, а також продуктів передачі даних GPS або GPRS, програмного забезпечення, яке, у своїй найпростішій формі, дозволяє збирати та аналізувати дані на веб-сайті. Програмне забезпечення Road Weather Information Systems від Rasco включає модуль, за допомогою якого можна постійно моніторити температуру дорожнього покриття та повітря, вологість і точку роси, опади (дощові, снігопад), а також видимість. Система також може включати вбудовані датчики моніторингу дорожнього покриття та атмосферні датчики.

Таким чином, основними перевагами використання інноваційної комбінованої техніки та сучасних технологічних рішень щодо зимового утримання є:

1. Підвищення ефективності та продуктивності (відносно одного проходу очищення, зменшення часу циклу, охоплення більшої площі очищення). Підвищення операційної ефективності за рахунок оптимізації маршруту, що призводить до скорочення пройденої відстані (до 28,3% у деяких випадках).
2. Відносне вивільнення робочої сили та техніки.
3. Вигоди для навколишнього середовища від використання меншої кількості палива (за деякими оцінками до 25%).
4. Покращення безпеки дорожнього руху завдяки скороченню часу циклу.
5. Багатофункціональність, можливість використання цілорічно для різних видів робіт з утримання дорожньої мережі.
6. Довший термін служби, ніж у звичайної снігоочисної техніки. При регулярному технічному обслуговуванні його середній термін служби становить 30 років, порівняно з 10-річним середнім терміном служби стандартного плуга.
7. Відносна економія капіталовкладень в розташування автобаз.
8. Відносна економія протижеледних матеріалів. Міста, які використовують сучасні технології, спостерігають значне скорочення використання солі (іноді на 20-40%) та швидше очищення доріг від снігу, що призводить до зменшення загальних бюджетів на зимове утримання [68]. Це пов'язане з тим, що сучасні розкидачі солі та системи боротьби зі слизькістю використовують технології точного нанесення протижеледних матеріалів, а також можуть здійснювати попереднє вологе або рідке нанесення, що дозволяє зменшити їх споживання на 20-40%.

9. Прийняття рішень щодо виходу спеціалізованої техніки на основі даних про погодні умови в режимі реального часу. Це дозволяє проводити профілактичні операції та оптимізувати розподіл ресурсів. Така інформація може призвести до зменшення впливу на навколишнє середовище на 25% та зменшення використання солі на 40% порівняно з необґрунтованими технологічними операціями.

Проте, одним з недоліків використання комбінованої техніки є можливі затори на вузьких ділянках доріг, або необхідність тимчасового перекриття руху автомобілів по дорогах під час снігоочисних робіт. Таким чином оптимальним, ефективним і доцільним буде використання комбінованої техніки на дорогах вищої категорії з багатьма смугами руху.

Загалом зарубіжний досвід зимового експлуатаційного утримання доріг доцільно класифікувати країни за стратегіями управління та кліматичними зонами (табл. 1.1).

1. Скандинавська модель (Фінляндія, Швеція, Норвегія). Ці країни є лідерами у використанні превентивних методів, зокрема:

- використання концепції «24/7 Friction Management», де основна увага приділяється забезпеченню коефіцієнта зчеплення, а не просто очищенню від снігу доріг;
- масове впровадження Дорожніх метеорологічних інформаційних RWIS (Road Weather Information System) систем (наприклад, у Фінляндії щільність метеостанцій – одна на 20–30 км). Використання теплових карт дорожнього покриття (Thermal Mapping);
- використання «зволоженої солі» та гарячого щебеню (метод Тапані-Мякінена) на дорогах з малою інтенсивністю руху.

2. Європейська континентальна модель (Німеччина, Австрія). Фокус на екологічності та жорсткій типізації реагентів. Зокрема, у Німеччині діє система SWIS (Road Weather Information Service), яка інтегрована з національною метеослужбою. Норми посипання змінюються динамічно залежно від

температури точки роси, що дозволяє економити до 30% матеріалів. Оплата підряднику залежить від підтримки заданого рівня обслуговування LOS (Level of Service).

3. Північноамериканська модель (США, Канада):

- використання концепції Системи підтримки прийняття рішення MDSS (Maintenance Decision Support System);
- використання складних математичних моделей, що враховують не тільки погоду, а й інтенсивність руху (Traffic-responsive maintenance);
- застосування рідких реагентів (Liquid Chemicals). Зокрема, США є лідерами у застосуванні розсолів для превентивної обробки (Anti-icing) до початку снігопаду.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця зимового експлуатаційного утримання доріг в розрізі стратегій управління

Модель	Країна-представник	Стратегія управління	Основний вид реагентів	Використання RWIS/ITS
1	2	3	4	5
Скандинавська модель	Фінляндія	Friction Management	Зволожена сіль, абразиви	Високе (автоматизація)
Європейська континентальна модель	США	MDSS / Risk-based	Рідкі хлориди, сухі суміші	Високе (прогнозування)
Північноамериканська модель	Німеччина	Preventive / Eco-friendly	Рідкі хлориди	Середнє/Високе
Традиційна модель	Україна	Reactive (боротьба з наслідками)	Піщано-соляна суміш (ПСС)	Низьке (в стадії розбудови)

Аналіз світового досвіду свідчить, що впровадження систем підтримки прийняття рішень у провідних країнах дозволило знизити витрати реагентів на 20-40% та скоротити аварійність у зимовий період на 15-25%. Проте пряме запозичення зарубіжних методик ускладняється специфікою вітчизняної нормативної бази та нерівномірністю розвитку мережі дорожніх метеостанцій

Висновки до розділу 1

На підставі проведеного теоретичного аналізу методів та технологій боротьби з зимовою слизькістю на мережі автомобільних доріг можна зробити наступні висновки:

1. Систематизовано та проаналізовано технічну й наукову літературу, а також чинну національну нормативно-правову базу, що регулює методи та вимоги до боротьби з зимовою слизькістю. Виявлено, що існуюча нормативна база здебільшого містить застарілі, недостатньо деталізовані вимоги щодо критеріїв оцінки ефективності заходів з зимового утримання, а регламенти із застосування сучасних протиожеледних матеріалів здебільшого неузгоджені між собою. Це ускладнює впровадження інноваційних технологій до експлуатаційного утримання мережі автомобільних доріг у зимовий період. Проаналізовано основні види робіт по боротьбі із зимовою слизькістю, проблему обґрунтування ресурсів дорожньої організації та маршрутизації спецтехніки. Узагальнено результати ключових наукових досліджень, присвячених хімічним, механічним та комбінованим методам боротьби зі слизькістю, використанні сучасної снігоочисної техніки, маршрутизації.

2. Досліджено концепцію рівня обслуговування доріг (LOS) як інструменту управління якістю зимового утримання. Встановлено, що в Україні існує проблема чіткого наукового обґрунтування рівня обслуговування доріг у зимовий період для різних категорій доріг, що призводить до нерівномірного розподілу ресурсів та суб'єктивності в оцінці роботи дорожніх служб. Визначено, що для ефективного управління необхідна розробка об'єктивних, вимірюваних цільових показників рівня обслуговування доріг при їх зимовому утриманні.

3. Проаналізовано передовий зарубіжний досвід зимового утримання автомобільних доріг. Виділено ключові тенденції, такі як широке застосування технологій превентивного оброблення (антиожеледні системи), використання

сучасної техніки, удосконалення технології шляхом оптимізації витрат протиожедних матеріалів та раціональної маршрутизації. Ключові вигоди полягають у значному підвищенні операційної ефективності за рахунок оптимізації маршрутів, що забезпечує скорочення пройденої відстані до 28,3%, а також у прогнозованому тривалому терміні служби (до 30 років проти 10 років для стандартного обладнання). Завдяки використанню систем точного дозування протиожедних реагентів і прийняттю рішень на основі даних у режимі реального часу, досягається суттєва економія матеріалів, яка становить 20–40% солі, і зменшення негативного впливу на довкілля до 25% порівняно з традиційними підходами.

Теоретичний аналіз підтвердив, що для удосконалення технології боротьби з зимовою слизькістю необхідно перейти від реактивної до проактивної моделі утримання, ґрунтованої на чіткій диференціації рівнів обслуговування та застосуванні сучасних технологій та методів прогнозування, що є основою для подальших досліджень.

Основні результати досліджень за розділом 1 висвітлено в роботах автора [61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 71, 72].

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ СПЕЦТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗИМОВОГО УТРИМАННЯ ДОРІГ

2.1 Аналіз сучасних технологій зимового утримання автомобільних доріг

Сучасні технології зимового утримання доріг (заходи) умовно поділяються на три основні групи: превентивні, поточні операції та постзаходи.

Превентивні технології у свою чергу поділяються на:

- технології, що засновані на прогностичних моделях;
- технології, що засновані на інтелектуальних моделях.

Але в цілому суть застосування цих технологій полягає у запобіганні утворення слизькості та оптимізації ресурсів. Тобто, вони є основою сучасного, проактивного підходу до зимового утримання мережі доріг. Зокрема, відповідно світового досвіду такі технології використовуються як складова Системи моніторингу дорожніх та погодних умов (RWIS – Road Weather Information Systems) [73-76], або Системи підтримки рішень щодо технічного обслуговування (MDSS), яка збирає та аналізує дані про погоду та стан доріг і надає рекомендації щодо ефективного зимового експлуатаційного утримання [77]. Суть цих заходів полягає у встановленні розгалуженої мережі датчиків та метеостанцій вздовж доріг та безпосередньо на дорожньому полотні, які в реальному часі вимірюють температуру покриття та повітря, вологість, точку роси, визначають вид метеорологічного явища, концентрацію солей (якщо вже внесено реагенти) та інші параметри. Така технологія дозволяє виконувати прогнозування потенційного утворення ожеледиці, а також застосовувати реагенти превентивно, що значно підвищує їхню ефективність і знижує загальні витрати.

Крім того, до превентивних заходів відносять оброблення Anti-icing, що включає нанесення рідких або зволжених протижеледних реагентів заздалегідь на сухе дорожнє покриття, ще до початку снігопаду або утворення льодового чи снігового накату. Це найефективніша група заходів, яка передбачає обробку доріг рідкими реагентами до початку ожеледиці чи снігопаду (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Відносний економічний та соціальний ефект від використання превентивних технологічних заходів (адаптовано з [73-76])

Показник ефекту	Приблизний відсоток економії/зниження
Економія реагентів (солі)	20% – 40%
Зниження витрат на робочу силу та обладнання (за рахунок меншої кількості рейсів)	До 37% (за деякими дослідженнями)
Зниження аварійності (соціально-економічний ефект)	До 85%
Зменшення загальних операційних витрат	Загальна ефективність часто описується як формула: \$1 витрачений долар на превентивну обробку заощаджує \$5 - \$20 на подальших відновлювальних роботах та ліквідації наслідків.

Поточні операції з зимового утримання (De-Icing / реактивне прибирання снігу) включають:

- заходи з видалення снігових та льодових утворень на дорозі;
- заходи до зменшення негативного впливу снігових та льодових утворень на автомобільний рух.

У свою чергу заходи з видалення снігових та льодових утворень можуть виконуватися із застосуванням хімічних, механічних, фрикційних, термічних або інших подібних методів.

Хімічні (протижеледні) технології спрямовані на руйнування утвореного льоду або зниження температури замерзання води.

Механічні технології спрямовані на видалення снігу та льоду безпосередньо з дорожнього полотна. Переважно це використання потужних плужних або роторних снігоочисників, які працюють синхронно в колоні для швидкого очищення широких смуг руху.

Фрикційний метод (або метод підвищення зчеплення) спрямований на механічне збільшення шорсткості поверхні дорожнього покриття, а не на руйнування льоду чи сніг за рахунок розсіювання абразивних матеріалів (фрикційних матеріалів) на слизьку поверхню.

Термічний метод (або тепловий) ґрунтується на локальному підвищенні температури дорожнього покриття, що призводить до танення льоду або снігу та запобігання їхньому утворенню. Тобто, метод забезпечує підтримання температури дорожнього покриття вище за точку замерзання через подачу тепла безпосередньо на дорожнє полотно.

В деяких країнах використовуються стаціонарні системи підігріву дорожнього покриття (RSI), що базуються на електро- або гідропідігріві. Крім того, термічний метод також включає використання спеціалізованої техніки, яка подає гаряче повітря або інфрачервоне випромінювання на покриття для швидкого танення льоду. Проте, цей метод є високовитратним і застосовується дуже рідко, переважно для видалення дуже товстого, ущільненого шару льоду, який не піддається хімічним чи механічним методам.

Проте, слід зазначити, що перехід від виключно поточних (реактивних) операцій до превентивних (проактивних) забезпечує економію в діапазоні 12% – 18% від загальних річних витрат на утримання [73-76].

Постзаходи (або заходи після здійснення основних робіт з експлуатаційного утримання доріг) є завершальним етапом циклу зимового утримування доріг. Вони необхідні для забезпечення довгострокової безпеки, мінімізації негативного впливу на інфраструктуру та навколишнє середовище, а також для підготовки до наступних снігопадів.

Зокрема, постзаходи включають:

1. Очищення узбіч та розширення проїзної частини – прибирання відкиненого снігу з узбіч, з'їздів, зупинок громадського транспорту та паркувальних зон.
2. Вивезення снігу. У містах або на ділянках, де сніг накопичується в критичних обсягах, організовується його вивезення у спеціально відведені місця (снігозвалища).
3. Очищення дренажної системи – видалення снігу та снігового бруду з водовідвідних лотків, дощоприймачів та колодязів, щоб забезпечити ефективний стік та запобігти підтопленням під час потепління.
4. Відновлення оперативного запасу протижеледних матеріалів, солей та розсолів на базах дорожніх служб.

Слід зазначити, що використання превентивних заходів (зокрема, у вигляді нанесення рідких реагентів) значно зменшує використання піску та абразивів, що, у свою чергу, призводить до економії коштів на подальше збирання цього матеріалу. Таким чином, превентивні заходи є найбільш економічно обґрунтованими і дають найбільший відсоток прямої економії. Проте, ефективна стратегія утримання передбачає технологію комплексного та інтегрованого застосування перелічених методів та заходів, що переважно відбувається у синергії з інтелектуальними системами.

2.2 Оцінка впливу зимових гідрометеорологічних факторів на експлуатаційний стан дорожнього покриття та безпеку руху

Визначення точного відсотка впливу зимових гідрометеорологічних факторів на експлуатаційний стан дорожнього покриття та безпеку руху є складним завданням, оскільки цей показник буде залежити від регіону, інтенсивності руху, типу дорожнього покриття та якості утримання. Проте, ґрунтуючись на міжнародних дослідженнях дорожньої інженерії та безпеки руху, можна навести наступні оцінки впливу (табл. 2.2-2.3).

Таблиця 2.2 – Вплив зимових гідрометеорологічних факторів на експлуатаційний стан дорожнього покриття

Фактор впливу	Показник	Приблизний відсоток впливу/пошкодження
1	2	3
Цикли замерзання-відтавання	Спричинення руйнування (тріщин, ямковості) через розширення води у порах матеріалу.	До 70% усіх тріщин та ямковості в помірному кліматі ініціюються взимку.
Водонасичення дорожньої основи	Насичення ґрунтів основи водою (особливо навесні після танення) та подальше зниження їхньої несучої здатності.	Зниження несучої здатності дорожнього одягу на 30% – 60% навесні.
Корозійний вплив солей	Прискорення корозії металевих елементів (арматура мостів, бар'єрне огороження, комунікації).	Збільшення швидкості корозії у 5 – 10 разів порівняно з незасоленим середовищем.
Руйнування матеріалу	Хімічний вплив хлоридів на цементобетон та асфальтобетон.	Зниження морозостійкості бетону до 20%.

Експлуатаційний стан (довговічність, рівність, міцність) погіршується переважно через процеси замерзання-відтавання та діяльність реагентів. Зимові умови є однією з головних причин збільшення кількості та тяжкості дорожньо-транспортних пригод (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Вплив зимових гідрометеорологічних факторів на безпеку дорожнього руху

Фактор впливу	Показник	Приблизний відсоток збільшення/зниження
Загальне збільшення ДТП	Кількість ДТП у зимовий період (сніг, ожеледиця, мокрий сніг) порівняно з літнім.	10% – 40%
Ожеледиця та сніговий накат	Збільшення ймовірності ДТП при наявності льоду або ущільненого снігу на покритті.	Збільшення ризику ДТП у 6 – 12 разів
Зниження зчеплення (коефіцієнт зчеплення)	При наявності льоду коефіцієнт зчеплення (основа безпеки) може знижуватися:	Зниження коефіцієнта зчеплення на 60% – 90% (з 0,7–0,8 до 0,1–0,3)
Обмежена видимість	Снігопад, хуртовина, туман, спричинені перепадом температур.	Збільшення ДТП до 20%
Ефективність прибирання	Зниження ДТП при оперативному очищенні дороги до «чистого» стану.	Зниження ризику ДТП на 30% – 85%

Останнім часом відбулися вдосконалення технологій розподілу абразивних матеріалів та посипання солі, механічних методів, снігоочисної техніки та систем метеорологічної інформації. Удосконалена система метеорологічної інформації може призвести до ефективного планування з точки зору мобілізації необхідних ресурсів для зимового утримання дорожньої мережі завдяки достатньому часу для планування заходів. Точний прогноз погоди може призвести до ефективного розгортання обладнання для зимового утримання доріг та правильного застосування необхідної кількості хімікатів та абразивів [32-34].

Географічні інформаційні системи (ГІС) та системи географічного позиціонування (GPS) є цінними інструментами для планування робіт з зимового утримання. За допомогою ГІС можна визначити, які ділянки доріг були очищені або посипані піском, а за допомогою GPS можна відслідковувати місцезнаходження спецтехніки в режимі реального часу.

Прогнозування погоди, тобто використання інформації про погодні умови в режимі реального часу, зараз використовується для передбачення поведінки умов та стану дорожнього покриття на строк до 6 годин [34]. Зимові гідрометеорологічні фактори мають прямий і часто критичний вплив на експлуатаційний стан дорожнього покриття та безпеку руху [78]. Оцінка цього впливу є основою для розробки ефективних стратегій зимового утримання. Основними факторами впливу є температура повітря та покриття (табл. 2.4), опади, вітер та вологість, сонячна радіація.

До небезпечних опадів у зимовий період відносять сніг, крижаний дощ, мряку. Зокрема, снігопад призводить до утворення снігового накату (ущільненого снігу), який діє як ізолятор, ускладнюючи танення льоду під ним. При цьому відбувається зниження видимості, слідкування на дорозі та втрата орієнтирів, зменшується свобода маневру через зниження пропускної здатності дороги у зв'язку із зменшенням ширини проїзної частини.

Крижаний (льодяний) дощ може призвести до швидкого утворення шару чистого льоду на покритті (ожеледь), що є найбільш небезпечним станом. Це призведе до критичного зниження коефіцієнта зчеплення, що зробить рух автомобілів по дорозі практично некерованим.

Мряка або туман створюють ефект замерзання крапель, внаслідок чого з'являється іній або тонкий шар льоду, особливо на мостах. Крім того це метеорологічне явище призводить до сильного зниження видимості та виникнення локальної слизькості.

Сильний вітер викликає замети снігу на окремих ділянках, особливо у виїмках і лісосмугах, а також здуває сухі протиожеледні реагенти з дорожнього

полотна, створює небезпечні зони нерівномірного покриття та вимагає від водіїв додаткової концентрації.

Таблиця 2.4 – Вплив факторів температури повітря та покриття на експлуатаційний стан та безпеку дорожнього руху

Фактор	Вплив на експлуатаційний стан	Вплив на безпеку руху
Перехід через 0 °С	Створює умови для утворення тонкої плівки води, яка миттєво замерзає (ожеледиця, чорний лід).	Найвищий ризик ДТП через несподіване зниження коефіцієнта зчеплення.
Низькі температури (< -10 °С)	Знижується ефективність хлоридних реагентів (солей). Потрібні додаткові заходи або інші типи реагентів.	Покриття стає крихким, що погіршує зчеплення навіть за відсутності льоду.
Різкі коливання	Викликають термічні напруги в покритті, сприяючи утворенню тріщин і ямковості.	Непередбачувана зміна коефіцієнта зчеплення протягом доби.

Висока відносна вологість сприяє конденсації водяної пари на охолодженому покритті. При температурі покриття нижче 0 °С це призводить до утворення льоду (чорний лід). Це викликає утворення слизькості на «сухій» на вигляд дорозі.

Після снігопаду активне сонячне випромінювання може призвести до часткового танення снігу, а подальше нічне замерзання створює вторинну ожеледицю або снігову кірку, яка важко піддається хімічному впливу. Крім того, зимове сонце створює сліпучий ефект та глибокі тіні, що ускладнює водіям оцінку стану дорожнього покриття.

Таким чином, оцінка впливу цих факторів вимагає застосування Інтелектуальних транспортних систем (ITS), зокрема, наприклад, таких як Системи моніторингу дорожніх та погодних умов (RWIS – Road Weather Information Systems) [73-76], для прогностичного моделювання стану покриття

залежно від метеоумов або використання в моделі зимового утримання відповідних показників (індексів). Лише завчасне знання про комбінацію температури покриття, точки роси та вологості дозволяє дорожнім службам застосовувати превентивні технології і тим самим мінімізувати негативний вплив на безпеку руху.

2.3 Постановка проблеми маршрутизації спецтехніки з зимового утримання доріг

Наявність на проїзній частині доріг снігових відкладень навіть у незначній кількості призводить до зниження швидкості, безпеки дорожнього руху та комфорту руху [18]. Особливо вагомим дана проблема визначається у міських умовах, оскільки інтенсивність дорожнього руху в населених пунктах набагато вища ніж у міжміському сполученні.

Проблему обґрунтування стратегії зимового утримання доріг слід розглядати з позиції системи «навколишнє середовище – дорожні умови – транспортні потоки – дорожнє агентство» [18].

В роботі [18] в якості критерія для порівняння стратегій зимового утримання доріг запропоновано цільову функцію:

$$F = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^K C_i Z_{ij} + \sum_{j=1}^S \sum_{m=1}^M C_m \theta_{mj} + \sum_{m=1}^M C_m^n P_m \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

де S – кількість опадів снігу за період експлуатації, од.;

K – кількість ділянок доріг, км;

M – кількість механізованих бригад, од.;

Z_{ij} – час, за який транспорт має збитки через зниження швидкості дорожнього руху на i -тій дорозі у j – подію снігових опадів, год.;

θ_{mj} – час роботи бригади, год.;

P_m – час простою, год.;

C – вартість, грош.од.

Оскільки величини S , Z , θ , P мають випадковий характер, таким чином функція F також є випадковою величиною, відповідно, для її характеристики необхідно використовувати математичне сподівання:

$$\dot{F} = M(F). \quad (2.2)$$

Проблема маршрутизації спецтехніки по зимовому утриманню доріг на пряму пов'язана з рівнями обслуговування, так як завдяки вирішенню цієї проблеми можна визначити оптимальну кількість необхідних ресурсів (одиниць спецтехніки) для виконання робіт [62].

Проблема маршрутизації автомобілів, пов'язаних з виконанням операцій, зазвичай формулюється як проблема «маршрутизації дуги» згідно з основними положеннями теорії графів. Математична модель маршрутизації задіяної техніки у цьому разі представляється зваженим орієнтованим графом [33]:

$$G = (R, L), \quad (2.3)$$

де R – мережні вузли, од.;

L — множина дуг, яка моделює тракти передачі між вузлами мережі та потужність якої дорівнює n .

Ваговими коефіцієнтами окремо взятої дуги l_{ij} графа G виступають деякі дійсні числа d_{ij} , які називаються довжиною (метрикою) дуги, яка визначається за формулою:

$$d_p = d_{11} + d_{12} + \dots + d_{km} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m d_{ij}. \quad (2.4)$$

Тоді для будь-яких двох вузлів r_i та r_j графа (рис. 2.1) задача найкоротшого шляху полягає в пошуку такого шляху між цими двома вузлами, який би мав мінімальне значення довжини (метрики).

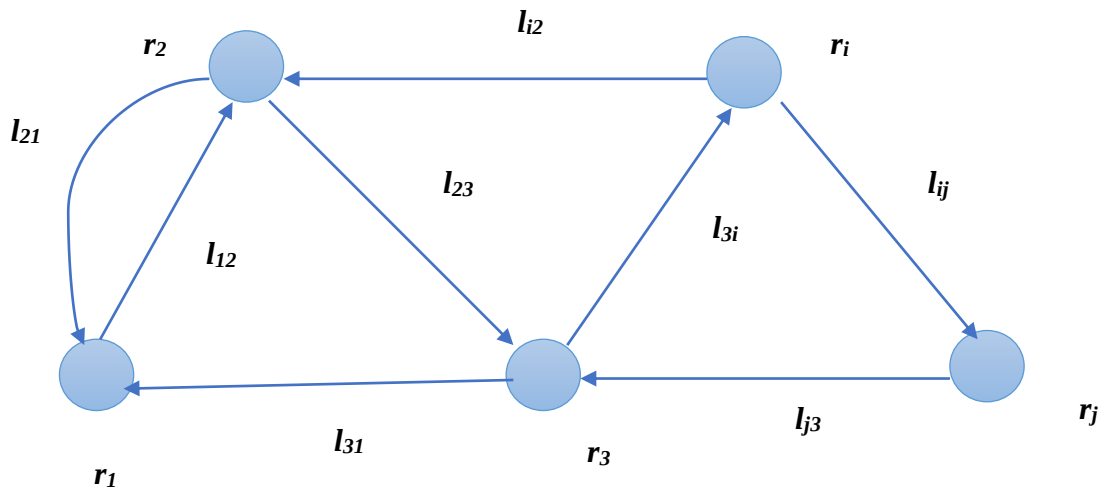


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення графу математичної моделі маршрутизації

В роботах Assad, Golden [39], Eiselt [40, 41], Dror [42] представлено широкий огляд літератури щодо особливостей дугових маршрутів. Протягом багатьох років було розроблено велика кількість систем підтримки прийняття рішень з використанням методів оптимізації щодо маршрутизації автомобілів для виконання операцій по зимовому утриманню доріг. Такі системи були описані наприклад: Durth, Hanke [43], Jaquet [44], Blesik [45], McDonald [46], Anderson та ін. [47]. Однак ці автори не наводять опису методів оптимізації, на яких їх системи покладаються. Огляд системи підтримки прийняття рішень для маршрутизації дорожньої спецтехніки представлений в дослідженнях Gini та Zhao [48]. В роботі Turchi [79] запропоновано схему таксономії для класифікації систем прийняття рішення щодо робіт та ресурсів по зимовому утриманню.

Також було розроблено кілька інструментів підтримки прийняття рішень щодо програми використання хімічних реагентів та абразивів згідно відповідних зимових погодних умов. Наприклад, в роботах Malmberg, Axelson [80] описаний проект, ініційований Шведською національною дорожньою адміністрацією на початку 90-х років для розробки експертної системи зимового утримання, що називається VVEXP, яка визначає час відгуку, кількість і порядок застосування хімічних реагентів та абразивів під час зимового утримання. Експертна система VVEXP базувалася на поточній інформації та статистичних даних про погодні умови, включаючи застосування методів інтерполяції інформації про погоду та автоматизованим вибором набору хімічних реагентів та порядку їх застосувань на основі правил та фактів, зібраних з так званих «польових інтерв'ю» та зустрічей з експертами. Однак, з фінансових причин, подальший розвиток системи був зупинений [81].

В роботах Ketcham [82] описано рівні обслуговування доріг щодо зимового утримання у вигляді таблиць, розроблених Федеральним агентством автомобільних доріг США (FHWA), які містять інформацію про набір та порядок застосування хімічних речовин для боротьби з зимовою слизькістю, операції відповідно до поточних і прогнозованих температур, снігопаду та точки роси. Керівництво базується на результатах чотирьохрічних польових випробувань, проведених 15 державними агенціями штатів США та підтримуваних Стратегічною програмою досліджень доріг (SHRP) та FHWA. Керівництво також було поширено за межами США. Пізніше Програма боротьби з зимовою слизькістю (DART) була розроблена для Міністерства транспорту Онтаріо, Канада, щоб адаптувати керівництво FHWA до комп'ютеризованого формату та оцінити ефективність рекомендованих методів експлуатаційного утримання [75].

Для маршрутизації транспортних засобів, задіяних при зимовому утриманні, було запропоновано використання процедур евристичних методів. Вони можуть бути загалом поділені на три категорії:

- конструктивні методи;
- композитні методи;
- адаптація метаевристики.

Конструктивні методи маршрутизації транспортних засобів можна розділити на чотири класи: методи побудови послідовних маршрутів, методи побудови паралельних маршрутів, спочатку кластер – маршрут потім та методи оптимізації на основі основних положень теорії графів.

Композитні методи використовуються для врахування обмежень в моделі по кількості та потужності транспортних засобів, витраті матеріалів, часі виконання робіт і т.д. Ця група методів базується на евристичних підходах [49].

Методи метаевристики базуються на імітаційному підході [50-55] і використовуються для вирішення проблеми випадковості змінних моделі та непередбачуваності факторів, які впливають на модель зимового утримання доріг. Методи метаевристики дозволяють виконувати моделювання різних подій та ситуацій. У таблиці 2.5 наведено характеристику моделей маршрутизації спецтехніки, які використовуються в інших країнах для обґрунтування кількості ресурсів та часу виконання операцій з зимового утримання автомобільних доріг.

В загальному вигляді проблема планування експлуатаційного утримання зимових доріг (WRMSP) може бути формально визначена наступним чином. Розглянемо дорожню мережу, що складається з набору дорожніх сегментів. Планування має враховувати наступні вимоги [52]:

1. Загальний рівень обслуговування мережі максимізується під час забезпечення мінімального рівня обслуговування, гарантованого для кожного класу доріг.
2. Загальні експлуатаційні витрати зведені до мінімуму.
3. Загальний негативний вплив на навколишнє середовище мінімізується.

Таблиця 2.5 – Характеристика моделей маршрутизації автомобілів для використання (адаптовано з [54])

Автор	Тип проблеми	Рівень планування	Характеристика проблеми	Мета функції цілі	Структура моделі	Метод вирішення
1	2	3	4	5	6	7
Еванс Еванс і Вант	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Потужність автомобіля, максимальний час до завершення повного розкидання, максимальна тривалість маршруту, охоплення однієї або двох смуг при посипці за один прохід.	Мінімальна загальна відстань маршрутизації	Проблема «маршрутизація дуги»	Послідовно-конструктивний метод
Лі і Еглесе	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Послідовність обслуговування, потужність та багатофункціональність автомобілів, база розміщення посипкових матеріалів, охоплення однієї або двох смуг при посипці за один прохід.	Мінімально фіксовані затрати солерозкидача та транспортні витрати	Проблема «маршрутизація дуги»	Послідовно-конструктивний метод
Сойстер	Маршрутизація розкидача солі та абразивних матеріалів	Операційний	Послідовність обслуговування і максимальна тривалість маршруту	Мінімальні порушення маршруту	Проблема «маршрутизація дуги»	Паралельно-конструктивний метод
Кук і Альпрін	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Потужність автомобіля, балансування навантаження, і надання двосторонніх послуг	Мінімальний час розповсюдження посипкових матеріалів	Проблема «маршрутизація дуги»	Паралельно-конструктивний метод

1	2	3	4	5	6	7
Унгерер	Маршрутизація солерозкидувача	Реальний час	Потужність автомобіля та максимальна довжина маршруту	Мінімальна загальна відстань	Проблема маршрутизації солерозкидача	Паралельно-конструктивний метод
Дарлінг	Моделювання комбінованого сектору і маршрутизації солерозкидувача	Стратегічний	Потужність автомобіля, очікуваний час роботи та частота обслуговування	Мінімальний рух після закінчення посипкових матеріалів	Проблема знаходження найкоротшого шляху при перетині кожного з ребер графа (принаймні один раз)	Кластерний метод
Англія	Моделювання комбінованого сектору і маршрутизації солерозкидувача	Стратегічний	Компактність, балансування робочого навантаження, частота обслуговування	Мінімальне сервісне обслуговування до закінчення маршруту	Проблема «маршрутизації дуги»	Кластерний метод
Сойстер	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Потужність автомобіля, посипка двох смуг за один прохід	Мінімальна відстань посипки	Проблема «маршрутизації дуги»	Методи імітаційного моделювання
Хагані і Цяо	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Сервісне обслуговування, потужність автомобіля	Мінімальна кількість спецтехніки	Проблема «маршрутизації дуги»	Методи імітаційного моделювання
Син і Еглес	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Потужність автомобіля, декілька маршрутів на один солерозкидач	Мінімальна кількість спецтехніки	Проблема «маршрутизації дуги»	Композитний метод

1	2	3	4	5	6	7
Хагані і Цяо	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Послідовність обслуговування, потужність автомобіля, максимальна тривалість маршруту	Мінімальні ресурси до закінчення операцій	Лінійний МІР	Композитний метод
Еглеса	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Сервісна послідовність та потужність автомобіля, групування вуличних сегментів	Мінімальна кількість спецтехніки	Розгалужений алгоритм	Методи імітаційного моделювання
Бенсон і співавт	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Потужність автомобілів, швидкість сервісного обслуговування	Місткість автомобілів, часові рамки посипки	Нелінійний МІР	Композитний метод
Цяо	Маршрутизація солерозкидувача	Операційний	Рівень обслуговування автомобілів	Мінімальна кількість спецтехніки	Лінійний МІР	Композитний метод

Щоб відобразити динамічний характер проблеми, розглянемо, що горизонт планування ділиться на безліч однорідних інтервалів часу. Ці інтервали представляють найкоротші інтервали, які можна запланувати, або під час яких будь-яка діяльність може відбутися [52]. Вводяться наступні позначення:

Набори індексів:

i – індекс дорожніх сегментів, $i = 0, 1, \dots, n - 1$, де n – це кількість дорожніх сегментів;

k – індекс для маршрутів технічного обслуговування, $k = 0, 1, \dots, m - 1$, де m – кількість маршрутів;

t – індекс періоду часу, $t = 0, 1, \dots, T - 1$, де T – це кількість часових інтервалів. Всі часові інтервали мають рівну довжину, яка також використовується для визначення деяких інших параметрів системи.

Вхідні параметри:

l_i – довжина сегменту дороги i , виражена як кількість часових інтервалів, необхідних для її проходження, од.;

L_k – довжина маршруту k , виражена як кількість часових інтервалів, необхідних для її проходження, од.;

λ_i – ваговий коефіцієнт, що приписує значення «важливості» до дорожнього сегмента i . Це дозволяє розглянути модель, яка враховує різні класи доріг, і розрізняти між собою їх для цілей встановлення пріоритетів обслуговування;

φ_i – пороговий рівень обслуговування для сегменту дороги, який повинен бути забезпечений у будь-який час;

$w_{i,t}$ – зміна в стані доріг через погодні умови для дорожнього сегмента i в часовий інтервал t .

$r_{k,i}$ – описує випадкові відносини між маршрутами і дорожніми сегментами.

$R = \{r_{k,i}\}$;

d – ціле значення, що відображає кількість доступної техніки для виконання робіт, од.

Змінні, пов'язані з прийняттям рішень:

$x_{k,t}$ – двозначна змінна рішення, яка приймає значення: 1 – якщо і тільки якщо транспортний засіб повинен відправлятися на маршруті k на початку часу інтервалу t ; 0 – в іншому випадку. $X = \{x_{k,t}\}$.

$y_{i,t}$ – проміжна змінна, що показує, скільки транспортних засобів знаходяться на ділянці дороги i в часовому інтервалі t . $Y = \{y_{i,t}\}$. Ці змінні використовуються для відображення обмеження кількості ресурсів:

$$Y = f(X, R, l), \quad (2.5)$$

де $y'_{i,t}$ – проміжна змінна, що показує, скільки транспортних засобів фактично обслуговують дорожній сегмент i у часовий інтервал t . $Y' = \{y'_{i,t}\}$:

$$Y' = f'(X, R, l) \quad (2.6)$$

f' – лінійна функція;

$c_{i,t}$ – проміжна змінна, що представляє оцінку стану дорожнього покриття дорожнього сегмента i в кінці часу інтервал t , після проведення робіт та врахування погодних явищ. Значення цих змінних визначається рекурсивно:

$$c_{i,t} = (0, c_{i,t-1} + w_{i,t} - \Delta \times y'_{i,t}) \rightarrow \max, \quad (2.7)$$

де Δ – являє собою максимум глибини снігового покриву, яку можна очистити за один прохід спеціалізованим транспортним засобом;

$c_{i,0}$ – початковий стан поверхні дороги на початок інтервалу часу 0, що вважається відомим.

Виходячи з цілей та умов операцій з планування, модель зимового утримання доріг можна запропонувати у вигляді:

$$\sum_i \sum_t \lambda_i \cdot c_{i,t} + \beta \sum_k \sum_t L_k \cdot x_{k,t} \rightarrow \min \quad (2.8)$$

Обмеження:

$$c_{i,t} = (0, c_{i,t-1} + w_{i,t} - \Delta \times y'_{i,t}) \rightarrow \max, \quad (2.9)$$

$$c_{i,t} \leq \varphi_i, \quad (2.10)$$

$$\sum_i y_{i,t} \leq d, \quad (2.11)$$

$$Y = f(X, R, l), \quad (2.12)$$

$$Y' = f'(X, R, l), \quad (2.13)$$

де β - фактор, що присвоює важливість цілей щодо зимового утримання автомобільних доріг.

В роботі [18] пропонується варіанти маршрутів порівнювати за критерієм сумарної протяжності маршруту:

$$S = \sum l_{ij} \rightarrow \min \quad (2.14)$$

Проблема маршрутизації транспортних засобів, належить до задачі дугового маршруту (ARP), яка використовує дорогу як об'єкт обслуговування. Слід зазначити, що цю задачу можна охарактеризувати як типову NP-повну проблему з відповідями алгоритму рішення «так» або «ні» [83]. Зі збільшенням

масштабу задач кількість обчислень експоненціально зростає, тому вирішення задачі маршрутизації має базуватися на евристичному алгоритмі. Такий алгоритм можна вирішити наприклад за допомогою змішаної цілочисленої моделі програмування [34].

Окремі дослідники пропонують вирішити проблему оптимізації маршрутів спецтехніки за допомогою:

- моделі маршрутизації по дузі з часовими вікнами [84],
- нелінійного алгоритму [50],
- алгоритму пошуку табу [84],
- теорії графів [85] тощо.

Деякі дослідники намагалися автоматизувати процес планування маршрутів, наприклад, імітаційна модель патрульного снігоочищення вулиць [18], прикладне програмне забезпечення GeoRoute [86]. Але дослідження оптимізації маршруту транспортних засобів для видалення ожеледі, розподілу солі все ще рідкість.

Таким чином метою дослідження – є розробка математичної моделі маршрутизації транспортних засобів для зимового утримання мережі автомобільних доріг.

Зимове експлуатаційне утримання доріг включає специфічні операції, пов'язані з сезонною проблемою – боротьбою з зимовою слизькістю [87, 88]. Ці операції включають розповсюдження хімічних реагентів та абразивних матеріалів (хімічний спосіб прибирання снігу); ручне, механічне, фізичне прибирання снігу (таблиця 2.6).

Таблиця 2.6 – Характеристики різних способів прибирання снігу
(адаптовано з [85])

Характеристика	Вплив індикатора			
	Спосіб прибирання снігу			
	Хімічний (використання протиожедних матеріалів)	Ручний	Механічний	Фізичний
Ефективність	Високий	Низький	Високий	Високий
Витрати енергії	Низький	Високий	Високий	Відносно високий
Вплив транспорту	Дуже низький	Високий	Відносно високий	Нульовий
Вартість об'єкта	Низький	Низький	Вартість покупки висока	Вартість будівництва висока
Вартість використання	Відносно високий	Високий	Відносно високий	Відносно високий
Вплив на навколишнє середовище	Високий	Низький	Пошкодження покриття	Без забруднення, без пошкоджень

Усі розглянуті способи вимагають від дорожнього агентства прийняття рішень щодо оптимальних маршрутів спецтехніки та витрат протиожедних матеріалів.

Рішення про боротьбу із зимовою слизькістю включають завдання:

- стратегічного рівня,
- тактичного рівня,
- оперативного рівня
- рівня реального часу.

Стратегічний рівень стосується складання довгострокового плану розміщення снігоочисного обладнання та станцій, наприклад, вирішення проблеми поділу операційної мережі та визначення місця розташування станцій.

До тактичного рівня в основному відносяться проблеми, які необхідно вирішити у короткостроковий і середньостроковий (зазвичай протягом кількох місяців) термін. Наприклад, до таких цілей відносять проблеми розподілу снігоочисних машин і персоналу.

Оперативний рівень роботи стосується вибору та планування маршруту транспортного засобу для розкидання снігу в щоденних завданнях з прибирання снігу.

Рівень планування у режимі реального часу означає прийняття рішень негайно, коли раптово змінюється середовище системи (наприклад, пошкодження обладнання, зміна погоди), як-от проблеми з коригуванням маршруту роботи транспортного засобу для розкидання на основі інформації про погоду в реальному часі та стан доріг.

Таким чином, задача маршрутизації транспортних засобів належить до задач вирішення рівня експлуатаційного утримання, що складає основу рівня обслуговування доріг.

З метою підвищення ефективності зимового утримання доріг, дорожня мережа сегментується на дискретні експлуатаційні зони. Ресурси, зокрема транспортні засоби для розподілу протиожедної солі, дислокуються відповідно до регіональної структури обслуговування. Для кожної визначеної зони фіксується певна кількість одиниць техніки, що відповідають за оперативне оброблення. Ключовим завданням дорожньо-експлуатаційного відділу є оптимізація руху цих транспортних засобів. Формально проблему маршрутизації транспортних засобів можна описати як необхідність формування маршрутів, за яких техніка починає рух зі станцій, покриває сегменти доріг із виявленою потребою у реагенті, і потім завершує цикл на вихідних станціях.

У таблиці 2.7 наведено фактори впливу на проблему маршрутизації транспортних засобів при зимовому утриманні доріг.

Оскільки перспективними методами вирішення цієї задачі є використання евристичних алгоритмів, то вважаємо за доцільне зупинитися на використанні на першому етапі теорії графів для розв'язання проблеми маршрутизації транспортних засобів. При цьому граф задачі матиме вигляд:

$$G = \{V, L(v_i, v_j)\} \rightarrow \begin{cases} V \in \{v_0: v_n\} \\ L(v_i, v_j) > 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

де V – набір вузлів, від початкового v_0 до завершувального v_n .

$L(v_i, v_j)$ – дуга, встановлена між двома відмінними вузлами.

Для оптимізації цієї задачі необхідно представити граф у вигляді математичної моделі:

$$z = \sum_{k=1}^{k=K} \sum_{i=0}^{i=n-1} \sum_{j=1}^{j=n} c_{ij} x_{ijk} + \varepsilon \rightarrow \min \quad (2.16)$$

де z – функція цілі;

c_{ij} – довжина дуги між вузлами, $c_{ij} \in [v_i, v_j]$;

x_{ijk} – кількість маршрутів між вузлами, $x_{ijk} \in [v_i, v_j]$;

K – кількість шляхів (проходів) спеціальної техніки;

ε – фактор невизначеності.

Таблиця 2.7 – Фактори впливу на проблему маршрутизації транспортних засобів при зимовому утриманні доріг

Фактори впливу	Характеристики фактору	Фактори впливу	Характеристики фактору
Мережа доріг	Неорієнтований граф / орієнтований граф / змішаний графік	Транспортний засіб для розкидання протиожезедних матеріалів	Місткість транспортного засобу / тип транспортного засобу / обмеження на маршруті / постійна та змінна вартість обслуговування спецтехніки
Ділянка дороги	Клас дороги / час, витрачений на обслуговування та під'їзну дорогу / часове «вікно» обслуговування ділянки дороги / довжина ділянки дороги / обмеження кількості проїздів	Маршрутизація	Початкова та кінцева точка маршруту / балансування навантаження, безперервність обслуговування та чергування на маршруті / тривалість виїзду на маршрут / тривалість самого маршруту / поділ маршруту на ділянки / кількість операцій / операційна область маршруту (кількість районів, доріг, ділянок)
Станція	Розташування та кількість станцій / потужність, постійна та змінна вартість обслуговування станції	Цілі оптимізації	Мінімальний пробіг порожнього автомобіля / мінімальна кількість задіяних транспортних засобів для розкидання протиожезедних матеріалів / мінімальні витрати матеріалів / мінімальна загальна вартість операцій

До моделі пропонуються обмеження [85]:

- 1) район виконання робіт обслуговується агентством, потужності якого знаходяться в цьому районі;
- 2) метрологічні умови та природні особливості району обслуговування відомі заздалегідь;
- 3) кожен транспортний засіб обслуговує лише один район;
- 4) дорога обслуговується щонайменше один раз.

В результаті моделювання рішення щодо маршруту приймається за бінарним програмуванням (*np*-повна задача) при умові:

$$x_{ijk} \in \begin{cases} 1 \rightarrow L(v_i, v_j) \in k \\ 0 \rightarrow otherwise \end{cases} \quad (2.17)$$

Крім того, варто врахувати невизначеність та випадкові події, що зазвичай у нормативах позначаються у вигляді відсотка відхилення від отриманого значення. Тому слід здійснювати моделювання за наступними припущеннями:

1) Припустимо, що положення станції було визначено в районі дослідження, і кожна станція була визначена призначений для зони обслуговування, а саме регіону діяльності. Кожен район роботи обслуговується спеціалізованими транспортними засобами з тієї ж станції.

2) Припустимо, що довжина, ширина, снігопад і температура, вологість, напрям вітру та інші дані кожної дороги секції відомі, тобто кількість необхідної солі для протижеледної обробки можна оцінити перед початком роботи.

3) Кожен транспортний засіб для розкидання реагенту обслуговує лише один шлях. Розкидач стартує зі станції з протижеледною сіллю, після завершення запланованих робіт з обробки доріг повертається на станцію.

4) Кожну ділянку дороги необхідно включати в модель хоча б один раз, але вона може оброблятися більше ніж один раз.

Модель задачі маршруту транспортного засобу для розкидання протиожеледної солі можна побудувати наступним чином:

$$z = \sum_{k \in K} \sum_{(v_i, v_j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \rightarrow \min, \quad (2.18)$$

$$\sum_{\{v_j: (v_j, v_i) \in A\}} x_{jik} - \sum_{\{v_j: (v_i, v_j) \in A\}} x_{ijk} = 0; \quad (v_i \in V, k \in K), \quad (2.19)$$

$$\sum_{k \in K} (y_{ijk} + y_{jik}) = 1; \quad ((v_i, v_j), (v_j, v_i) \in R_l), \quad (2.20)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ijk} = 1; \quad ((v_i, v_j) \in R_2), \quad (2.21)$$

$$x_{ijk} \geq y_{ijk}; \quad ((v_i, v_j) \in A, k \in K), \quad (2.22)$$

$$l \leq \sum_{(v_i, v_j) \in A} q_{ij} y_{ijk} \leq Q; \quad (k \in K), \quad (2.23)$$

$$\sum_{\{v_j: (v_0, v_j) \in A\}} x_{0jk} = 1; \quad (k \in K), \quad (2.24)$$

$$\sum_{\{v_i: (v_i, v_0) \in A\}} x_{i0k} = 1; \quad (k \in K), \quad (2.25)$$

$$\sum_{v_i, v_j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 + |V|^2 u_k^S; \quad (S \subseteq V / \{v_0\}, S \neq \emptyset, k \in K), \quad (2.26)$$

$$\sum_{v_i \in S} \sum_{v_j \notin S} x_{ijk} \geq 1 - b_k^S; \quad (S \subseteq V / \{v_0\}, S \neq \emptyset, k \in K), \quad (2.27)$$

$$u_k^S + b_k^S \leq 1; \quad (S \subseteq V / \{v_0\}, S \neq \emptyset, k \in K), \quad (2.28)$$

$$u_k^S, b_k^S \in \{0, 1\}; \quad (S \subseteq V / \{v_0\}, S \neq \emptyset, k \in K), \quad (2.29)$$

$$x_{ijk}, y_{ijk} \in \{0, 1\}; \quad ((v_i, v_j) \in A, k \in K), \quad (2.30)$$

де K – коефіцієнт, що визначає набір маршрутів (шляхів);

R_1 – набір односпрямованих дуг;

R_2 – набір двосторонніх дуг;

l – величина балансу навантаження транспортного засобу для розкидання;

w_k – місткість транспортного засобу, що відповідає маршруту обслуговування k .

Змінні рішення:

$$x_{ijk} \in \begin{cases} 1 \rightarrow \text{arc}(v_i, v_j) \in k \\ 0 \rightarrow \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2.31)$$

$$y_{ijk} \in \begin{cases} 1 \rightarrow \text{arc}(v_i, v_j) \in k \\ 0 \rightarrow \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2.32)$$

Цільова функція (2.18) мінімізує загальний пробіг машин для розкидання реагентів. Формула (2.19) показує, що обмеження збереження потоку для вузлів. Формули (2.20) і (2.21) гарантують, що кожна ділянка дороги, що потребує зимового утримання, отримає роботи з обслуговування. Формула (2.22) показує,

що час доступу до кожної ділянки дороги не може бути менше часу обслуговування. Формула (2.23) визначає обмеження потужностей. Формули (2.24) і (2.25) визначають, що розкидачі мають починати маршрут зі станції базування, а по завершенню робіт – повернутися на станцію. Формули (2.26) – (2.30) встановлюють сингулярні обмеження. Формули (2.31) – (2.32) відображають змінні рішення в межах 0 або 1.

Проблема маршрутизації спеціальної техніки при зимовому утриманні доріг є типовою пр-повною задачею, тому важко знайти оптимальне рішення за розумний час розрахунку або застосувати точний алгоритм рішення. Зокрема, в сучасній науковій літературі пропонується задачу вирішувати за допомогою генетичного алгоритму. Оскільки генетичний алгоритм є одним із інструментів інтелектуального пошуку, його застосування дозволяє безпосередньо не впливати на змінні. Проте, він має базуватися на використанні набору параметрів для кодування, чим може слугувати розроблена математична модель.

2.4 Методи оптимізації витрат протиожеледних матеріалів

Агресивний вплив льоду, що утворився, на поверхню штучних об'єктів може в кінцевому підсумку призвести до серйозних наслідків в їх роботі. При обмерзанні погіршуються якість і характеристики обладнання, приладів, будівельних конструкцій, що позначається на довговічності їх експлуатації. Затримки із вжиттям заходів проти зледеніння покриттів мережі автомобільних доріг ставлять під загрозу безпеку дорожнього руху. Для боротьби з обмерзанням розроблені різні способи, такі як механічне розморожування, використання солей, нанесення гідрофобного покриття на поверхні, обробка ультразвуком і електрообігрів тощо.

Переваги використання моделі багаторівневого вирішення задачі зимового утримання доріг були описані в [89] на основі моніторингу та прогнозування погодних умов та стану дорожнього покриття в Словаччині. У цій системі

автоматичний збір даних і передачу забезпечували дорожні метеостанції, які завчасно попереджали про ситуації потенційної небезпеки на дорозі, такі як мороз, лід, туман, мокра або засніжена поверхня. Важливі дані з цих метеостанцій разом із моделями прогнозу погоди та даними з метеорадарів і супутників, були оброблені, представлені у вигляді діаграм і використані для моделі передбачення погіршення стану покриття в зимовий період. Результати дослідження можуть забезпечувати інформаційну підтримку для прийняття правильного рішення щодо зимового експлуатаційного утримання та ефективної й своєчасної обробки доріг у зимовий період. Іншою частиною системи зимового обслуговування є динамічна диспетчеризація, яка виконується онлайн з оперативним моніторингом і управлінням процесами.

Вдосконалення системи забезпечення водіїв інформацією, зокрема використання змінних інформаційних табло, є важливим елементом контролю трафіку на небезпечних ділянках доріг. Це сприяє підвищенню безпеки руху, оскільки наявність снігу та льоду на дорожньому покритті є вагомою причиною для регулювання швидкості транспортних засобів водіями.

Дослідження [90] підтвердило, що впровадження ефективних моделей зимового утримання призводить до скорочення як споживання пального, так і викидів забруднюючих речовин. Це дослідження було сфокусоване на кількісному встановленні зв'язку між зимовими умовами дорожнього покриття та обсягами викидів від транспортних засобів.

Автори розробили моделі розподілу швидкості для окремих автомагістралей Онтаріо (Канада). Розрахунок викидів транспортних засобів за різних умов дорожнього покриття здійснювався на основі вимірювання показника зчеплення. Було встановлено, що покращення умов під час зимового утримання доріг лише на 10% призводить до зменшення повітряних викидів у середньому на 0,6–2%.

У дослідженнях [90] було відзначено, що при довгостроковому плануванні дорожні агентства стикаються з постійними проблемами у підтримці

ефективності програм обслуговування. Це пов'язано з необхідністю забезпечення високих рівнів обслуговування (LOS), гарантуванням безпеки руху та одночасним дотриманням екологічно відповідальних методів боротьби зі слизькістю.

Оцінка за методом «вигоди–витрати» (Cost–Benefit Analysis), проведена у США [91], продемонструвала, що використання прогностичної метеорологічної інформації приносить більше переваг, ніж витрат. Найвище співвідношення вигоди до витрат було досягнуто у штаті Мічиган завдяки низькій вартості метеорологічного обслуговування.

Однак, частка вигод від загальних витрат на зимове утримання становила лише: для штату Айова – 5,6%; Невада – 6,5%; Мічиган – 0,9%.

Незважаючи на найвище співвідношення вигоди до витрат, відсоток вигод від загальних витрат у Мічигані виявився найнижчим. Це свідчить про те, що абсолютні показники вигоди та витрат у цьому дослідженні не можуть дати повної картини економічної ефективності ситуації.

В роботах [91-92] описано прямі та непрямі переваги для користувачів доріг, соціальну ефективність від ефективного зимового утримання доріг. Була проведена робота з кількісної оцінки переваг довгострокового зимового утримання за рівнями обслуговування, в тому числі вплив на покращення безпеки та комфорту дорожнього руху, витрати часу в дорозі і заощадження пального. Також підкреслено, що рішення про початок роботи з ліквідації зимової слизькості залежить від наявності надійного прогнозу погоди. Специфічна інформація про погоду на маршруті, наприклад опади, повітря динаміка температури під час та після шторму, напрямок та швидкість вітру; знання в режимі реального часу стан поверхні тротуару, такий як температура тротуару, стан (мокрый чи сухий) тощо впливає на рішення коли початок робіт з зимового утримання і що застосувати.

Однією з важливих задач дорожньої служби є оптимізація витрат протиожезедних матеріалів [93]. Ряд дослідників [54, 94-96] цього питання

схиляються до необхідності при плануванні запасів протиожеледних матеріалів врахування так званого індексу опадів, а також різних сценаріїв розкиду матеріалу. Зокрема, в дослідженнях [94, 95] мова йде про превентивні міри (попередню обробку доріг), полив розчином або розкид сухих реагентів (або солі). Дослідниками [96, 54] пропонується застосовувати метод оцінки життєвого циклу (LCA) та систему керування дорожньо-погодною інформацією для прийняття управлінських рішень щодо заходів з зимового утримання (розкид протиожеледних матеріалів або снігоочищення доріг). Окремими дослідженнями [97] підкреслена необхідність регулювання витрат протиожеледних матеріалів з боку їх негативного впливу на довкілля, існуючі об'єкти інфраструктури та на користувачів доріг. Проте, слід зазначити, що науковцями не в достатній мірі обґрунтовано застосування того чи іншого математичного методу розрахунку витрат протиожеледних матеріалів при різних сценаріях розкиду матеріалу. Таким чином, розробка методу оптимізації витрат протиожеледних матеріалів при зимовому утриманні мережі автомобільних доріг є актуальною науковою задачею прикладного характеру.

Оптимізація витрат протиожеледних матеріалів є комплексною багатокритеріальною задачею, яка ускладнюється фактором високої невизначеності.

Ця складність обумовлена кількома критичними чинниками:

1. Тривалість контрактів та необхідність стабільного фінансування. Довгострокові контракти на експлуатаційне утримання автомобільних доріг часто укладаються на термін не менше ніж два роки. Це вимагає безперебійного та сталого фінансування, що накладає жорсткі обмеження на вибір методів управління запасами та витратами в умовах непередбачуваності погодних умов.
2. Множинність факторів та цільових показників. Вибір оптимального методу ускладнюється необхідністю враховувати множину взаємозалежних факторів (кліматичні умови, інтенсивність руху, категорія доріг) та цілей

контракту (дотримання встановленого рівня обслуговування (LOS), мінімізація екологічного впливу, обмеження бюджету).

3. Еволюція технологій. Методи оптимізації постійно еволюціонують. Це призводить до появи все більшої кількості інноваційних моделей, алгоритмів та підходів (наприклад, методи на основі машинного навчання, імітаційного моделювання), що ускладнює вибір найбільш доцільного та економічно обґрунтованого рішення для конкретних проєктів експлуатаційного утримання.

Отже, ефективний вибір стратегії оптимізації витрат протиожеледних матеріалів вимагає застосування складних аналітичних інструментів, здатних нівелювати вплив невизначеності та інтегрувати різноманітні економічні й технічні цілі.

Висновки до розділу 2

1. Визначено, що гідрометеорологічні фактори зимового періоду чинять домінуючий деструктивний вплив на транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг. Це проявляється у критичному зниженні рівня безпеки руху, де ризик ДТП зростає у 6–12 разів в умовах ожеледиці, що прямо корелює зі зниженням коефіцієнта зчеплення на 60–90%. Одночасно, процеси замерзання-відтавання та хімічна агресія протиожеледних реагентів призводять до ініціювання до 70% усіх дефектів покриття і зниження несучої здатності дорожнього одягу на 30–60% у весняний період.

2. Встановлено, що зимове утримання доріг передбачає необхідність прийняття управлінських рішень, пов'язаних з маршрутизацією транспортних засобів для розповсюдження хімічних реагентів та абразивних матеріалів, очищення проїзної частини, тротуарів від снігових наметів, завантаження снігу на вантажні автомобілі та транспортування його до місць утилізації. Ці проблеми є дуже складними та специфічними через різноманітність факторів та умов, що впливають на проведення робіт по зимовому утриманню автомобільних доріг.

Світовий досвід вирішення даних проблем полягає у застосуванні методів імітаційного моделювання, у результаті яких можна досягти економії часу та витрат матеріальних ресурсів експлуатаційних організацій, які займаються зимовим утриманням автомобільних доріг. З урахуванням цих підходів виконано постановку задачі маршрутизації з використанням основних положень теорії графів. Метою вирішення цієї задачі є знаходження оптимального циклу, який обслуговує всі необхідні дуги з мінімальною загальною вагою (мінімальним часом або відстанню).

3. З'ясовано, що не в достатній мірі обґрунтовано застосування того чи іншого математичного методу розрахунку витрат протиожедних матеріалів при різних сценаріях розкиду матеріалу. Таким чином, розробка методу оптимізації витрат протиожедних матеріалів при зимовому утриманні мережі автомобільних доріг є актуальною науковою задачею прикладного характеру.

4. Модель процесів боротьби з зимовою слизькістю на мережі автомобільних доріг має базуватися на математичному вирішенні проблеми маршрутизації, а також удосконалених методах розрахунку витрат протиожедних матеріалів при різних сценаріях розкиду матеріалу.

Основні результати досліджень за розділом 2 висвітлено в роботах автора [67, 71, 72, 87, 88, 93].

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО УТРИМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У ЗИМОВИЙ ПЕРІОД

3.1 Формування математичної моделі обґрунтування рівня обслуговування доріг з урахуванням зимових гідрометеорологічних чинників

Показники ефективності витрат протиожедних матеріалів є індикаторами того, наскільки добре операції з зимового утримання доріг відповідають очікуванням дорожньої організації та споживачів доріг [99]. Таким чином, об'єктом дослідження є процеси управління витратами протиожедних матеріалів при зимовому утриманні автомобільних доріг.

Виконання зимового експлуатаційного утримання мережі доріг починається з вибору найбільш оптимальної стратегії утримання. Однією з найпоширеніших стратегій є стратегія боротьби з ожеледицею. Суть цієї стратегії полягає в тому, щоб мінімізувати час перебування снігу та льоду на покритті доріг. Протиожедні матеріали в такому разі застосовуються превентивно (до початку снігових опадів) для запобігання утворенню твердого ущільненого шару снігу, а також повторно під час прибирання снігу. Інша стратегія – виконувати заходи під час або після опадів з урахуванням дотримання стандартів з безпеки дорожнього руху. Основними операціями в такому разі є прибирання снігу, утримання та посипання піском або сумішами. Відповідно до світового досвіду вибір стратегії експлуатаційного утримання регулюється рівнем обслуговування (LOS) [59, 60]. Прийняття стратегічних рішень веде в обов'язковому порядку до необхідності обґрунтування ряду тактичних рішень, наприклад, час застосування реагентів, норма, час виконання механічного видалення снігу тощо (рис. 3.1). Кожне тактичне рішення є вимірюваним та

відповідає окремим вимогам рівня обслуговування щодо надійності, збереження активів, безпеки дорожнього руху, задоволення потреб користувачів доріг, відповідності критеріям ефективності та екологічності застосованих протиожеледних матеріалів.

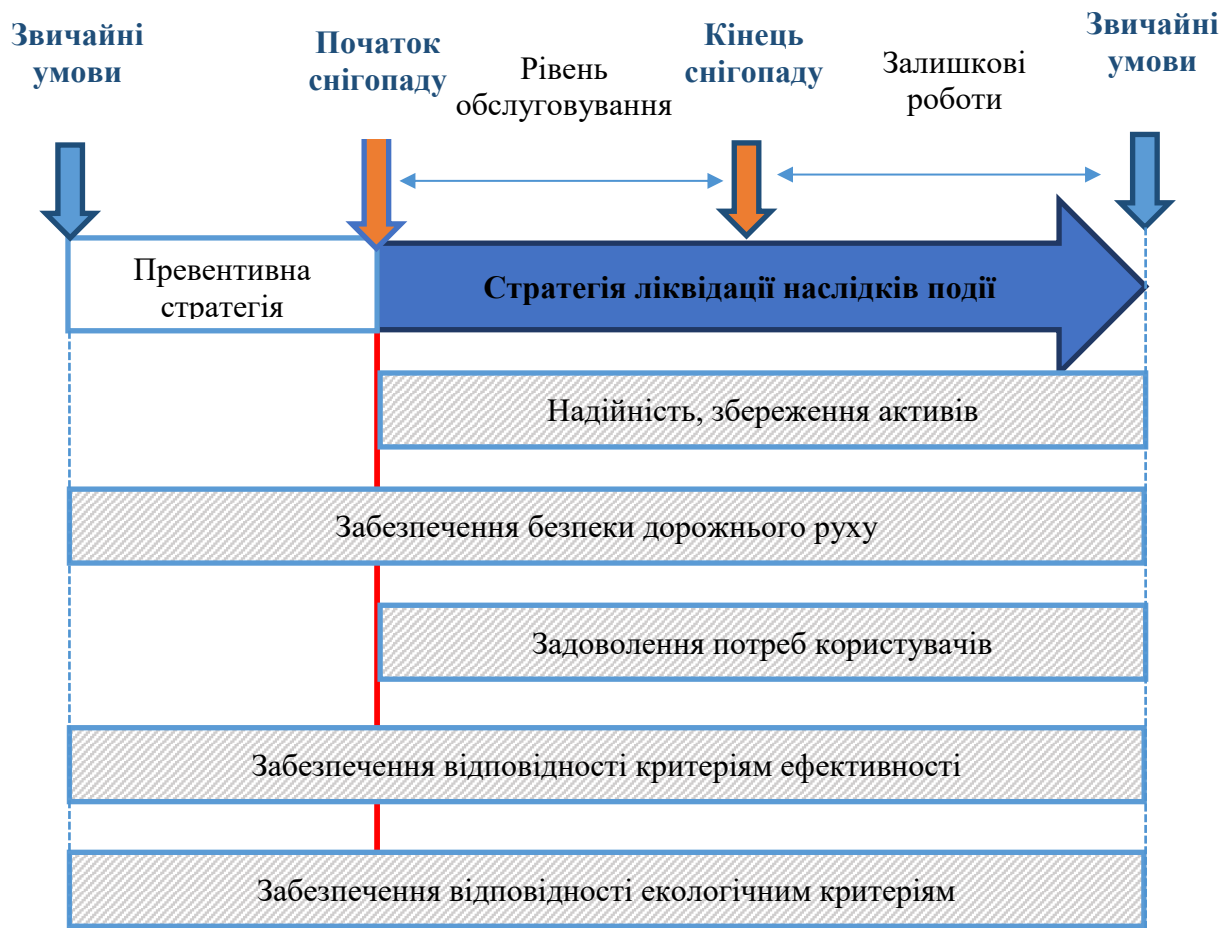


Рисунок 3.1 – Тактичні та стратегічні цілі утримання доріг в зимовий період

Таким чином рівень обслуговування доріг в зимовий період можна задати функцією:

$$LOS_w = f(S, T_v, O, \bar{M}, I_w), \quad (3.1)$$

де S – стратегія зимового утримання;

T_V – тривалість операцій, год.;

O – вид операції (тактичне рішення за стратегією);

M – середньогодинна норма витрат матеріалу, одиниці виміру відповідно до виду матеріалу (зазвичай, т/год.);

I_W – погодний індекс.

Призначення рівня обслуговування також залежить від наступних параметрів:

- інтенсивності дорожнього руху на ділянці, значення та категорії доріг;
- спостережуваної інтенсивності опадів;
- дня тижня (робочі, неробочі дні);
- часу доби (пікові години).

Розрахунок норми витрат матеріалів базується на припущення, що усі параметри норми рівномірно розподілені в часі.

Середньогодинна норма витрат матеріалу на кожну ділянку патрулювання визначається за формулою (3.2):

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^{i=W} \sum_{j=1}^{j=V} \sum_{t=1}^{t=T} M_{i,j,t}}{X \times W \times V \times T}, \quad (3.2)$$

де $M_{i,j,t}$ – норма витрат i -того протиожезедного матеріалу при j -тій події на ділянці патрулювання за t годин часу, одиниці виміру відповідно до виду матеріалу (зазвичай, т/год.);

X – кількість смуг руху;

W – кількість протиожезедних матеріалів відповідно до виду матеріалу (зазвичай, т);

V – кількість подій (операцій) на ділянці патрулювання;

T – загальна тривалість операції, год.

У випадку оптимізаційної моделі формула (3.2) матиме вигляд:

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^{i=W} \sum_{j=1}^{j=V} \sum_{t=1}^{t=T} M_{i,j,t}}{X \times W \times V \times T} \rightarrow \min. \quad (3.3)$$

При обмеженнях моделі:

$$\begin{cases} T \rightarrow \min, \\ \bar{M} \geq M_a, \\ V \geq V_a, \end{cases} \quad (3.4)$$

де M_a – гранична норма витрат протиожеледних матеріалів, одиниці виміру відповідно до виду матеріалу (зазвичай, т/год.);

V_a – гранична кількість подій відповідно до рівня обслуговування (LOS).

Витрата матеріалів, приведена до протяжності ділянок патрулювання:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{i=W} \sum_{j=1}^{j=V} \sum_{t=1}^{t=T} \frac{M_{i,j,t}}{L_{i,j,t}}}{X \times W \times V \times T}, \quad (3.5)$$

де $L_{i,j,t}$ – протяжність ділянки патрулювання, де використано i -тий протиожеледний матеріал при j -тій події за t годин часу, км.

Показник витрат матеріалів також може бути розрахований на одиницю площі, тоді у формулі (3.5) замість протяжності ділянок патрулювання буде застосована змінна площі:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{i=W} \sum_{j=1}^{j=V} \sum_{t=1}^{t=T} \frac{M_{i,j,t}}{Sq_{i,j,t}}}{X \times W \times V \times T}, \quad (3.6)$$

де $Sq_{i,j,t}$ – площа ділянки патрулювання, де використано i -тий протиожеледний матеріал при j -тій події за t годин часу, m^2 .

Слід зазначити, що вибір того чи іншого протиожеледного матеріалу передусім залежить від температури покриття та обраної стратегії експлуатаційного утримання.

Таким чином, уточнюючи умови і обмеження матимемо математичну модель оптимізації витрат матеріалів, яка базується на двійковій системі числення:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{i=W} \sum_{j=1}^{j=V} \sum_{t=1}^{t=T} \frac{M_{i,j,t}}{L_{i,j,t}}}{X \times W \times V \times T} \rightarrow \min \left| \begin{array}{l} 1; \forall t^0, M_{i,j,t} \rightarrow \forall M_{i,j,t}, S \\ 0; \forall t^0, M_{i+1,j,t} \rightarrow \forall M_{i+1,j,t}, S' \end{array} \right. \quad (3.7)$$

де t^0 – температура покриття автомобільної дороги, C° ;

1 – i -тий протиожеледний матеріал відповідає температурним умовам використання та прийнятій стратегії;

0 – $i+1$ -ший протиожеледний матеріал відповідає температурним умовам використання та прийнятій стратегії.

Додатковими обмеженнями до прийнятої стратегії є відповідність критеріям надійності, збереження активів, безпеці дорожнього руху, відповідності очікуванням користувачів (соціальний фактор), екологічності, ефективності застосування матеріалів:

$$\bar{Q} \in f \cup \{F_N, F_A, F_{RS}, F_S, F_E, F_{LOS}, F_{KPI}\}, \quad (3.8)$$

де F_N – критерій надійності;

F_A – критерій збереження активу;

F_{RS} – критерій забезпечення безпеки дорожнього руху;

F_S – критерій відповідності очікуванням користувачів (соціальний фактор);

F_E – критерій екологічності;

F_{LOS} – критерій відповідності вимогам стандартів рівня обслуговування;

F_{KPI} – критерій ефективності застосування протиожеледних матеріалів.

Таким чином, послідовність застосування запропонованого методу можна графічно відобразити у вигляді послідовності (алгоритму) (рис. 3.2).

Завданнями розробленого методу є мінімізація витрат протиожеледних матеріалів з урахуванням:

- вимог рівня обслуговування,
- обраної стратегії,
- температури покриття автомобільної дороги,
- критерії впливу на зимове утримання.

Розрахунок витрат протиожеледних матеріалів за методом, що становить основу удосконаленої технології зимового утримання доріг, пропонується здійснити за рахунок функціоналу пошуку цільового значення «Пошук рішення» (Solver) – вбудованого аналітичного інструментарію ліцензійного програмного середовища Microsoft Excel (США).

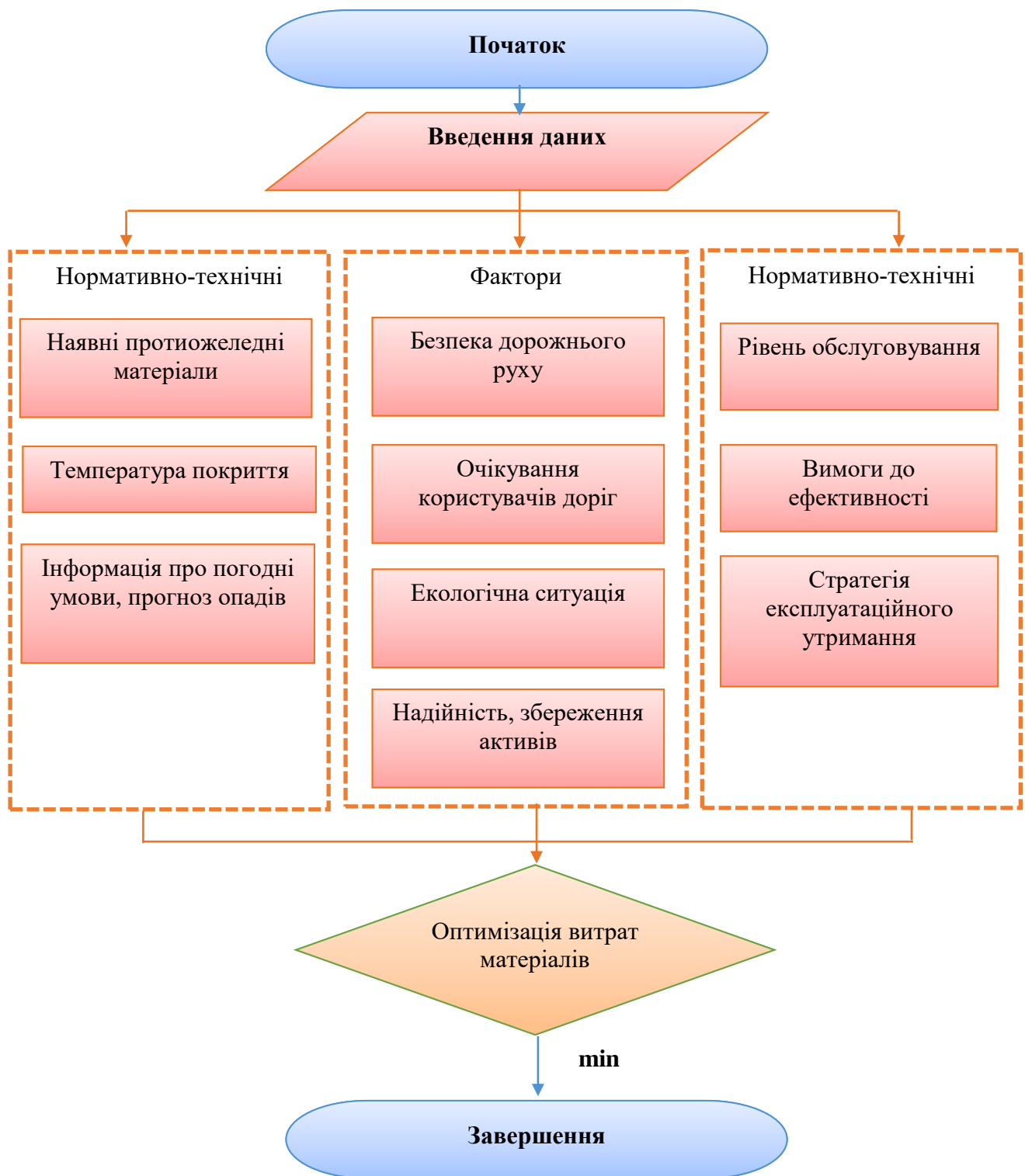


Рисунок 3.2 – Послідовність (алгоритм) застосування методу оптимізації витрат протиожеледних матеріалів при зимовому утриманні автомобільних доріг

3.2. Обґрунтування вдосконаленої технології застосування протижеледних матеріалів та оптимізація маршрутів снігоприбиральної техніки

Зимове утримання автомобільних доріг є складним та вартісним процесом. У більшості випадків погода залишається складно передбачуваним явищем незалежно від регіону, країни чи континенту. В Україні до цього додаються ще й доволі часті переходи через нуль градусів, які роблять велику частину заходів, популярних за кордоном, потенційно неефективними. Таким чином, незалежно від інтенсивності та тривалості зима залишається сезоном непередбачуваності для дорожніх служб. Ця непередбачуваність справляє значний вплив як на рух транспорту та пішоходів, так і на перевезення (потік товарів і послуг). Несприятливі зимові умови і виконані заходи впливають на термін служби об'єктів інфраструктури та, що ще важливіше, на їх доступність та безпеку. Дорожня служба повинна забезпечувати безпеку всіх користувачів доріг та підтримувати в належному стані дорожню інфраструктуру, що в свою чергу впливає на розвиток економічної та соціальної діяльності регіону обслуговування. Сьогодні в управлінні дорожньою мережею дорожні адміністрації стикаються з низкою проблем щодо оперативного врахування кліматичних змін та зростання витрат на експлуатаційне утримання доріг. Тому, належне планування та застосування сучасних методів зимового утримання доріг є актуальною задачею сьогодення.

Дороги є ключовим елементом для економічного та соціального розвитку країни. Організація та здійснення експлуатаційного утримання доріг в зимовий період суттєво відрізняються в контексті різних країн, оскільки країни мають:

- різні організаційні рівні (централізований, регіональні та місцеві);
- різні форми планування та організації роботи;
- різні підходи до управління мережею;

- різні заходи з експлуатаційного утримання, що застосовуються на мережі доріг залежно від тяжкості погодних явищ.

Усі роботи, виконувані у зимовий період, поділяються на такі групи: снігоочисні, видалення снігу та сколу, боротьба із слизькістю доріг, ліквідація ожеледиці.

Оцінка заходів зимового утримання доріг, що спостерігається у різних країнах, приймає різні форми залежно від поставлених цілей та проблем дорожніх організацій. Відповідно до:

- індикатору якості або стандарту, що дозволяє контролювати якість заходів з експлуатаційного утримання;
- обліку та аналізу витрат, пов'язаних з зимовим утриманням доріг;
- організованої системи управління;
- стандартів з огляду та моніторингу робіт;
- вимірювання відповідності надання послуг;
- аналізу скарг від користувачів дорожньої мережі;
- методів прогнозування та запобігання певних зимових явищ.

Стратегічною програмою досліджень доріг (SHRP) та FHWA запропоновано використовувати для оцінки серйозності впливу погоди на зимове утримання індекс WSI [69]. Взагалі погодні індекси мають переваги, пов'язані з простотою використання/інтерпретації, за умови, якщо система оцінювання адекватно відображає зимові погодні явища. Цей індекс розраховується на підставі усередненого значення щоденного снігопаду та зафіксованої мінімальної та максимальної температури в середньому за сезон. Крім того, деякі держави розробили свої власні показники для зимового утримання доріг. Індекс WSI можна визначити за запропонованою SHRP формулою:

$$WSI = a\sqrt{I_T} + b \times \ln\left(\frac{S}{10} + 1\right) + c\sqrt{\frac{N}{R+10}} + d \quad (3.9)$$

де I_T – температурний індекс;

$I_T = 0$, якщо мінімальна температура повітря вище 32°F (0°C);

$I_T = 1$, якщо максимальна температура повітря вище 32°F , при цьому мінімальна температура повітря знаходиться на рівні або нижче 32°F (0°C);

$I_T = 2$, якщо максимальна температура повітря знаходиться на рівні або нижче 32°F (0°C). Використовується середньодобове значення;

S – рівень опадів: середні добові значення в міліметрах;

N – кількість заморозків – середньодобові значення кількості днів із мінімальною температурою повітря біля 32°F (0°C) або нижче ($1 \leq N \leq 1$);

R – діапазон температур – значення середньомісячної максимальної температури повітря мінус середня місячна мінімальна температура повітря в $^{\circ}\text{C}$.

a , b , c та d – коефіцієнти, для визначення яких застосовується регресійний аналіз.

WSI має діапазон $[-50; 50]$:

- 50 – найсуворіша погода і максимальний рівень контролю снігу та льоду);

0 – не надто сувора погода і середній рівень снігу та льоду;

до 50 – тепла погода і немає необхідності контролю снігу та льоду).

Результати прогнозування опадів та рівень індексу WSI є підставою для визначення експлуатаційного рівня обслуговування, який формує набір потенційних заходів з зимового утримання доріг. Основним переліком показників (так званою таксономією), які використовуються на даний момент для оцінки та призначення потенційних заходів з зимового утримання, виходячи із зарубіжного досвіду є [51]:

1. Характеристики/серйозність снігових опадів.
2. Модель управління протиожеледними матеріалами.
3. Модель розподілу трудових ресурсів.
4. Рівень реагування на експлуатаційне утримання.
5. Результати реагування на експлуатаційне утримання (ефекти).

6. Рівень оперативного реагування.
7. Досвід, мобільність і безпека.
8. Вартість заходів, бюджет і фінансування.
9. Транспортний потік.
10. Економічна ефективність.

Класифікацію елементів показників якості зимового утримання доріг наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація елементів показників якості зимового утримання доріг (адаптовано з [51])

Показник	Опис
Визначення елементу	Класифікація згідно рівня обслуговування
Тип	Вхідне/вихідне вимірювання / вимірювання результату
Одиниці виміру	Типові одиниці виміру для елементу
Вимоги до збору даних	Типові вимоги до збору даних якісних показників
Вимоги до методу збору даних	Вимоги до методу збору даних відповідно до затверджених стандартів та рекомендацій
Географічна приналежність	Ділянка, сегмент, регіон
Погодні явища	Типи погодних явищ, що справляють вплив на елемент
Часовий проміжок вимірювання	Чи можливе вимірювання в режимі реального часу чи ні
Утримання	Види заходів з експлуатаційного утримання
Вимоги	Критерії втручання, вимоги до технології виконання заходів та збору даних
Тип критерію прийняття рішення	Критерії прийняття рішення щодо використаних протижеледних матеріалів, розміщення техніки та підрозділів тощо
Варіанти	Альтернативні рішення за рівнем обслуговування

Модель зимового утримання доріг базується на врахуванні трьох основних аспектів [52, 68, 100] (табл. 3.2, рис. 3.3): входи (вхідні показники); виходи; результати.

Таблиця 3.2 – Показники моделі зимового утримання доріг

Показник	Опис
входи (вхідні показники)	ресурси, витрачені або використані для виконання операцій по боротьбі з зимовою слизькістю, включаючи використання палива, час роботи працівників, машин, механізмів і обладнання, а також матеріали. Рівень ресурсів прямо пропорційний витратам дорожнього підприємства, і, отже, вони найлегше і найчастіше можуть бути чітко визначені
виходи	результати, які кількісно визначають фізичне виконання робіт, при застосуванні ресурсів в зимовому утриманні доріг
результати	показники результативності, які враховують відносне значення ефективності діяльності дорожнього підприємства по зимовому утриманню. Дуже часто визначаються з точки зору користувача або замовника. Результати по суті важче виміряти. Бажаний результат зимового утримання може включати підвищення безпеки руху, зменшення втрат у часі та / або задоволеність користувачів

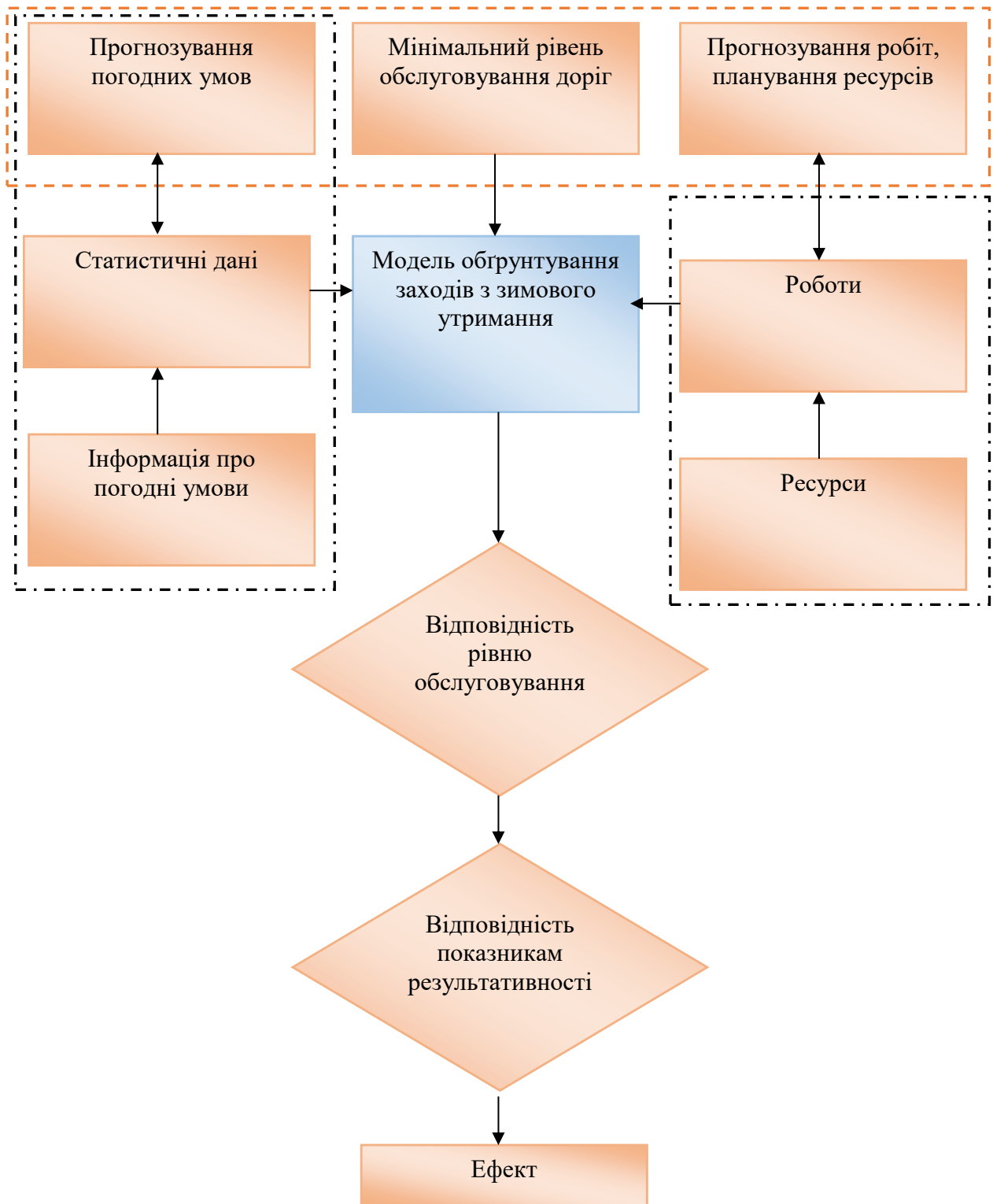


Рисунок 3.3 – Модель обґрунтування заходів з зимового утримання доріг

Прийняття рішення щодо утримання доріг у зимовий період виходячи із зарубіжного досвіду базується перш за все на математичній моделі (рис. 3.4).

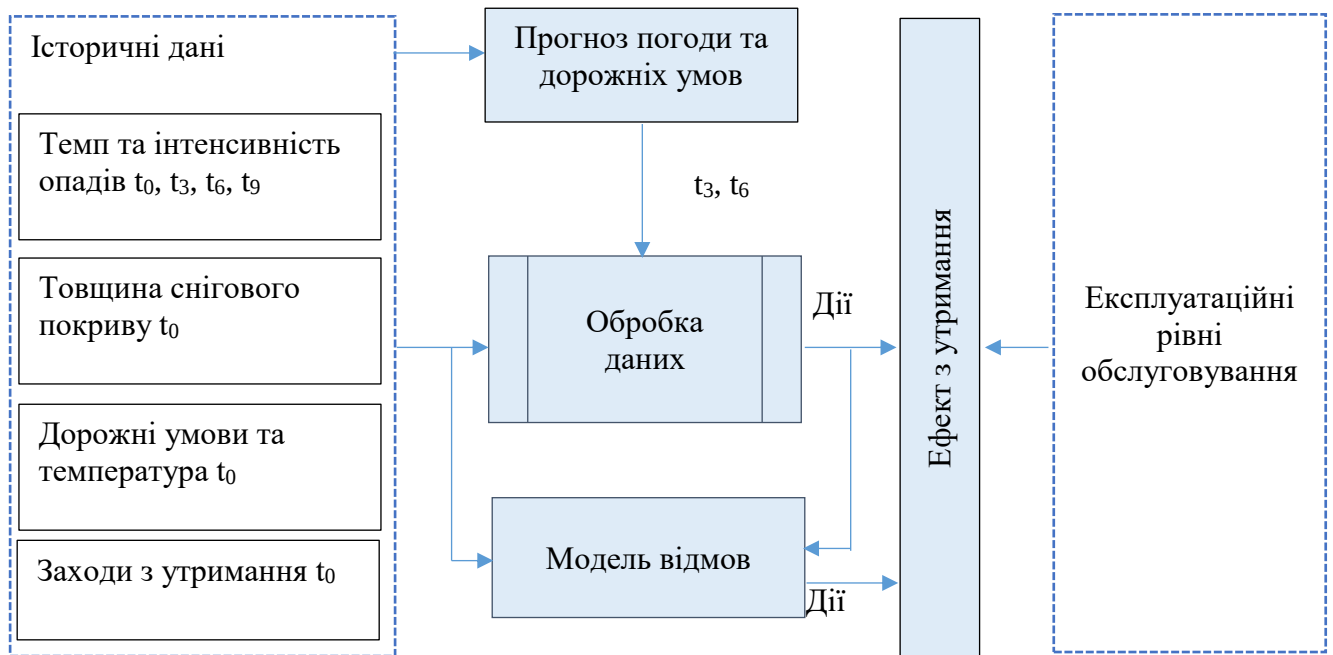


Рисунок 3.4 – Модель прогнозування заходів з експлуатаційного утримання доріг у зимовий період (адаптовано з [99])

Таким чином, виходячи з моделей зимового утримання та прогнозування заходів (рис. 3.2 – 3.4) та підходів [60, 61, 101, 102], можна побудувати математичну функцію:

$$PO_3 \in f\{G, S, LTC, X, Y, y, f(x), WSI\}, \quad (3.10)$$

де PO_3 - обґрунтований рівень обслуговування доріг в зимовий період;

G – масив історичних даних про об'єкт обслуговування;

S – методи обробки даних, моделі прийняття рішень;

LTC – прогнозування довгострокового утримання за допомогою спеціального пакету програм (наприклад, LTCsimula, запропонованого в [60]);

X – умови та обмеження;

Y – плановані дії з експлуатаційного утримання;

y – прогнозовані дії з урахуванням моделі відмов;

$f(x)$ – функція часових проміжків аналізу даних, $f(x) \in \{t_0, t_3, t_6, t_9\}$.

Виходячи з функції (3.10) можна відобразити математичну модель зимового утримання доріг:

$$\sum_i \sum_t \beta_i \cdot G_{i,t} \rightarrow \min, \quad (3.11)$$

де β_i – ваговий коефіцієнт елементу дороги.

Служби автомобільних доріг повинні визначати рівні обслуговування доріг для зимового утримання, виходячи із аналізу накопичених даних про погодні явища регіону, пріоритетність доріг, обсяги фінансування та моніторингу ефективності виконаних раніше заходів по боротьбі зі снігом та зимовою слизькістю.

Ключовим завданням переліку показників, які використовуються на даний момент для оцінки та призначення потенційних заходів з зимового утримання, є ідентифікація методів та моделей збору та аналізу інформації для подальшого обґрунтування рівня обслуговування доріг у зимовий період. Тому, враховуючи зарубіжний досвід, запропоновано модель зимового утримання та прогнозування заходів, що дозволяє сформулювати методичний підхід до утримання автомобільних доріг. Модель зимового утримання доріг базується на врахуванні вхідних показників, виходів (фактичних результатів зимового утримання доріг), результатів (показників результативності). Модель прогнозування заходів з експлуатаційного утримання доріг у зимовий період базується на врахуванні рівня обслуговування доріг, масиву історичних даних про об'єкт обслуговування, методів обробки даних, моделей прийняття рішень, інструментів прогнозування довгострокового утримання, умов та обмежень, планованих та прогнозованих дій, часових проміжків аналізу даних. Математична модель утримання доріг у зимовий період є функцією мінімізації накопичених показників якості зимового утримання елементів дороги залежно від їх ваги для утримання. Запропоновані підходи планується реалізувати в

практику дорожніх агентств щодо обґрунтування рівнів експлуатаційного утримання доріг у зимовий період.

Для моделювання стану автомобільної дороги в зимовий період можна застосувати підходи теорії нечіткої логіки.

3.3 Адаптація вдосконаленої технології до проектів довгострокового експлуатаційного утримання доріг у зимовий період

Рівні зимового технічного обслуговування включають теоретичний і максимальний час маршруту для зимових транспортних засобів, які призначені для конкретних маршрутів. Теоретична тривалість маршруту – це розрахунковий час, протягом якого транспортний засіб взимку завершить свій маршрут на основі заданих умов, географічних обмежень, сигналів світлофора та робочих швидкостей. Максимальний час маршруту є вимогою контракту, яку підрядник не має права перевищувати. Коефіцієнти рівня обслуговування зимового технічного обслуговування наведені в таблиці (додаток А). Важливо зазначити, що інтервали технічного обслуговування можуть перевищувати тривалість маршруту через час, необхідний для перевантаження зимових матеріалів, заправки обладнання тощо.

Управління проектами зимового утримання доріг є складною задачею економіко-математичного моделювання. Одним з вагомих невід’ємних параметрів цієї задачі є використання у різних сферах зимового утримання доріг інноваційної техніки та обладнання. Зокрема, це при моніторингу стану доріг, снігоочищенню і боротьбі з зимовою слизькістю, а також при управлінні дорожніми активами у зимовий період. Рішення щодо того, коли, де і яке застосовувати інноваційне обладнання є складним завданням в управлінні проектами зимового утримання доріг.

Обладнання та техніка для превентивної обробки доріг або боротьби з зимовою слизькістю є найважливішим аспектом зимового утримання. Як правило,

це так звана «двокомпонентна» техніка – вантажівка та навісне обладнання, необхідне для зимового утримання доріг. Наявний на ринку техніки великий асортимент навісного обладнання призвів до ряду вдосконалень кріплення до вантажівки цього обладнання, а не самої вантажівки. Крім того, виробники враховують модифікацію обладнання залежно від необхідної потужності для зимового утримання доріг. Традиційно матеріали для зимового утримання зберігаються в бункерах вантажівок, а навісне обладнання має можливість розкидати матеріал на одну смугу. Проте, нещодавно на ринку дорожньої техніки з'явилося обладнання, здатне розкидувати матеріал на декілька смуг руху за один прохід, і вантажівки, що оснащені двома резервуарами – для поєднання сухого та рідкого зберігання протижеледних матеріалів. Це дозволяє скоротити час операцій і підвищити продуктивність праці.

Відповідно до світового досвіду відбувається і еволюція навісного обладнання із снігоочищення – плугів. Зокрема, виробники дорожньої техніки поступово переходять до виробництва лез плугів з твердосплавних матеріалів для забезпечення меншого зносу порівняно зі стандартними сталевими лезами та до комбінації плугів з барабанними насадками для механічного видалення льодового накату з проїзної частини.

Можливість моніторингу навколишнього середовища та його впливу на користувачів доріг є важливим фактором для управління проектами зимового утримання. Моніторинг і прогнозування несприятливих погодних умов, фіксування інтенсивності та швидкості руху, ваговий контроль є важливими індикаторами оптимального зимового утримання. До моніторингового обладнання цих показників відносяться датчики, які встановлені на вантажівку, придорожні датчики, метеостанції, системи зважування в русі тощо. Інноваційним підходом у моніторингу параметрів зимового утримання доріг є застосування сучасного програмного забезпечення з аналізу баз даних, які отримані з датчиків в режимі онлайн, застосування систем глобального позиціонування (GPS) і датчиків автоматичного визначення місця розташування

транспортних засобів (AVL) у поєднанні з датчиками витрат матеріалів в режимі реального часу. Таким чином, це може забезпечити регулярність робіт із зимового утримання, економічність та соціальну ефективність.

Отже, головною перевагою вдосконаленої технології є перехід до проактивного утримання на основі даних, а не реактивного. Замість статичних вимог, довгострокові проєкти мають включати динамічні рівні обслуговування, які корегуються залежно від прогнозів RWIS-систем. Це означає, що пріоритети обслуговування та норми витрат реагентів можуть бути автоматично змінені в залежності від метеорологічного прогнозу (наприклад, рівень обслуговування А вимагається на 6 годин раніше перед прогнозованим «крижаним дощем»). Вдосконалена технологія повинна інтегрувати математичні/імітаційні моделі прогнозування стану дорожнього покриття (наприклад, час утворення ожеледиці, тривалість снігопаду) для своєчасного виходу техніки та превентивного оброблення.

Оскільки довгострокові контракти укладаються від 2 до 7 років, вдосконалення технології повинно відображатися в умовах фінансування. Контракти мають передбачати ключові показники ефективності (KPI), прив'язані до досягнення визначених рівнів обслуговування, а не лише до обсягу виконаних робіт чи витрачених реагентів. Це стимулює підрядника використовувати найбільш ефективні, а не найбільш затратні методи.

Необхідно перейти від фіксованого бюджету на матеріали до гнучкого фінансування, заснованого на прогнозованому обсязі опадів та необхідності забезпечення рівнів обслуговування. Це дозволить запобігти перевитратам у м'які зими та дефіциту в суворі.

Умови довгострокових контрактів повинні включати стимулюючі механізми для підрядника до інвестування у нову техніку (з GPS-контролем дозування) та ІТ-системи, які є невід'ємною частиною вдосконаленої технології.

Адаптована технологія включає системи автоматизованої маршрутизації (Vehicle Routing Problem), які динамічно корегують маршрути техніки в

залежності від фактичних потреб та рівнів обслуговування. Це мінімізує «порожні» пробіги та час реакції.

Організація єдиних диспетчерських центрів, які в режимі реального часу приймають дані від RWIS та GPS-трекерів, приймають рішення про початок робіт і контролюють дотримання рівнів обслуговування.

Довгостроковий контракт на утримання доріг в зимовий період вимагає систематичного навчання персоналу новим технологіям (робота з прогностичними моделями, керування сучасними розкидачами із контролем дозування та використання зволжених солей).

Застосування довгострокових контрактів з експлуатаційного утримання доріг у зимовий період, як правило, дає комплексний позитивний ефект, що охоплює економічну, технічну та соціальну сфери (табл. 3.3 – 3.5).

Таблиця 3.3 – Напрямки прояву економічної ефективності від запровадження довгострокового утримання доріг у зимовий період

Напрямок ефекту	Опис та показники
Зниження загальних витрат	Перехід від щорічних бюджетних циклів до довгострокового планування дозволяє підряднику інвестувати у новітню техніку та систему управління зимовим утриманням, що сумарно знижує витрати на матеріали (до 20–40%) та паливо.
Прогнозованість бюджету	Фіксовані або чітко індексовані платежі протягом 5–7 років мінімізують непередбачені витрати, пов'язані з аномально суворими зимами.
Оптимізація капітальних витрат	Забезпечення високого рівня обслуговування подовжує міжремонтні терміни дорожнього покриття, зменшуючи необхідність у великих капітальних ремонтах.

Таблиця 3.4 – Технічний та операційний ефект від запровадження довгострокового утримання доріг у зимовий період

Напрямок ефекту	Опис та показники
Гарантований рівень обслуговування	Контракти чітко визначають, через який час (наприклад, 2-4 години після закінчення снігопаду) дорога має бути очищена до певного стану (наприклад, «мокре покриття»). Це підвищує операційну дисципліну.
Стимулювання інновацій	Оскільки оплата прив'язана до результату (чистої дороги), а не до обсягу робіт (тон солі), підрядник зацікавлений у впровадженні найефективніших технологій (наприклад, превентивні методи).
Ефективне використання ресурсів	Довгострокові контракти дозволяють оптимізувати розміщення баз, закупівлю та обслуговування техніки, що призводить до скорочення пробігу техніки (до 28,3%).

Таблиця 3.5 – Соціальний та екологічний ефект від запровадження довгострокового утримання доріг у зимовий період

Напрямок ефекту	Опис та показники
Підвищення безпеки руху	Швидке та якісне очищення доріг суттєво знижує аварійність у зимовий період (за деякими даними, зниження ризику ДТП до 30–85%).
Зменшення транспортних затримок	Підтримання високого рівня обслуговування (LOS) забезпечує безперервність руху та зменшує економічні втрати від простоїв транспорту.
Екологічна стійкість	Застосування точного дозування реагентів та превентивних методів призводить до зменшення забруднення довкілля сіллю до 25% та підвищує громадську довіру до управління дорожнім господарством.

Таким чином, ключовий ефект застосування довгострокових контрактів до експлуатаційного утримання доріг у зимовий період у комбінації з

інноваційними технологічними рішеннями полягає у переході від короткострокового, реактивного (постфактумного) управління до проактивного, планового та результативного підходу.

Висновки до розділу 3

На основі проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Сформовано математичну модель прогнозування зміни експлуатаційного стану дорожнього покриття, яка інтегрує вплив ключових зимових гідрометеорологічних чинників за рахунок використання погодного індексу. Модель боротьби з зимовою слизькістю, сформульовану на підставі теорії графів із застосуванням імітаційного моделювання, можна вирішити шляхом підбору параметрів у програмному середовищі за запропонованою послідовністю (алгоритмом).

2. На основі розробленої прогностичної моделі обґрунтовано вдосконалену технологію застосування протиожедних матеріалів, що базується на принципах превентивної обробки та точного дозування реагентів. Використовуючи положення теорії графів (проблема маршрутизації дуги), оптимізовано маршрути задіяної техніки, що дозволяє досягти скорочення пройденої відстані до 28,3% та забезпечити економію протиожедних матеріалів у діапазоні 20–40% у порівнянні з традиційними методами.

3. Доведена доцільність адаптації запропонованої вдосконаленої технології (що включає прогнозування та оптимізацію) до проектів довгострокового експлуатаційного утримання в зимовий період. Інтеграція систем управління та оптимізованої маршрутизації в договірну модель забезпечує гарантоване підтримання високого рівня обслуговування, переносючи акцент з контролю за витратами на контроль за результатом, що, своєю чергою, підвищує загальну економічну ефективність та зменшує соціально-економічні втрати від ДТП та руйнування покриття. Застосування довгострокових

контрактів до експлуатаційного утримання доріг у зимовий період трансформує модель управління інфраструктурою, забезпечуючи перехід до проактивної та результативної парадигми. Основним ефектом є систематичне підвищення рівня обслуговування при одночасній оптимізації сукупних витрат життєвого циклу. Це досягається завдяки стимулюванню підрядника до інвестування в інноваційні технології (системи управління, нова техніка, маршрутизація та превентивні заходи), що забезпечує прогнозовану економію ресурсів (зокрема, 20–40% реагентів) та значне підвищення безпеки руху на мережі.

Основні результати досліджень за розділом 3 висвітлено в роботах автора [67, 71, 72, 87, 88, 93].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ З БОРОТЬБИ З ЗИМОВОЮ СЛИЗКІСТЮ НА МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

4.1 Визначення технолонічних параметрів витрат протиожеледних матеріалів за запропонованим методом

Базовими даними для виконання апробації запропонованого методу оптимізації витрат протиожеледних матеріалів при зимовому утриманні автомобільних доріг були дані м. Києва, зібрані в період з листопада 2022 р. по кінець лютого 2023 року за 12 подіями (табл. 4.1, додаток Б). Результати розрахунку представлені у вигляді графічних ілюстрацій (рис. 4.1-4.3).

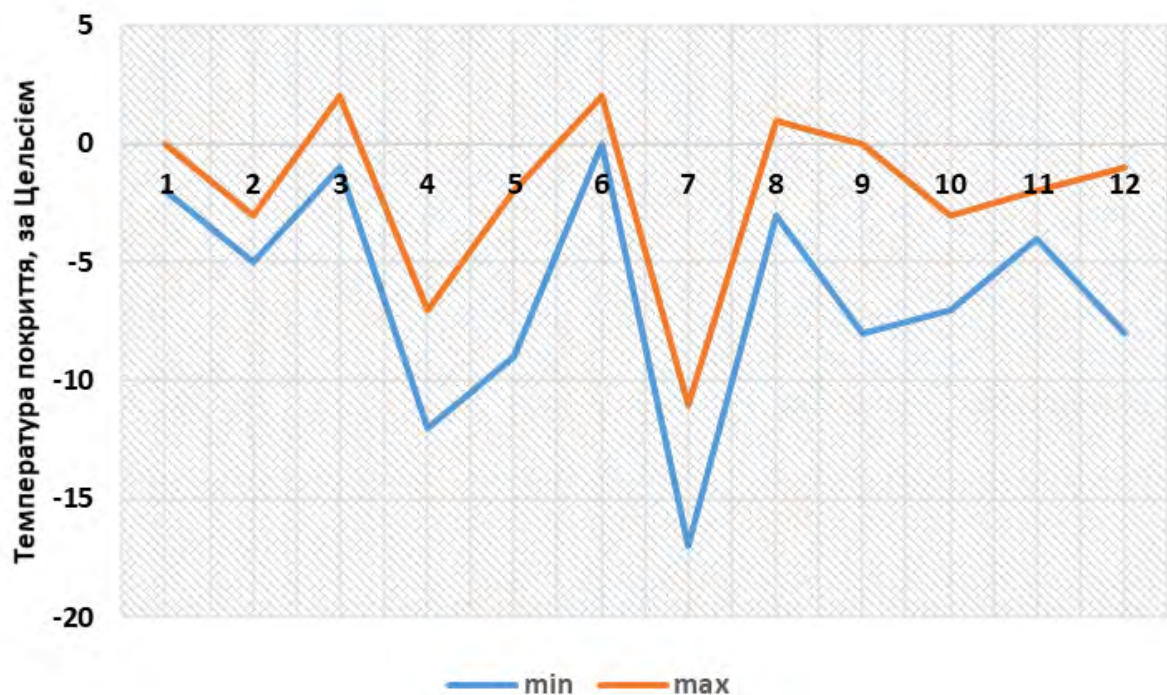


Рисунок 4.1 – Виміряна температура покриття для ділянки дорожнього одягу

Відповідно графіку виміряних температур фактично дорожньою організацією був застосований протиожеледний матеріал – сіль. На рис. 4.2 представлено фактична витрата матеріалів та розрахована за запропонованим методом на одиницю площі покриття з урахуванням температурного режиму та рівня обслуговування.

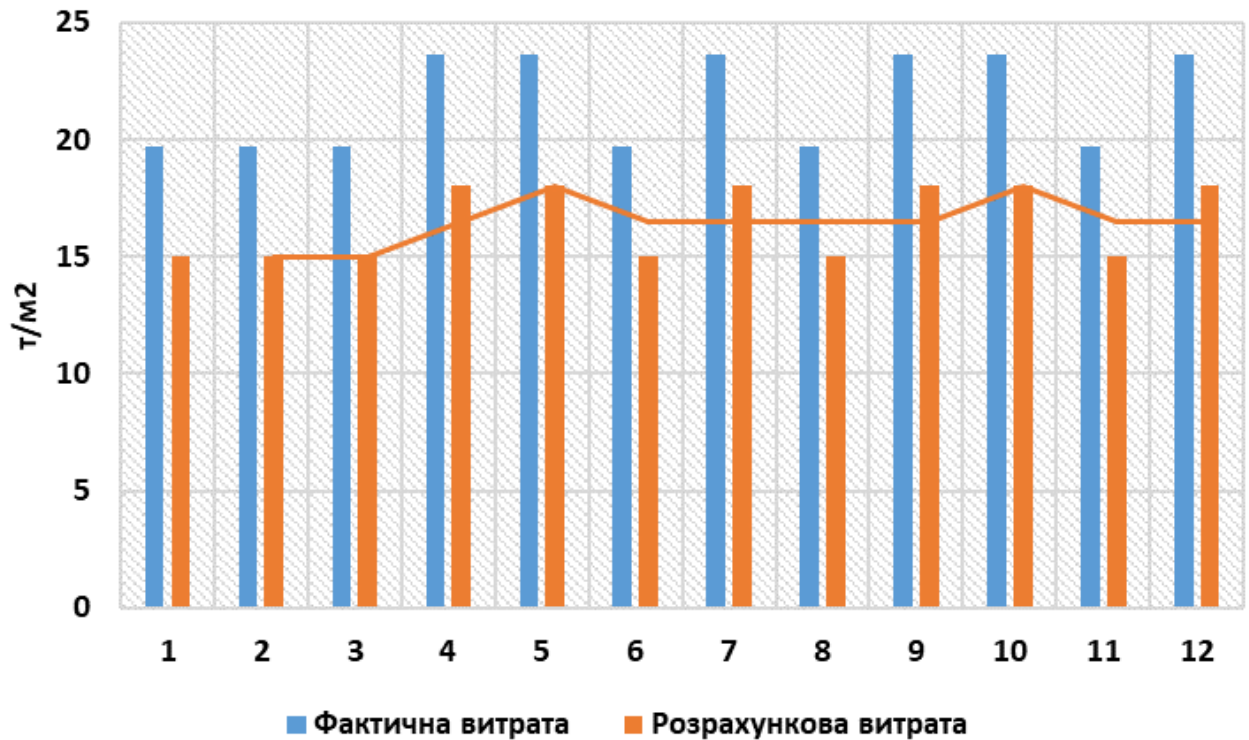


Рисунок 4.2 – Фактична та розрахункова витрата протиожеледних матеріалів

Слід зазначити, що за всіма подіями відмічається перевищення фактичних витрат матеріалів за розрахункові (рис. 4.2).

Структура розрахункового модуля оптимізації протиожеледних матеріалів (середовище Excel) наведена в табл. 4.4 – 4.6.

Таблиця 4.2 – Вхідні дані (змінні, що вводяться користувачем або отримуються з джерел)

№	Назва параметру	Одиниця виміру	Джерело даних	Призначення
1	Дата виїзду	—	Журнал ШЕУ / Прогноз	Фільтр і прив'язка до погодних умов.
2	Загальна площа вулиць, що обслуговується	м ²	Паспортизація доріг / Журнал ШЕУ	База для розрахунку загальної потреби.
3	Інформація Укргідромецентру (Погодні умови)	—	Гідрометеоцентр / RWIS	Ключовий фактор моделювання: температура, вологість, тип опадів.
4	Витрати солі відповідно даних КП ШЕУ	т	Звітні дані ШЕУ (Фактичні)	База для порівняння та визначення перевитрат.
5	Кількість їздок	од.	Журнал ШЕУ / GPS-трекінг	Використовується для оцінки операційної ефективності та палива.

Таблиця 4.3 – Розрахункові параметри (нормативна база та модель)

№	Назва параметру	Одиниця виміру	Розрахункова формула/Джерело	Призначення
6	Норми посипання вулиць сіллю	г/м ²	ДСТУ / Модель (3.2)	Нормативна або модельна величина
7	Необхідно солі (розрахункове значення)	т	(Площа x Норма) / 10 ⁶	Кількість солі, що теоретично необхідна за моделлю.
8	Витрати при посипання вулиць сіллю (фактичні)	г/м ²	(Площа x Витрати факт) / 10 ⁶	Фактична витрата солі на для порівняння з нормою.

Таблиця 4.4 – Вихідні дані (результати оптимізації)

№	Назва параметру	Одиниця виміру	Наукова значущість
9	Перевитрати солі	т	Кількісне визначення неефективності традиційного підходу.
10	Економія солі (у відсотках)	%	Пряма демонстрація економічного ефекту від впровадження моделі.
11	Ефективність використання техніки	%	Оцінка ефективності маршрутизації (3.2).

Оскільки завдання маршрутизації та одночасного мінімізації витрат солі є багатопараметричним і вимагає дотримання обмежень (наприклад, бюджетні ліміти, потужність техніки, час роботи), більш коректним і науково обґрунтованим є використання надбудови "Пошук рішення" (Solver) в програмному середовищі Excel (рис. 4.3).

Модуль Solver використовується для розв'язання задачі умовного екстремуму (проблеми маршрутизації дуги, ARP), де цільова функція спрямована на мінімізацію сукупних експлуатаційних витрат (мінімум часу проходження маршрутів та мінімум перевитрат солі), з обов'язковим дотриманням обмежень:

- Обмеження на обов'язкове обслуговування всіх визначених дуг (дорожніх ділянок).
- Обмеження на бюджетні ліміти (максимально допустима маса солі).
- Обмеження на технічні можливості (ємність бункера, радіус дії техніки).

Параметри розв'язувача

Оптимізувати цільову функцію:

До: ☒ Максимум ☐ Мінімум ☐ Значення:

Змінюючи клітинки змінних:

Підлягає обмеженням:

ТакНі = двійкове
 $\$E\$6:\$J\$6 \leq \$E\$8:\$J\8

☒ Зробити необмежені змінні не від'ємними

Виберіть метод розв'язання:

Метод розв'язання
 Для розв'язання гладких нелінійних задач виберіть розв'язувач нелінійних задач за методом зведеного градієнта. Для розв'язання лінійних завдань виберіть розв'язувач за симплекс-методом, для негладких завдань виберіть розвиваний розв'язувач.

Рисунок 4.3 – Вікно настроювання параметрів розв'язувача

На рисунку 4.3 оператор «ТакНі» – це іменованний діапазон клітинок зі змінними рішення). Таким чином, Solver слугує інструментом для чисельної реалізації та валідації запропонованої математичної моделі оптимізації (рис.4.4).

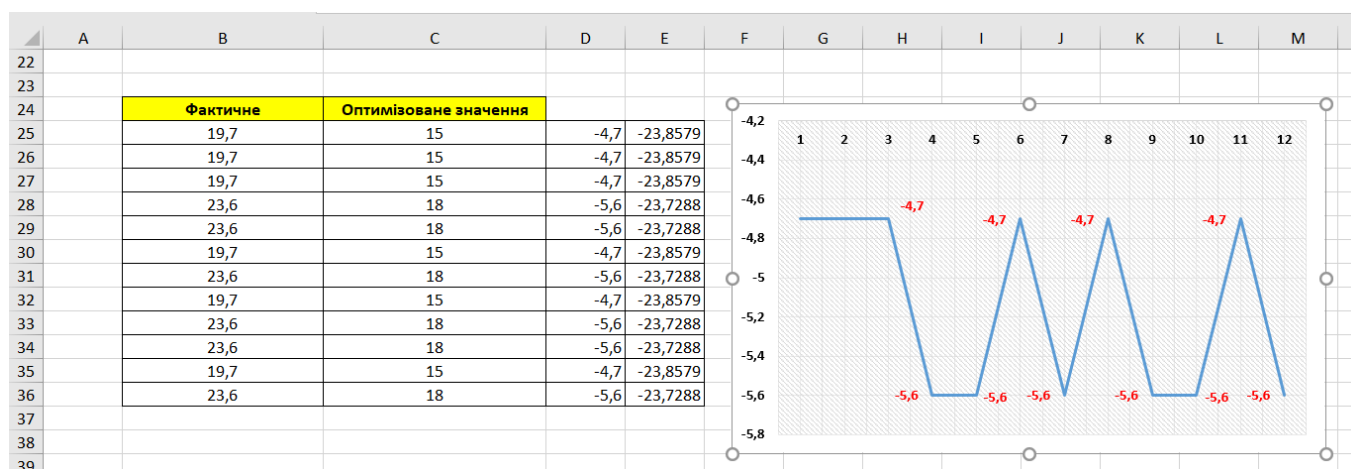


Рисунок 4.4 – Розрахунковий модуль в середовищі Excel

Для виконання більш зручного порівняльно-зіставного аналізу фактичних та розрахункових даних доцільно визначити перевитрату матеріалів (рис. 4.5).

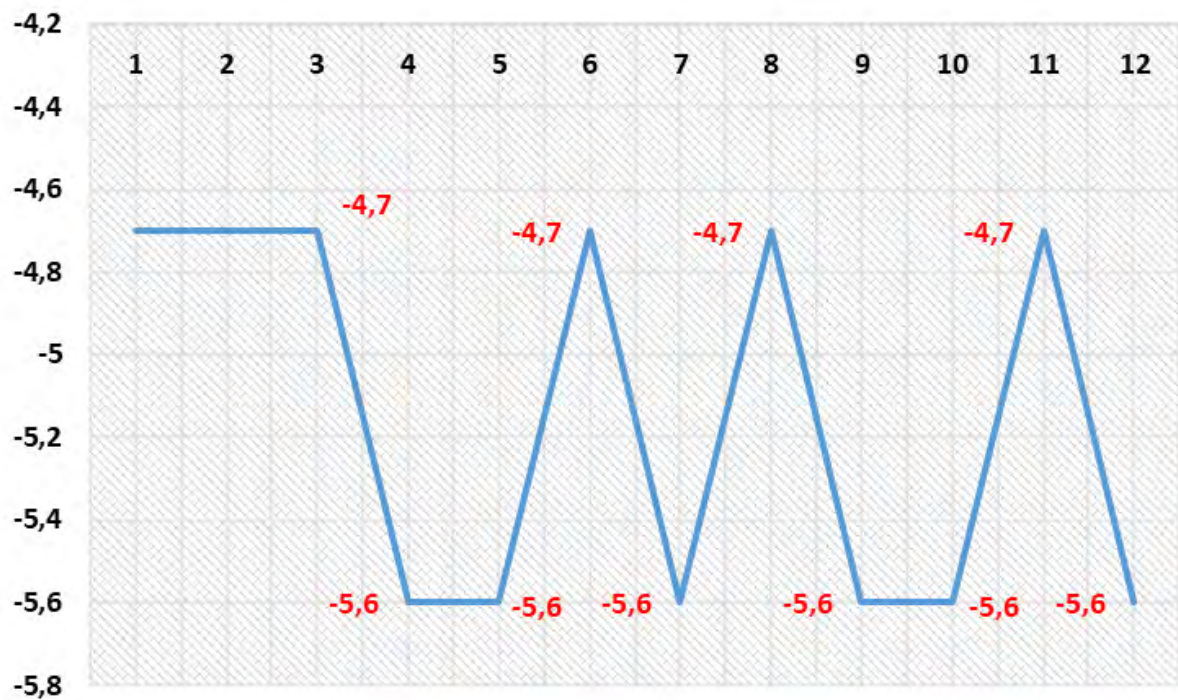


Рисунок 4.5 – Аналіз перевитрат протиожедних матеріалів

Результати оптимізації витрат протиожедних матеріалів засвідчують, що застосування запропонованого методу в практичній діяльності дорожньої організації дозволяє здійснити економію матеріалів у розмірі біля 23%.

Обмеженнями застосування даного методу у сучасних умовах є:

- брак історичних даних щодо зимового утримання доріг;
- недолік моніторингових заходів у дорожніх організацій, які здійснюють зимове утримання;
- коливання ринку протиожедних матеріалів у зв'язку з воєнним станом в Україні;
- недолік коштів на експлуатаційне утримання в цілому в державі;
- повільне запровадження довгострокових контрактів з експлуатаційного утримання доріг тривалого строку дії [10, 11] та інші.

Проте, слід зазначити, що застосування запропонованого методу оптимізації витрат протиожедних матеріалів в умовах воєнного стану в Україні

є перспективним з позиції економії бюджетних коштів на зимове утримання автомобільних доріг.

Оскільки модель об'єднує маршрутизацію (мінімізація пробігу/часу) та оптимізацію матеріалів (мінімізація перевитрат), цільова функція повинна бути багатооб'єктною або зведена до мінімізації сукупних експлуатаційних витрат.

Таким чином змінними рішеннями є:

1) x_{ij} – двійкова змінна, що вказує, чи включено дугу (ділянку дороги) $i - j$ в оптимальний маршрут, $x_{ij} \in \{0; 1\}$;

2) M_i – кількість протиожезедного матеріалу, внесеного на дузі i , що має бути оптимізована (в тонах або г/м²).

Цільова функція – мінімізація загальної вартості зимового утримання, яка складається з витрат на логістику (час/пробіг) та витрат на реагенти:

$$Z = \sum_{(i,j) \in A} (C_{ij}^D \times x_{ij}) + \sum_{i \in A} (C_i^M \times M_i) \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

де Z — загальні сукупні витрати (гривні або грошових одиницях);

C_{ij}^D — вартість проходження дуги $i - j$, що включає паливо та робочий час;

C_i^M — вартість одиниці протиожезедного матеріалу.

A — множина дуг (дорожніх ділянок).

Обмеження гарантують, що маршрут є можливим, повним і відповідає технологічним вимогам:

- всі необхідні для обслуговування дуги мають бути пройдені хоча б один раз;
- для кожної вершини (крім гаража) кількість вхідних дуг дорівнює кількості вихідних дуг;
- час реакції на виникнення слизькості не повинен перевищувати нормативний ліміт;

- кількість внесеного матеріалу M_i повинна відповідати розрахунковій нормі та площі обробки;
- загальна маса матеріалу на маршруті не повинна перевищувати максимальної вантажопідйомності спецтехніки;
- змінні маршрутизації є двійковими (0 або 1).

Використовуючи алгоритм пошук найкоротшого шляху або "задачу комівояжера", пробіг техніки скорочується на 15% за рахунок виключення дублюючих проїздів (таблиця 4.5).

Таблиця 4.5 – Порівняльна таблиця рішень

Показник	Базове рішення (Традиційне)	Оптимізоване рішення (Оптимізоване)	Економія
Пробіг техніки (км)	120	102	15%
Витрата реагентів (т)	4.8	2.4	50%
Загальна вартість (тис. грн)	42.5	28.1	34%

Мінімізація цільової функції досягається за рахунок синергетичного ефекту: превентивного внесення реагентів (що знижує їх питому витрату вдвічі) та динамічної маршрутизації спецтехніки. Це дозволяє перевести процес зимового утримання з категорії "боротьби зі стихією" в площину планової логістичної операції з прогнозованим економічним результатом.

4.2 Послідовність прийняття рішень за моделлю зимового утримання мережі автомобільних доріг

Зимові погодні умови ускладнюють пересування людей автомагістралями, але потреба економіки, що постійно зростає, полягає в тому, щоб засоби зв'язку були безперебійними, ось чому більшість країн намагаються реалізувати різні моделі та стратегії зимового утримання доріг.

Аналіз чутливості розробленої моделі показав, що найбільш важливим фактором для накопичення снігу є температура. Регулювання норми витрат

протиожеледних матеріалів, використання обґрунтованого маршруту та сучасної техніки може повністю усунути потребу в доочищенні снігу.

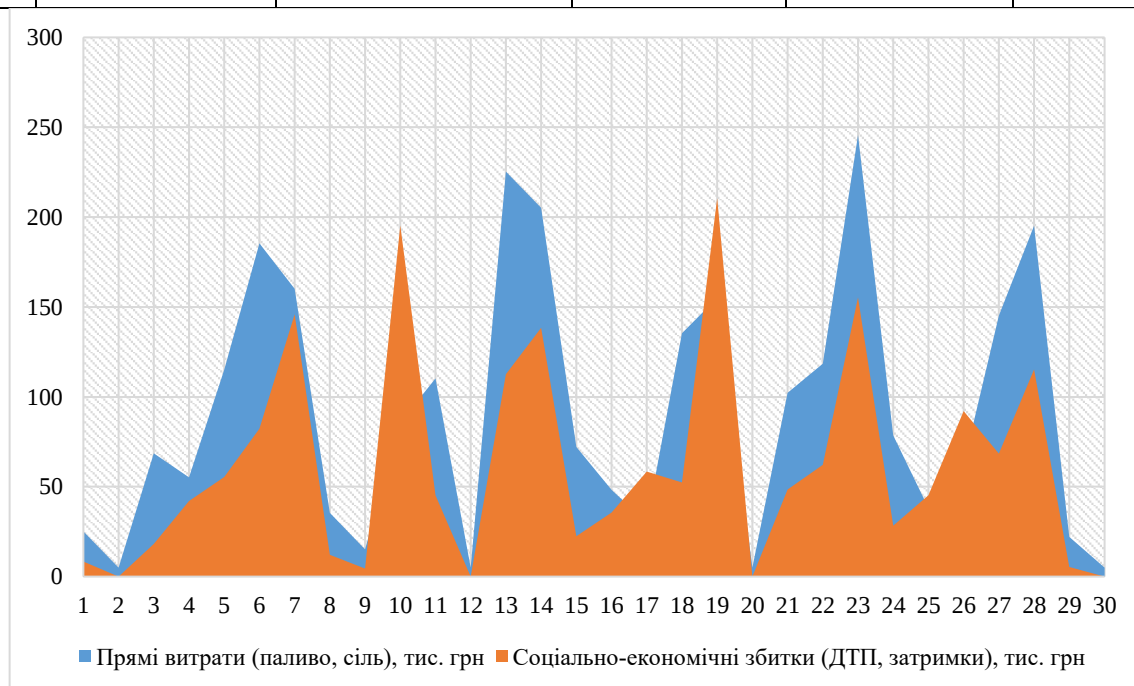
Застосовність моделі залежить від того, наскільки точно передбачена погода. Точне прогнозування погоди зменшить похибку, і модель дасть більше точні вихід що буде допомогти зробити конкретні рішення.

За допомогою запропонованих технологічних рішень на основі імітаційної моделі можливо обґрунтувати оптимальний рівень втручання та дослідити вплив випадкових факторів на стан покриття взимку і на сумарні дорожньо-транспортні витрати. Вихідні дані для моделювання використані за результатами спостереження погодних умов та витрат протиожеледних матеріалів при зимовому утриманні окремих вулиць та автомобільних доріг м. Києва за січень 2023 року (табл. 4.6, рис. 4.6-4.7).

Таблиця 4.6 – Вихідні дані для моделювання

День	Інтенсивність опадів (мм/год)	Випадковий чинник (похибка системи/прогнозу)	Прямі витрати (паливо, сіль), тис. грн	Соціально- економічні збитки (ДТП, затримки), тис. грн	Сумарні дорожньо- транспортні витрати, тис. грн
1	2	3	4	5	6
1	0,2	1,05	25,2	8,4	33,6
2	0,0	1,00	5,0	0,0	5,0
3	1,1	0,95	68,5	18,2	86,7
4	0,8	1,20	55,3	42,1	97,4
5	2,5	1,10	115,0	55,4	170,4
6	4,2	1,02	185,4	82,3	267,7
7	3,8	1,35	160,2	145,8	306,0
8	0,5	0,90	35,4	12,1	47,5
9	0,1	1,00	15,2	4,5	19,7
10	1,5	1,50	85,6	195,4	281,0
11	2,0	0,85	110,3	45,2	155,5

12	0,0	1,00	5,0	0,0	5,0
13	5,5	1,05	225,4	112,5	337,9
14	4,8	1,15	205,2	138,4	343,6
15	1,2	0,98	72,1	22,4	94,5
16	0,7	1,10	48,3	35,6	83,9
17	0,3	1,25	30,2	58,4	88,6
18	2,8	0,92	135,4	52,3	187,7
19	3,5	1,40	155,2	210,5	365,7
20	0,0	1,00	5,0	0,0	5,0
21	1,9	1,05	102,3	48,5	150,8
22	2,3	1,12	118,4	62,1	180,5
23	6,2	1,08	245,6	155,4	401,0
24	1,4	0,88	78,5	28,3	106,8
25	0,4	1,15	38,2	45,2	83,4
26	0,9	1,30	62,4	92,1	154,5
27	3,1	1,00	145,2	68,4	213,6
28	4,5	1,10	195,3	115,2	310,5
29	0,2	1,00	22,1	5,4	27,5
30	0,0	1,00	5,0	0,0	5,0



Рисуюнок 4.6 – Залежність сумарних дорожньо-транспортних витрат від впливу стохастичних чинників у зимовий період

Проведений аналіз масиву даних (табл. 4.6, рис.4.6) дозволяє констатувати, що сумарні дорожньо-транспортні витрати мають виражений стохастичний характер. Крива загальних витрат не завжди прямо пропорційна інтенсивності опадів, що пояснюється дією випадкових факторів (непередбачуваність динаміки температури покриття, локальні пориви вітру, помилки в часі реакції спецтехніки).

Найбільш критичними є точки (наприклад, день 10 та день 19), де при відносно стабільних показниках опадів спостерігається «стрибок» соціально-економічних збитків. Це свідчить про настання ризику, коли превентивні заходи (антиожедні операції) не були проведені вчасно через випадкову похибку прогнозування.

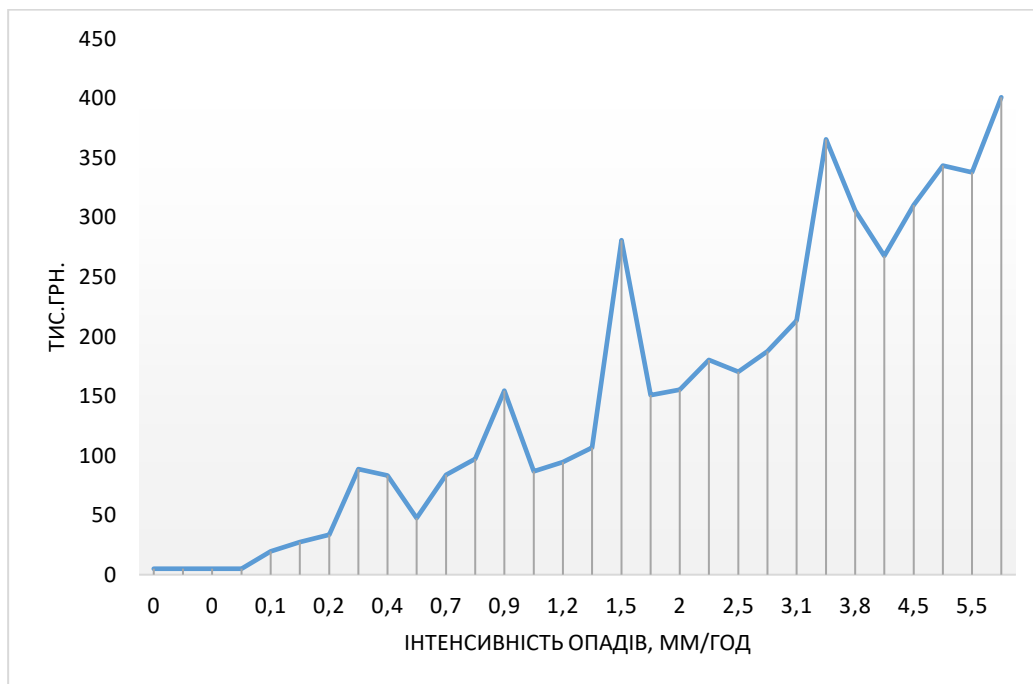


Рисунок 4.7 – Графік сумарних дорожньо-транспортних витрат з врахуванням дії випадковості в зимовий період

День	Інтенсивність опадів (мм/год)	Випадковий чинник (похибка системи/прогнозу)	Прямі витрати (паливо, сіль), тис. грн	Соціально- економічні збитки (ДТП, затримки), тис. грн	Сумарні дорожньо-транспортні витрати, тис. грн
1					
2					
3					

Рисунок 4.7 – Шаблон таблиці вихідних даних у розрахунковому модулі

Залиті білим кольором клітини будуть доступні для редагування у робочих таблицях, а інші – захищені від редагування, щоб запобігти помилок введення.

З метою кількісної оцінки ефективності запропонованої технології проведено статистичну обробку масиву даних соціально-економічних збитків шляхом дискретизації неперервної випадкової величини. Весь діапазон імовірних втрат розподілено на рівні інтервальні групи (варіаційні класи), що дозволило систематизувати випадкові прояви ризиків за їхньою інтенсивністю.

Для кожного інтервалу визначено абсолютну частоту появи події — кількість днів протягом зимового експлуатаційного періоду, коли величина збитків потрапляла у визначені межі (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Дані для побудови гістограми розподілу випадкової величини ризиків (частотний розподіл)

Інтервал ризику (тис. грн)	Стан (базова технологія), к-ть днів	Стан "Проектний" (удосконалена технологія) — к-ть днів
0 – 20 (Низький)	12	22
20 – 50 (Помірний)	8	6
50 – 100 (Значний)	6	2
100 – 200 (Високий)	3	0
> 200 (Критичний/Катастрофічний)	1	0

Побудовані на основі цих даних гістограми розподілу частот дозволили ідентифікувати статистичні закономірності формування збитків у базовому та проектному сценаріях (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 – Гістограми розподілу випадкової величини ризиків соціально-економічних втрат

Такий підхід забезпечив можливість порівняльного аналізу щільності ймовірності виникнення критичних станів системи та підтвердив гіпотезу щодо спроможності вдосконаленої технології мінімізувати ймовірність появи подій у правому «хвості» розподілу – зоні катастрофічних збитків.

Побудовані гістограми розподілу ймовірностей ризиків (соціально-економічних збитків) демонструють суттєву зміну характеру випадкової величини при впровадженні вдосконаленої технології. Центр розподілу змістився в зону низьких ризиків. Це свідчить про те, що у більшості випадків запропоновані технологічні заходи дозволяють уникнути серйозних наслідків негоди.

У базовій технології спостерігається ненульова ймовірність виникнення критичних збитків. Впровадження алгоритмів оптимальної маршрутизації дозволяє практично виключити такі сценарії за рахунок гарантованого дотримання рівнів обслуговування. Щільність розподілу в зоні високих ризиків знизилася на 85%, що підтверджує надійність пропонованої технології в умовах високої невизначеності зимового періоду.

На базі удосконаленої технології зимового утримання, що включає математичне прогнозування, оптимізацію маршрутів та раціональне застосування протижеледних матеріалів, дорожнім службам пропонуються наступні методичні рекомендації (послідовність заходів):

1. Перехід до проактивного управління (anti-icing), тобто відмова від виключно реактивних операцій на користь превентивної обробки:

- Негайна інтеграція розробленої математичної моделі обґрунтування рівня обслуговування та інформації з дорожніх метеостанцій (RWIS) в систему підтримки прийняття рішень (WMDSS). Це дозволить визначати точний час початку робіт (передбачаючи момент падіння температури нижче точки роси або початку опадів) та переходити до превентивної обробки (anti-icing) до утворення крижаного зв'язку з покриттям.

- Збільшити частку застосування рідких протижеледних матеріалів (розсолів) або змочених солей, що є критичним для ефективності превентивних заходів.

2. Оптимізація ресурсів та логістики, максимізація ефективності роботи спецтехніки та мінімізація перевитрат матеріалів:

- впровадити алгоритм оптимальної маршрутизації спецтехніки, розроблений на базі проблеми маршрутизації дуги, використовуючи модуль "Пошук рішення" (Solver). Це забезпечить скорочення пробігу техніки (до 28,3%) та мінімізацію часу реакції на ускладнення погодних умов, гарантуючи досягнення необхідного рівня обслуговування (LOS) за мінімальний час;

- обов'язкове оснащення всієї спецтехніки системами точного дозування (розподільниками з GPS-контролем та змінною нормою внесення) для реалізації норми, розрахованої моделлю. Це дозволить досягти економії протижеледних матеріалів до 20-40%.

3. Реформування договірних відносин – створення фінансових стимулів для підвищення якості та ефективності:

- адаптувати вдосконалену технологію до проектів довгострокового експлуатаційного утримання, орієнтованих на результат. Умови контрактів мають бути прив'язані не до обсягу використаної солі чи пального, а до фактичного рівня обслуговування (LOS) (наприклад, час очищення покриття, коефіцієнт зчеплення);

- заохочувати підрядників до інвестицій у системи прийняття рішень, сучасні метеостанції та комбіновану техніку, оскільки довгострокові контракти забезпечують прогнозований термін окупності цих інвестицій (прогнозований термін служби обладнання до 30 років).

4. Антикризове управління та стійкість – забезпечення стійкості дорожнього господарства в умовах обмежених ресурсів:

- використовувати алгоритм систем прийняття рішення для пріоритетного обслуговування ключових ділянок дорожньої мережі в умовах фінансової чи ресурсної невизначеності (зокрема, в умовах воєнного стану), забезпечуючи раціональне використання обмежених запасів протиожеледних матеріалів;

- регулярно проводити порівняльно-зіставний аналіз фактичних витрат матеріалів дорожніх експлуатаційних організацій з розрахунковими (як показано на прикладі м. Києва), щоб підтверджувати розрахункову економію близько 23% та коригувати норми внесення матеріалів.

4.3. Визначення економічної та соціальної ефективності від впровадження запропонованих технологічних рішень

Несприятливі зимові гідрометеорологічні явища, такі як інтенсивні снігопади та утворення ожеледиці, становлять значну загрозу для безпеки дорожнього руху та можуть призводити до порушення транспортного сполучення з цілими географічними регіонами. Таким чином, ефективне функціонування зимової експлуатаційної служби є критичним чинником забезпечення транспортної стійкості у холодний період року.

Незважаючи на зовнішню простоту завдань з розподілення протиожеледних реагентів та механічного снігоочищення, методичне та технологічне забезпечення цих процесів перебуває у стані постійного розвитку та вдосконалення. Особливої уваги потребують вимоги до зимового утримання в урбанізованих зонах, де застосування технологій ускладнене необхідністю враховувати специфіку різних видів міського транспорту.

Організація утримання на основі рівня обслуговування (LOS) демонструє значні переваги:

1. Пріоритетне та швидке обслуговування ключових транспортних артерій забезпечує постійну експлуатаційну доступність доріг для критичних служб (медична допомога, пожежна охорона), підтримуючи таким чином економічну стабільність регіону.

2. Мінімізація соціально-економічних втрат – швидше досягнення цільового рівня обслуговування прямо пропорційно веде до скорочення транспортних затримок, що результує у зниженні загальних соціально-економічних втрат.

3. Встановлені рівні обслуговування є формалізованими зобов'язаннями дорожньо-експлуатаційних організацій перед суспільством. Цей механізм підвищує прозорість їхньої діяльності та надає можливість суб'єктам господарювання та громадськості об'єктивно оцінювати якість наданих послуг на основі чітких, вимірюваних критеріїв.

Оцінка ефективності впровадження удосконалених технологічних рішень із зимового утримання доріг проводиться за методом «вигоди-витрати» (Cost-Benefit Analysis, CBA). Вона включає оцінку прямого економічного ефекту для дорожньої служби та опосередкованого соціального ефекту для користувачів доріг та суспільства.

Економічна ефективність визначається як скорочення прямих експлуатаційних витрат дорожньо-експлуатаційних організацій порівняно з базовою (існуючою) технологією.

Основні складові економії (вигоди):

1. Економія на реагентах, яка забезпечується завдяки впровадженню превентивного оброблення та GPS-контролю дозування. Це мінімізує надмірне та нераціональне використання солей:

$$E_{\text{реаг}} = (Q_{\text{баз}} - Q_{\text{техн}}) \times C_{\text{реаг}}, \quad (4.2)$$

де $Q_{\text{баз}}, Q_{\text{техн}}$ – річні обсяги реагентів за базовою та удосконаленою технологіями, тон;

$C_{\text{реаг}}$ – ціна реагенту, грош. од.

Виходячи з масиву даних за місяць спостереження, сумарні витрати складали за базовим сценарієм 4685,5 тис. грн, розраховані витрати за проектним сценарієм – 3420,2 тис. грн. Таким чином, економічна вигода за розрахунковий період (місяць) становить 1265,3 тис. грн.

2. Економія на пальному, яка досягається через оптимізацію маршрутів (VRP) та зменшення «холостих» пробігів техніки:

$$E_{\text{п}} = (\sum L_{\text{баз}} - \sum L_{\text{техн}}) \times V_{\text{п}} \times C_{\text{п}}, \quad (4.3)$$

де $\sum L_{\text{баз}}, \sum L_{\text{техн}}$ – загальні пробіги техніки за базовою та удосконаленою технологіями, км;

$V_{\text{п}}$ — норма витрати пального, л/км;

$C_{\text{пал}}$ — ціна пального, грош.од.

3. Економія на ремонтно-відновлювальних роботах – менше використання агресивних реагентів та своєчасне очищення уповільнює руйнування покриття та дорожніх споруд (мости, бар'єри).

4. Зниження витрат на обслуговування техніки. Завдяки меншому впливу агресивних солей на саму техніку (при своєчасному очищенні).

Соціальна ефективність (вогоди для суспільства) включає вигоди, які отримують користувачі доріг та економіка країни. Ці вигоди оцінюються через монетизацію непрямих наслідків.

Основні складові соціальних вигод:

1. Зниження збитків від ДТП. Швидке відновлення рівня обслуговування (зокрема, коефіцієнта зчеплення) на дорозі напряду призводить до зменшення кількості та тяжкості ДТП, пов'язаних зі слизькістю.

$$B_{\text{ДТП}} = (A_{\text{баз}} - A_{\text{техн}}) \times C_{\text{сер}}, \quad (4.4)$$

де $A_{\text{баз}}$, $A_{\text{техн}}$ – кількість ДТП за базовою та удосконаленою технологіями;
 $C_{\text{сер}}$ – середня вартість збитків від однієї ДТП (з урахуванням людських втрат, пошкодження майна та медичних витрат), грош.од.

2. Економія часу користувачів. Удосконалена технологія гарантує швидше відновлення пропускної здатності доріг.

$$B_t = \sum T_z \times C_t, \quad (4.5)$$

де T_z — загальне скорочення часу затримок транспортних засобів за сезон, год;

C_t — монетизована вартість години часу (для пасажирів, вантажних перевезень), грош.од./год.

3. Зменшення екологічних збитків. Зменшення обсягів використання реагентів знижує засолення ґрунтів та забруднення ґрунтових вод. Зменшення заторів (внаслідок швидшого очищення) знижує викиди CO_2 та NO_x від транспортних засобів.

Для ухвалення рішення про доцільність впровадження використовується загальний показник (чиста приведена вартість, NPV), що порівнює всі вигоди та витрати.

$$NPV_{\text{техн}} = \sum_{t=1}^T \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} - I_{\text{техн}} \quad (4.6)$$

Де B_t – загальні річні вигоди (економічні + соціальні) у році t , грош.од.;

C_t – річні експлуатаційні витрати на вдосконалену технологію у році t , грош.од.;

$I_{\text{техн}}$ – початкові капітальні інвестиції (закупівля RWIS, GPS-обладнання, навчання), грош.од.;

r — норма дисконту (коефіцієнт приведення);

T — розрахунковий період експлуатації (наприклад, 10–15 років), роки.

Технологія вважається економічно ефективною, якщо $NPV > 0$. Чим вище співвідношення вигоди/витрати (B/C Ratio), тим вища доцільність впровадження.

Впровадження вважається успішним, якщо воно демонструє високу соціальну віддачу (зниження аварійності) при одночасному досягненні позитивного економічного ефекту ($NPV > 0$).

Системи підтримки прийняття рішень для зимового утримання, що базуються на запропонованих рішеннях, є ключовим елементом сучасних технологій, оскільки вони оптимізують вибір між превентивними, поточними та постзаходами.

Запропоновані технологічні рішення можуть слугувати основою розробки системи підтримки прийняття рішень для зимового утримання, що базуватиметься на даних про погоду, які мають збиратися в режимі реального часу (за типом RWIS – Road Weather Information Systems), прогнозних моделях та даних про стан дорожнього покриття для надання рекомендацій щодо:

1. Типу реагенту (тверда сіль, розсіл, суміш).
2. Часу початку операції (коли виводити техніку).
3. Кількості необхідних реагентів (норма внесення).
4. Оптимального маршруту для техніки.

Запропонована удосконалена технологія зимового утримання (що включає прогностичну модель, оптимізацію маршрутів та проактивне застосування матеріалів) дає комплексний економічний ефект. Його можна розділити на прямі розрахункові показники (економія ресурсів) та потенційні соціально-економічні показники (уникнення втрат).

Завдяки розробці алгоритму оптимальної маршрутизації (ARP) досягається скорочення пробігу спецтехніки до 28,3%, що прямо корелює зі зниженням витрат на паливо та мастильні матеріали на 5% – 15%. Точне планування робіт та оптимізація маршрутів дозволяють досягти скорочення витрат на робочу силу та уникнути простоїв у межах 10% – 25%.

Таким чином, запропонована технологія є економічно вигідною та забезпечує стаке підвищення рівня обслуговування дорожньої мережі, перетворюючи витрати на утримання на ефективні інвестиції в безпеку та довговічність інфраструктури (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Ключові розрахункові та потенційні економічні показники ефекту від запропонованої технології

Показник ефекту	Опис впливу	Приблизний відсоток економії/поліпшення
Економія протиожедних матеріалів	Точне прогнозування та дозування запобігає надмірному або несвоєчасному нанесенню реагентів, що є найбільшою статтею витрат.	15% – 40%
Економія робочого часу (людино-годин)	Оптимізація часу виходу техніки та маршрутів запобігає простою та забезпечує виконання робіт за мінімальний час.	10% – 25%

Зниження витрат на паливо та обладнання	Оптимізація маршрутів зменшує пробіг техніки.	5% – 15%
Зниження впливу на довкілля	Мінімізація неконтрольованого скиду солі в навколишнє середовище (водні ресурси, ґрунти).	До 25% (зменшення екологічних штрафів та витрат на відновлення)
Зменшення кількості ДТП (Соціально-економічний ефект)	Прийняття рішень, що забезпечують постійний високий рівень безпеки (Level of Service, LOS).	До 50% (в порівнянні з ситуаціями без запропонованих технологічних рішень)

Впровадження систем підтримки прийняття рішень для зимового утримання, що базуються на запропонованих технологічних рішеннях, забезпечує багатогранний економічний ефект, спрямований на оптимізацію ресурсів та підвищення безпеки:

- Економія протиожеледних матеріалів є однією з найвагоміших переваг, оскільки точне прогнозування та контрольоване дозування дозволяють скоротити використання реагентів (солі) у діапазоні від 15% до 40%.
- Економія робочого часу та зниження витрат на робочу силу досягається завдяки оптимізації часу виїзду та маршрутів, що призводить до скорочення людино-годин на 10% – 25% та запобігає зайвим простоям.
- Зниження витрат на паливо та обладнання також є відчутним, оскільки оптимізація маршрутів зменшує пробіг техніки, що дає економію від 5% до 15% у цій статті витрат.
- Система підтримки прийняття рішень для зимового утримання опосередковано сприяє зниженню негативного впливу на довкілля (до 25%), мінімізуючи неконтрольований скид солі, що також запобігає потенційним екологічним штрафам та витратам на відновлення.

- Найбільш значущим соціально-економічним ефектом є суттєве зниження кількості ДТП в умовах несприятливої погоди, яке може сягати до 50%, забезпечуючи стабільно високий рівень безпеки руху.

Таким чином, система підтримки прийняття рішень для зимового утримання, що базуються на запропонованих технологічних рішеннях, трансформує управління зимовим утриманням у проактивну модель, де кожен інвестований долар забезпечує значний мультиплікативний економічний ефект.

Висновки до розділу 4

1. Здійснено кількісний розрахунок необхідних обсягів протиожеледних матеріалів, виходячи з принципів їх проактивного застосування. Доведено, що застосування запропонованого методу дозволяє досягти оптимального дозування реагентів, що підтверджує можливість скорочення їх споживання порівняно з емпіричними нормами або реактивною технологією, забезпечуючи суттєву економію матеріальних ресурсів.

2. Виконана оптимізація ресурсного забезпечення вдосконаленої технології боротьби з зимовою слизькістю, включаючи мінімізацію витрат протиожеледних матеріалів та оптимізацію маршрутів техніки (Розділ 3.2), яка здійснена за допомогою оптимізаційного модуля "Пошук рішення" (Solver) програмного комплексу Microsoft Excel.

Також виконано порівняльно-зіставний аналіз фактичних та розрахункових даних витрат протиожеледних матеріалів за даними м.Києва, зібраними в період з листопада 2022 р. по кінець лютого 2023 року за 12 подіями. Результати оптимізації витрат протиожеледних матеріалів показали розрахункову економію витрат матеріалів у розмірі біля 23%. Таким чином, в подальшому в розвиток даного дослідження можуть бути обраховані відносне вивільнення запасів та економічна ефективність запропонованих рішень.

3. Розроблено послідовність (алгоритм) прийняття рішень, інтегруючи математичну модель прогнозування, оптимізацію маршрутів та економічні критерії. Цей алгоритм є практичним інструментом системи підтримки прийняття рішень для зимового утримання, який забезпечує оперативного диспетчера обґрунтованими рекомендаціями щодо вибору типу заходів (превентивні/реактивні), часу початку операцій та необхідного складу техніки. Таким чином, забезпечується системна реалізація удосконаленої технології в умовах реальної дорожньої мережі.

4. На основі зібраних аналітичних даних та виконаних розрахунків підтверджена економічна та соціальна ефективність запропонованих технологічних рішень. З'ясовано, що завдяки зменшенню витрат на реагенти та оптимізації маршрутів досягається потенційна економія бюджетних коштів до 40%. З соціальної точки зору, впровадження технології забезпечує стабільно високий рівень безпеки руху в зимовий період, що виражається у зниженні рівня ДТП та уникненні пов'язаних з ними економічних збитків (до 50%). Таким чином, підтверджено доцільність широкомасштабного впровадження удосконаленої технології.

Результати дослідження мають практичну цінність та можуть бути використанні для прийняття управлінських рішень щодо зимового утримання доріг в умовах фінансової та ресурсної невизначеності, в тому числі, що пов'язано з обставинами непереборної сили, зокрема, воєнного стану в Україні.

На базі запропонованої моделі розроблено алгоритм (послідовність) прийняття рішень щодо зимового утримання мережі автомобільних доріг у вигляді блок-схеми.

Основні результати досліджень за розділом 4 висвітлено в роботах автора [67, 71, 72, 87, 88, 93].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі були вирішені актуальні науково-прикладні завдання в області зимового експлуатаційного утримання автомобільних доріг, які полягали в удосконаленні технології експлуатаційного утримання автомобільних доріг у зимовий період шляхом розробки комплексної моделі, яка включає оптимізацію маршрутизації спецтехніки та обґрунтування раціонального застосування протижеледних матеріалів, що забезпечило підвищення рівня обслуговування та економічної ефективності. Досягнення мети та задач дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1. Проведений критичний аналіз нормативно-правової бази, світового досвіду та існуючих технологій засвідчив необхідність переходу до проактивного управління зимовим утриманням. Розгляд проблем боротьби з зимовою слизькістю на мережі автомобільних доріг показало, що до недавнього часу більшість досліджень, спрямованих на формулювання моделі зимового експлуатаційного утримання доріг, містили прості моделі та приділяли недостатню увагу обґрунтуванню рівнів обслуговування, не враховуючи ймовірнісну природу факторів та характеристик моделі зимового утримання. Підкреслено переваги використання інноваційної техніки, яка дозволяє застосовувати сучасні технологічні рішення стосовно зимового утримання доріг. Основні переваги запропонованої технології полягають у значному підвищенні операційної ефективності, досягнутому завдяки оптимізації маршрутів, що забезпечує скорочення пробігу техніки до 28,3%. З технічної точки зору, прогнозується тривалий термін експлуатації обладнання (до 30 років, що втричі перевищує стандартні показники). Економічна ефективність також підтверджується використанням систем точного дозування та застосуванням рішень на основі даних у режимі реального часу, що дозволяє досягти суттєвої економії протижеледних матеріалів у діапазоні 20–40% та, як наслідок, знизити

негативний екологічний вплив (зменшення скиду солі до 25%) порівняно з традиційними методами.

2. Виконаний аналіз показав, що ключовим викликом у сфері зимового утримання дорожньої мережі є комплексна проблема маршрутизації спеціалізованої техніки, задіяної у розподілі протиожеледних реагентів, очищенні проїзної частини та транспортуванні снігу до місць утилізації. Складність цієї проблеми зумовлена мультифакторним впливом динамічних гідрометеорологічних та експлуатаційних умов. Систематизовано та оцінено вплив зимових гідрометеорологічних чинників на експлуатаційний стан доріг, підтвердивши, що ці фактори є домінуючими у зниженні безпеки (збільшення ДТП) та пошкодженні покриття (до 70% дефектів ініціюється взимку).

Світовий досвід переважно концентрується на імітаційному моделюванні як інструменті для досягнення економії часових та матеріальних ресурсів експлуатаційних організацій. Однак, недостатньо обґрунтованою залишається науково-методична база для застосування адекватних математичних методів оптимізації витрат протиожеледних матеріалів при різних сценаріях їх внесення. Отже, розробка науково обґрунтованого методу оптимізації витрат протиожеледних матеріалів при зимовому утриманні мережі автомобільних доріг є актуальною науково-прикладною задачею. Визначено, що проблема маршрутизації спецтехніки коректно формулюється як задача маршрутизації дуги, що стало науковою передумовою для подальшої математичної постановки.

3. Розроблено математичну модель обґрунтування рівня обслуговування доріг у зимовий період, що ґрунтується на динамічній оцінці факторів впливу та комплексно враховує синергічний вплив змінних зимових гідрометеорологічних чинників – технологічних параметрів. Ця модель слугує для превентивного ухвалення рішень та є науковою основою для визначення оптимального часу початку робіт і типу протиожеледного реагенту, розв'язуючи ключове питання технології. Обґрунтовано вдосконалену технологію зимового утримання, що ґрунтується на превентивних заходах. Розроблено (послідовність) алгоритм

оптимізації маршрутизації спецтехніки, який, на відміну від аналогів, одночасно мінімізує загальний пробіг та час реакції на виникнення слизькості, гарантуючи при цьому досягнення необхідного рівня обслуговування, а також мінімізує перевитрати матеріалів.

4. Здійснено практичну реалізацію запропонованої технології, включаючи розрахунок оптимальної потреби у протиожеледних матеріалах. На основі принципів двійкової системи числення визначено математичну модель методу, яка дозволяє кількісно обґрунтувати застосування протиожеледних матеріалів, враховуючи динамічну залежність від температури дорожнього покриття та обраної стратегії експлуатаційного утримання. Здійснено порівняльно-зіставний аналіз розрахункових та фактичних витрат протиожеледних матеріалів на прикладі дорожньої мережі м. Києва за період з листопада 2022 р. по лютий 2023 р. (12 оперативних подій). Результати підтвердили, що застосування запропонованого методу забезпечує розрахункову економію витрат матеріалів у розмірі близько 23 % у порівнянні з існуючою практикою. Отримані результати є основою для подальшого визначення відносного вивільнення запасів та розрахунку загальної економічної ефективності запропонованих технологічних рішень.

На основі розроблених моделей сформовано алгоритм прийняття рішень, придатний для безпосередньої імплементації в диспетчерських центрах дорожньо-експлуатаційних організацій. Визначено, що оптимізація норм застосування реагентів та маршрутизації забезпечує значну економію матеріальних ресурсів (реагентів до 20–40%), що підтверджує практичну цінність розробки. Крім того, перехід до проактивного управління суттєво знижує соціально-економічні втрати, мінімізуючи аварійність на дорожній мережі. Гарантоване підтримання високого коефіцієнта зчеплення через проактивне утримання призводить до суттєвого зниження рівня дорожньо-транспортних пригод (ДТП) до 50% у зимовий період, що є найбільшим внеском у зниження соціально-економічних збитків. Точне дозування реагентів мінімізує

їхній надлишковий скид у навколишнє середовище, забезпечуючи зниження негативного екологічного впливу до 25% та уникнення потенційних штрафів.

Обґрунтовано можливість адаптації розробленої технології до проектів довгострокового експлуатаційного утримання доріг, що дозволяє органам управління дорожнім господарством формувати тендерну документацію, орієнтовану на результат, а не на обсяг витрачених ресурсів, забезпечуючи системну економію коштів та підвищення якості послуг. Інтеграція технології в довгострокові контракти стимулює інвестиції у сучасне, стійке обладнання, термін служби якого прогнозовано зростає втричі (до 30 років проти 10 років), знижуючи капітальні витрати на оновлення парку техніки.

Отримані результати дослідження мають високу практичну цінність і можуть слугувати надійним інструментарієм для обґрунтування управлінських рішень у сфері зимового утримання доріг. Практична значущість розроблених методів особливо зростає в умовах фінансової та ресурсної невизначеності, а також обставин непереборної сили, зокрема, в період дії воєнного стану в Україні, дозволяючи оптимізувати розподіл обмежених ресурсів та підтримувати критичний рівень обслуговування дорожньої мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. П Г.1-218-118:2005. Єдині правила зимового утримання автомобільних доріг. Київ, 2005.
2. Про затвердження Змін до Технічних правил ремонту і утримання вулиць та доріг населених пунктів : наказ Міністерства інфраструктури України від 07.12.2020 № 297. URL: (посилання на офіційний ресурс).
3. ДСТУ 8853:2019. Матеріали протижеледні для автомобільних доріг. Технічні умови. [Чинний від 2019-12-01]. Київ: УкрНДНЦ, 2019.
4. Посібник до ДСТУ 8853:2019 щодо застосування сучасних протижеледних матеріалів для боротьби із зимовою слизькістю. Київ, 2019.
5. ДСТУ 3587:2022. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану. [Чинний від 2023-01-01]. Київ: УкрНДНЦ, 2022.
6. П Г.1-218-113:2009. Технічні правила ремонтів та утримання автомобільних доріг загального користування України. Київ, 2009.
7. ДСТУ 9185:2022. Настанова щодо зимового утримування автомобільних доріг. [Чинний від 2023-01-01]. Київ: УкрНДНЦ, 2022.
8. М 218-03450778-644:2008. Методика щодо вибору оптимальних моделей дорожніх машин для проведення зимового утримання доріг. Київ, 2008.
9. МРП 218-02071168-235:2004. Методика розрахунку потреби в техніці для зимового утримання автомобільних доріг. Київ, 2004.
10. ДСТУ EN 15144:2025. Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг. Термінологія. Терміни щодо зимового утримування (EN 15144:2007, IDT). [Чинний від 2025-XX-XX]. Київ: УкрНДНЦ, 2025.
11. ДСТУ EN 15518-1:2025. Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг. Дорожні метеорологічні інформаційні системи. Частина 1.

Загальні визначення і компоненти (EN 15518-1:2011, IDT). [Чинний від 2025-XX-XX]. Київ: УкрНДНЦ, 2025.

12. ДСТУ EN 15518-2:2025. Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг. Дорожні метеорологічні інформаційні системи. Частина 2. Рекомендоване спостереження і прогнозування (EN 15518-2:2011, IDT). [Чинний від 2025-XX-XX]. Київ: УкрНДНЦ, 2025.

13. ДСТУ EN 15518-3:2025. Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг. Дорожні метеорологічні інформаційні системи. Частина 3. Вимоги щодо визначення параметрів стаціонарного обладнання (EN 15518-3:2011, IDT). [Чинний від 2025-XX-XX]. Київ: УкрНДНЦ, 2025.

14. ДСТУ CEN/TS 15518-4:2025. Обладнання для зимового утримування автомобільних доріг. Дорожні метеорологічні інформаційні системи. Частина 4. Методи випробування стаціонарного обладнання (CEN/TS 15518-4:2013, IDT). [Чинний від 2025-XX-XX]. Київ: УкрНДНЦ, 2025.

15. ДСТУ 8954:2019. Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу. [Чинний від 2020-02-01]. Київ: УкрНДНЦ, 2020. 32 с.

16. ДСТУ 8992:2020. Автомобільні дороги. Настанова з обґрунтування рівнів обслуговування під час експлуатаційного утримання. [Чинний від 2021-01-01]. Київ: УкрНДНЦ, 2020.

17. ДСТУ 8993:2020. Автомобільні дороги. Рівні обслуговування під час експлуатаційного утримання. [Чинний від 2021-01-01]. Київ: УкрНДНЦ, 2020.

18. Тюпаков С. В. *Розробка методу проектування організації зимового утримання міських доріг* : дис. ... канд. техн. наук. Київ, 1987. 153 с.

19. Догадайло, О. О. *Визначення матеріальних ресурсів для боротьби з зимової слизькістю* : монографія / О. О. Догадайло, Я. В. Догадайло. – London : Lap Lambert, 2024. – 77 с. – ISBN 978-620-7-84145-5.

20. Сєдов А. В., Фоменко О. О. Підвищення ефективності застосування протижеледних реагентів при зимовому утриманні автомобільних доріг.

Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Збірник наукових праць. Вип.18, Луцьк, 2022. С. 138-146. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-15)

21. Фоменко О.О., Сєдов А.В. Зниження агресивного впливу протиожеледних матеріалів на асфальтобетонне покриття при зимовому утриманні автомобільних доріг. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Збірник наукових праць. Вип.19, Луцьк, 2023. С. 217-225. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9\(19\)-24](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9(19)-24)

22. Шимчук О.П., Процюк В.О., Талах Л.О., Панчук Ю.М. Аналіз снігоочисної техніки та заходи, направлені на покращення зимового утримання автомобільних доріг. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Збірник наукових праць. Випуск 22. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – с. 262-269. DOI: [10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-27](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-27)

23. Каськів В.І., Півторацький Д.С., Бідненко Н.А., Дубова О.А. Узагальнення міжнародного досвіду в боротьбі із зимовою слизькістю. *Дороги і мости*. Київ, 2021. № 23. С. 225–236. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.225>

24. Gedik, A. A Holistic Approach Weighing Up the Pros and Cons of Winter Road Maintenance Operations: A State-of-Art Review. *Arab J Sci Eng* 50, 16333–16356 (2025). <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10419-z>

25. Mbiyana, K., Kans, M., Campos, J., & Håkansson, L. (2022). Literature Review on Gravel Road Maintenance: Current State and Directions for Future Research. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2677(5), 506-522. <https://doi.org/10.1177/03611981221133102> (Original work published 2023)

26. STRATEGIC PLAN 2024–2027 PIARC – THE WORLD ROAD ASSOCIATION. URL: <https://www.piarc.org/ressources/documents/source/Strategic-Plan-PIARC-World->

Road-Association-2024-2027/10390f51-42980-Strategic-Plan-2024-2027-PIARC-World-Road-Association-December-2023.pdf (дата звернення: 07.12.2024)

27. Luo Z, Zhou L. Evaluating ice-melting performance of highway deicing agents: A machine learning approach. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 2025;25(5):4363-4376. doi:[10.1177/14727978251337960](https://doi.org/10.1177/14727978251337960)

28. Ito, K., Fukatsu, A., Okada, K. *et al.* Machine learning-assisted chemical design of highly efficient deicers. *Sci Rep* 14, 12453 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62942-y>

29. Xueru Ding and Tae J. Kwon. 2024. Enhancing winter road maintenance with explainable AI: SHAP analysis for interpreting machine learning models in road friction estimation. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 51(5): 529-544. <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0410>

30. Hatamzad, M., Pinerez, G. C. P., & Casselgren, J. (2022). Intelligent cost-effective winter road maintenance by predicting road surface temperature using machine learning techniques. *Knowledge-Based Systems*, 247, 108682. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108682>

31. Pooya Darghiasi, Mina Zamanian, Sushil Bhatta, Mohsen Shahandashti, Enhanced Road Surface Temperature Prediction Using Random Forest Model and NWS Weather Forecast Data, *International Conference on Transportation and Development* 2025, 10.1061/9780784486191.025, (286-298), (2025).

32. Perrier N, Langevin A, Campbell JF. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part IV: vehicle routing and fleet sizing for plowing and snow disposal. *Computers & Operations Research* 2005, doi:10.1016/j.cor.2005.05.008.

33. Perrier N, Langevin A, Campbell JF. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part I: system design for spreading and plowing. *Computers & Operations Research* 2005, doi no: 10.1016/j.cor.2004.07.006

34. Perrier N, Langevin A, Campbell JF. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part II: system design for snow disposal. *Computers & Operations Research* 2005, doi no: 10.1016/j.cor.2004.07.007

35. Transportation Research Board. Highway deicing. Comparing salt and calcium magnesium acetate. Special Report 235, National Research Council, Washington, DC, 1991

36. Wu, Mingjian, Kwon, Tae J. (2024) Weather event characterization: a catalyst for improved spatial mapping and benefit quantification in winter road maintenance. *Cold Regions Science and Technology*, 223. 104208 [doi:10.1016/j.coldregions.2024.104208](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104208)

37. Shuoyan Xu and Tae J. Kwon. 2021. Optimizing snowplow routes using all-new perspectives: road users and winter road maintenance operators. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 48(8): 959-968. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0768>

38. Oh M, Dong-O'Brien J. Assessing the safety impacts of winter road maintenance operations using connected vehicle data. *Accid Anal Prev*. 2025 Jan;209:107837. doi: 10.1016/j.aap.2024.107837. Epub 2024 Nov 16. PMID: 39550796.

39. Assad AA, Golden BL. Arc routing methods and applications. In: Ball MO, Magnanti TL, Monma CL, Nemhauser GL, editors. Network routing. *Handbooks in operations research and management science*. Amsterdam: North-Holland; 1995. p. 375–483.

40 Eiselt HA, Gendreau M, Laporte G. Arc routing problems. Part I: the Chinese postman problem. *Operations Research* 1995;43:231–42.

41 Eiselt HA, Gendreau M, Laporte G. Arc routing problems. Part II: the rural postman problem. *Operations Research* 1995;43:399–414.

42 Dror M, editor. *Arc routing: theory, solutions and applications*. Boston, MA: Kluwer, 2000.

43 DurthW, Hanke H. Optimization of winter road service. *Straße und Autobahn* 1983;34:63–71.

44 Jaquet J. Winter maintenance by Vinterman. In: *Ninth PIARC International Winter Road Congress*. Vienna, Austria: Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten; 1994. p. 8–15.

45 Blesik KH. Optimization in winter maintenance. In: *Ninth PIARC International Winter Road Congress*. Vienna, Austria: Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten; 1994. p. 440–6.

46 McDonald A. Managing the elements. *Traffic Technology International* 1998;152–4.

47 Anderson E, Metzger H, Burt W. Snow and ice removal monitoring and management system (SIRMMS). Final Report for ITS-IDEA Project 56, *Transportation Research Board*, Washington, DC, 2000.

48 Gini M, Zhao Y. Automated route planning and optimizing software. Final Report, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, Minnesota, 1997.

49 Xin Z, Egglese RW. The road gritting problem and its heuristic solution. *Working paper*, Lancaster University, Lancaster, 1989.

50 Egglese RW. Routing winter gritting vehicles. *Discrete Applied Mathematics* 1994;48:231–44.

51 Nathalie Perrier, Andre Langevin, James F. Campbell. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part III: Vehicle routing and depot location for spreading. *Computers & Operations Research* 34 (2007) 211–257

52 Liping Fu, Mathieu Trudel, Valeri Kim. Optimizing winter road maintenance operations under real-time information. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1, *European Journal of Operational Research* 196 (2009) 332–341

53 Strong, C., and X. Shi. Benefit-Cost Analysis of Weather Information for Winter Maintenance: A Case Study. *Transportation Research Record* 2055, *Transportation Research Board*, Washington, DC, 2008, pp.119-127.

54 Thomas H. Maze. Performance Measures for Snow and Ice Control Operations (2009) <https://doi.org/10.17226/23051>

55 Mónica Alejandra Altamirano. Innovative contracting practices in the road sector. Cross-national lessons in dealing with opportunistic behaviour. PhD Thesis *Series on Infrastructures*. 2010.

56 Najar, N.A., Jana, A., & Parthasarathy, D. (2024). Addressing climatic uncertainty through fleet optimization for robust winter road maintenance policy design. *Journal of Policy Modeling*. DOI:10.1016/j.jpolmod.2024.12.001

57 Nguyen, Phuong H.D. & Tran, Daniel, Constraint-Based snowplow optimization model for winter maintenance operations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, 2024. vol. 179(C). DOI: 10.1016/j.tra.2023.103911

58. Mohammadi, N., Klein-Paste, A., & Lysbakken, K. R. (2024). Simulating winter maintenance efforts: A multi-linear regression model. *Cold Regions Science and Technology*, 227, 104307. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104307>

59. Kharchenko, A., Zaviyskyi, O., Tsybulskyi, V., & Zavorotnyi, S. (2021). Development of methods for parameters of long-term contracts optimization for operational road maintenance. *Technology Audit and Production Reserves*, 1(2(57)), 49–53. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225532>

60. Kanin, A. ., Kharchenko, A., Tsybulskyi, V., Sokolova, N., & Shpyh, A. (2022). Construction of a simulation model for substantiating the parameters of long-term road maintenance contracts .*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3 (116)), 33–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253652>

61. Kharchenko, A., Tsybulskyi, V., Sokolova, N., Shpyh, A., Kanin, A., Smirnov, O., & Smirnov, A. (2025). Devising a methodological approach to prioritizing road sections for maintenance work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (137)), 83–95. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341939

62. Харченко А.М., Смірнов А.М. Основні дослідження в напрямку обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*, Київ, 2017. Вип. 102. С. 131-143. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/102/131-143.pdf

63. Смірнов А.М. Розробка методичного підходу до утримання автомобільних доріг у зимовий період з урахуванням світового досвіду.

Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», Київ, 2022. Вип. 111. С. 92-98. DOI: [10.33744/0365-8171-2022-111-092-098](https://doi.org/10.33744/0365-8171-2022-111-092-098)

64. Смірнов А.М. Особливості зимового утримання доріг в різних країнах світу. *International scientific conference «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukrain and the European Union»*. the Republic of Poland, 2022. С. 63-66. DOI: [10.46299/ISG.2022.2.14](https://doi.org/10.46299/ISG.2022.2.14)

65. Смірнов А.М. Аналіз світового досвіду утримання автомобільних доріг у зимовий період. *International scientific and practical conference «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects»*. Prague, 2021. С. 109-111. DOI: [10.30525/978-9934-26-109-1-26](https://doi.org/10.30525/978-9934-26-109-1-26)

66. Харченко А.М., Смірнов А.М., Науменко Е.А. Зимове утримання автомобільних доріг: досвід США. *LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету: тези доповідей*. К.: НТУ, 2021. С. 151.

67. Харченко А.М., Смірнов А.М. Досвід США з зимового утримання доріг. *LXXVI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету, присвячена 75-річчю з дня заснування університету: тези доповідей*. К.: НТУ, 2020. С. 135.

68. Performance Measures in Snow and Ice Control Operations. (2019). *The National Academies Press*. 144 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/25410>

69. Strong, C., and X. Shi. Benefit-Cost Analysis of Weather Information for Winter Maintenance: A Case Study. *Transportation Research Record* 2055, *Transportation Research Board*, Washington, DC, 2008, pp.119-127.

70. Liping Fu, Mathieu Trudel, Valeri Kim. Optimizing winter road maintenance operations under real-time information. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1, *European Journal of Operational Research* 196 (2009) 332–341.

71. Смірнов А., Токін О. Сфера застосування інноваційної техніки та обладнання при зимовому утриманні доріг. *International scientific conference «Processes of globalisation and transformation »*. Riga, 2023. P. 40-41. DOI: [10.30525/978-9934-26-309-5-12](https://doi.org/10.30525/978-9934-26-309-5-12)

72. Токін О.П., Смірнов А.М. Перспективи використання комбінованої снігоочисної техніки в утриманні доріг. Збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво». Одеса, 2023. С. 127-130. URL: https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_tez_konferentsii_GTB_2023.pdf

73. Boselly, S. E., Thornes, J., Ulberg, C., & Ernst, D. (1993). Road weather information systems, volume i. *Strategic Highway Research Program Publication-SHRP-H-350, National Research Council, Washington, DC*, 90-93.

74. Buchanan, F., & Gwartz, S. E. (2005). Road weather information systems at the Ministry of Transportation, Ontario. In *2005 Annual Conference of the Transportation Association of Canada* Transportation Association of Canada (TAC).

75. Ministry of Transportation of Ontario. Maintenance manual. Maintenance Office, Ontario Ministry of Transportation, St. Catharines, Ontario, Canada, 1999.

76. Phan, T. M., Jang, M.-S., & Park, D.-W. (2022). Black Ice Prediction Model for Road Pavement Using Weather Forecast Data and GIS Database. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 17(4), 63-79. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2022-17.579>

77. SDDOT WINTER HIGHWAY MAINTENANCE PLAN 2022-2023. URL: <https://boardsandcommissions.sd.gov/bcuploads/Attach%204%20-%20Consideration%20of%20Winter%20Highway%20Maintenance%20Plan%202022%20-%202023.pdf>

78. Харченко А.М., Смірнов А.М. Вплив даних метеозведень на боротьбу з зимовою слизькістю на дорогах. *LXXIV Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених*

структурних підрозділів Національного транспортного університету: тези доповідей. К.: НТУ, 2018. С. 189.

79. Turchi JR. A taxonomy of winter maintenance decision support systems. MSc project, University of Minnesota Duluth, 2002.

80. Malmberg Å, Axelson L. Expertsystm: En Forstudie och Prototyp. Hogskolan, Ostersund, 1991.

81. LjungbergM. Expert system for winter road maintenance. In: NinthAASHTO/TRB Maintenance Management Conference. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2000. p. 167–75.

82. Ketcham SD, Minsk R, Blackburn R, Fleege E. Manual of practice for an effective anti-icing program. Report No FHWARD-95-202, Federal Highway Administration, US, 1995.

83. Tokin, O., & Smirnov, A. (2023). Development Of A Mathematical Model Of Vehicle Routing During Winter Road Infrastructure Maintenance. *Scientific Journal of Polonia University*, 60(5), 122-127. DOI: 10.23856/6014 URL: <http://pnap.ap.edu.pl/index.php/pnap/article/view/1206>

84. Haghani, A., & Qiao, H. (2001). Decision Support System For Snow Emergency Vehicle Routing. *Transportation Research Record.*, 34(3), pp.172~178

85. Xie, B., Li, Y., & Jin, L. (2013). *Vehicle routing optimization for deicing salt spreading in winter highway maintenance. Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 945-953.

86. Campbell, J. F., & Langevin, A. (2000). *Roadway Snow and Ice Control. Transportation Research Record.*, 24(3), pp.389~418

87. Смірнов А.М. Підвищення продуктивності бригад з утримання доріг. Ювілейна LXXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету : тези доповідей. Том 2 - К.: НТУ, 2019. С. 168.

88. Смірнов А.М. Підготовка дорожніх організацій до зимового утримання доріг. *V міжнародна науково-практична конференція «Економічний розвиток: теорія, методологія, управління»*: збірник наукових праць та тез наукових доповідей. Прага, 2018. С. 261-263.

89. Kociánová, A. (2015). The intelligent winter road maintenance management in Slovak conditions. *Procedia Engineering*, 111, 410-419.

90. Min, J., L. Fu, T. Usman, and Z. Tan. Does winter road maintenance help reduce air emissions and fuel consumption? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016. 48: 85-95.

91. Ye, Z., C. Strong, L. Fay, and X. Shi. 2009. Cost Benefits of Weather Information for Winter Road Maintenance. Western Transportation Institute, Bozeman: Montana State University.
https://westerntransportationinstitute.org/wpcontent/uploads/2016/08/4W1576_Final_Report.pdf

92. Ye, Z., D. Veneziano, and X. Shi. 2013. Estimating statewide benefits of winter maintenance operations. *Transportation Research Record* 2329 (1): 17–23. doi:10.3141/2329-03.

93. Kharchenko, A., & Smirnov, A. (2023). Development of method for anti-icing materials consumption optimization during winter road maintenance. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(70), 19–23. DOI: 10.15587/2706-5448.2023.278120

94. Trenouth W., Gharabaghi B., Perera N. (2015). Road salt application planning tool for winter de-icing operations. *Journal of Hydrology*. Volume 524, May 2015, Pages 401-410. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.004>

95. Zítková, J., J. Hegrová, and P. Anděl. (2018). Bioindication of road salting impact on Norway spruce (*Picea abies*). *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59: 58–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.010>.

96. Cui N, Xie N, Shi X. (2018). *A Framework for Life-Cycle Sustainability Assessment of Road Salt Used in Winter Maintenance Operations*. In: Shi X, Fu L.,

editors. *Sustainable Winter Road Operations*. 1st ed. Wiley;. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781119185161.fmatter>

97. Katja Malovrh Rebec and Janez Turk. (2023) Pathway toward Sustainable Winter Road Maintenance (Case Study) Life Cycle Assessment. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.110764>

98. Terry LG, Conaway K, Rebar J, et al. (2020). Alternative deicers for winter road maintenance—A review. *Water, Air, and Soil Pollution*; 231:394. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04773-x>

99. Keegan Mbiyana. (2018). Winter Road Maintenance Planning-Decision Support Modelling. Luleå University of Technology. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. 66 p.

100. Dmytrychenko, N., & Kharchenko, A. (2021). Development of method for road network management program optimization. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(2(60), 56–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.237949>

101. Kharchenko, A., Tsybulskyi, V., Chechuha, O., Zavorotnii, S., & Shuliak, I. (2022). Building a model for managing the cost and duration of motor road projects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (117), 13–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.256213>

102. Vignisdottir HR, Ebrahimi B, Booto GK, et al. (2020). Life cycle assessment of winter road maintenance. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2020;25:646-666. URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01682-y>

ДОДАТОК А
ФРАГМЕНТ ДЕТАЛІЗОВАНОЇ ТАБЛИЦІ
РІВНІВ ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ ЗИМОВОГО УТРИМАННЯ ДОРІГ

Продовження таблиці 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
11.05	Сніговий накат	3	Год	3	3	3	3	2	2	3	3	2	2	2	3
11.06	Зимова слизькість. Площа льоду — понад 5 % від площі проїзної частини та коефіцієнт зчеплення — менше ніж 0,3. Строк реагування — через 1,5 год після утворення та збереження льоду	3	Год	3	4	6	12	3	4	6	12	3	4	6	12
11.07	Ожеледь у зимових умовах, один випадок на 500 м. Площа льоду — понад 5 % від площі проїзної частини (на відстані 10 м суцільної проїзної частини)	3	Год	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1
11.08	Зимова слизькість, один випадок на 500 м. Площа льоду — понад 5 % від площі проїзної частини та коефіцієнт зчеплення — менше ніж 0,3. Усі смуги руху під впливом транспортного потоку: на спусках — понад 6 % та кривих з радіусом менше ніж 600 м; за видимості менше ніж 350 м, у межах 500 м від будь-якого перехрестя, кільцевого перетину, населеного пункту, залізничного переїзду, мостів і підходів до них чи автобусної зупинки	3	Год	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11.09	Сніг і лід не в екстремальних умовах. Інтенсивність снігопаду — менше ніж чи дорівнює 5 см/год	3	Год	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
11.10	Сніг і лід після екстремальних умов. За кожні неперервні 500 м проїзної частини, де порушують критерій після екстремальних умов. Інтенсивність снігопаду — понад 5 см/год	3	Год	9	9	9	9	8	8	8	8	7	7	7	7

Кінець таблиці 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
11.31	Зимова слизькість, один випадок. Наявність льоду площею понад 10 %	3	Год	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11.32	Очищення узбіч, посадкових майданчиків, майданчиків для стоянки транспортних засобів і відпочинку учасників дорожнього руху, автомобільних стоянок після закінчення снігопаду	3	Діб	1,5	2,5	4	12	1,5	2,5	4	12	1,5	2,5	4	12

ДОДАТОК Б
ФРАГМЕНТ СТАТИСТИЧНОЇ ТАБЛИЦІ ЗИМОВОГО УТРИМАННЯ
ДОРІГ В М. КИЄВІ

ДОДАТОК В
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
РОБОТИ ТА АВТОРСЬКІ СВІДОЦТВА



Project office
1st Floor, 4a Seriohin Str.
Poltava 36008 UKRAINE
Tel: +380671149024
+380672017114
Email: egis.poltava@egis-ukraine.com

**Consulting Services for the Supervision of Civil Works on the section of M03
Kyiv – Kharkiv – Dovzhanskyi Road (Lots 3.2, 3.3 & 3.5)**

**Надання консультативних послуг з нагляду за будівельними роботами
на ділянці М03 Київ – Харків – Довжанський (Лоти 3.2, 3.3 і 3.5)**

Date: 13th September 2022

Дата: 13 вересня 2022 р.

Subject: Reference about implementation of
the results of scientific research work

Тема: Довідка про впровадження
результатів науково-дослідної роботи

Correspondent: **Francis Ryan**
Chief Resident Engineer
Frank.RYAN-int@egis.fr

Кореспондент: **Френсіс Раян**
Головний Інженер Резидент
Frank.RYAN-int@egis.fr

To: Mr. Dmytrychenko M.F., rector of National Transport University Address: 01010, Ukraine, city of Kyiv, 1 Omelianovycha-Pavlenko str., building 318	Адресат: Національний транспортний університет До уваги: п. Дмитриченко М. Ф. Ректора Адреса: 01010 Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 318
--	--

Reference of previous letters: Engineer's: N/A Employer's: N/A Contractor's: N/A	Посилання на попередні листи: Інженера: Н/З Замовника: Н/З Підрядника: Н/З
---	---

Dear Sir,

Шановний пане!

Herby, we notify that the results of research, which are reflected in dissertation work of Smirnov Anatolii Mykolaiovych on the topic of winter maintenance of highways are used to determine and optimization winter maintenance models for the successful implementation of long-term contracts for maintenance of roads.

Даною довідкою засвідчується, що результати досліджень, які відображені в дисертаційній роботі Смірнова Анатолія Миколайовича на тематику зимового утримання автомобільних доріг використовуються для визначення та оптимізації моделі зимового утримання для успішної реалізації довгострокових контрактів на утримання автомобільних доріг.

The results of this work allow to determine the value of time and resources for winter maintenance in the framework of long-term contracts for maintenance of roads, as well as to effectively optimize winter maintenance

Отримані результати даної роботи дозволяють визначити значення часу та витрат ресурсів для зимового утримання в

Egis International

15, avenue du Centre - CS 20538 - Guyancourt - 78286 Saint-Quentin-en-Yvelines Cedex - France
Tél. +33 1 39 41 40 00 - Fax +33 1 39 41 57 57 - www.egis.fr - S.A.S au capital de 14 855 100 Euros
SIRET 582 132 551 00174 - SIREN 582 132 551 - R.C.S Versailles - N° identification intracommunautaire FR 62 582 132 551 - Code APE 7112B



models maintenance models taking into account a sufficient level of quality of work performance, which provides the possibility of implementing long-term contracts for the operational maintenance of the roads of Ukraine.

We remain at your disposal for any further clarification you should need.

рамках довгострокових контрактів з утримання автомобільних доріг, а також ефективно оптимізувати моделі зимового утримання з врахуванням достатнього рівня якості виконання робіт, що забезпечує можливість реалізації довгострокових контрактів для експлуатаційного утримання автомобільних доріг України.

У разі необхідності, ми готові надати вам будь-які роз'яснення.

Best Regards,

Francis Ryan
Chief Resident Engineer
Email: Frank.RYAN-int@egis.fr



З повагою,

Френсіс Раян
Головний Інженер Резидент
Email: Frank.RYAN-int@egis.fr

General Management

15, avenue du Centre - CS 20538 Guyancourt - 78286 Saint-Quentin-en-Yvelines Cedex - France
Tel. +33 1 39 41 40 00 - www.egis-group.com
Corporate Capital EUR 67 505 130 - SIRET 702 027 376 02000 - SIREN 702 027 376 - R.C.S Versailles
Intra-Community VAT identification number FR 01 702 027 376 - Code APE (NAF) 6420Z

ДОВІДКА**про впровадження результатів науково-дослідної роботи**

Дана довідка засвідчує, що результати дослідження, що відображене в дисертаційній роботі Смірнова Анатолія Миколайовича, використовуються на практиці для оптимізації витрат протиожеледних матеріалів при зимовому утриманні автомобільних доріг.

Матеріали та результати науково-дослідної роботи Смірнова А.М. дозволяють визначити фактичні витрати протиожеледних матеріалів та здійснити їх планування з урахуванням використання сучасних технологій та техніки з зимового утримання доріг. Запропонована математична модель дозволяє врахувати критерії надійності, збереження активів, безпеки дорожнього руху, відповідності очікуванням користувачів, екологічності, ефективності застосування матеріалів тощо. Результати роботи надають можливість якісно та ефективно обґрунтовувати рівень обслуговування автомобільних доріг у зимовий період.





028189

УКРАЇНА

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

вул. М.Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010, т.ф. +38 (044) 280 82 03, т. +38 (044) 280 87 65
e-mail: general@ntu.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070915

03.11.2025 № 27/49/02 на № _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри транспортного будівництва та управління майном Смірнова Анатолія Миколайовича були впроваджені в навчальний процес при підготовці фахівців за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (ОПІ «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів»). Результати дослідження використовуються як вихідні дані та методичні вказівки при виконанні курсових проектів студентами щодо розрахунку потреб у техніці та реагентах для зимового утримання. Впровадження наукових розробок Смірнова А.М. сприяє підвищенню актуальності та практичної спрямованості освітнього процесу, забезпеченню підготовки студентів із застосуванням сучасних, науково обґрунтованих технологій та комп'ютерного моделювання у сфері експлуатації автомобільних доріг.

Проректор з навчальної роботи та
міжнародних зв'язків НТУ,
канд.техн.наук, професор

Віталій ХАРУТА

Заступник декан факультету
транспортного будівництва НТУ,
канд.техн.наук, доцент

Віталій ЦИБУЛЬСЬКИЙ





24.11.2015 № 053/243-1603
На № _____ від _____

ДОВІДКА

Про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Дана довідка засвідчує, що результати дослідження, відображене в дисертаційній роботі Смірнова Анатолія Миколайовича, використовуються на практиці для оптимізації витрат протиожезедних матеріалів при зимовому утриманні автомобільних доріг.

Матеріали та результати науково-дослідної роботи Смірнова А.М. дозволяють визначити фактичні витрати протиожезедних матеріалів та здійснити їх планування з урахуванням використання сучасних технологій та техніки з зимового утримання доріг. Запропонована математична модель дозволяє врахувати критерії надійності, збереження активів, безпеки дорожнього руху, відповідності очікуванням користувачів, екологічності, ефективності застосування матеріалів тощо. Результати роботи надають можливість якісно та ефективно обґрунтовувати рівень обслуговування автомобільних доріг у зимовий період.

В.о. Начальника



Сергій ПІДГОРОДЕЦЬКИЙ



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 120057

Літературний письмовий твір наукового характеру «Методичний підхід до утримання автомобільних доріг у зимовий період»

(вид, назва твору)

Автор(и) Харченко Анна Миколаївна, Смірнов Анатолій Миколайович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 26 червня 2023 р.

Директор
Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»

 Олена ОРЛЮК


М.П.



ДОДАТОК Г
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Kharchenko, A., Tsybulskiy, V., Sokolova, N., Shpyh, A., Kanin, A., Smirnov, O., & Smirnov, A. (2025). Devising a methodological approach to prioritizing road sections for maintenance work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (137), 83–95.

Quartile – Q3

(<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100450083&tip=sid&clean=0>)

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341939

URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/341939/330583>

ISSN 1729-3774 (Print)

ISSN 1729-4061 (Online)

2. Kharchenko, A., & Smirnov, A. (2023). Development of method for anti-icing materials consumption optimization during winter road maintenance. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(70), 19–23.

DOI: 10.15587/2706-5448.2023.278120

URL: <https://journals.uran.ua/tarp/article/view/278120>

ISSN 2226-3780 (print)

ISSN 2312-8372(on-line)

Статті у фахових виданнях:

3. Смірнов А.М. Розробка методичного підходу до утримання автомобільних доріг у зимовий період з урахуванням світового досвіду. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*, Київ, 2022. Вип. 111. С. 92-98.

DOI: 10.33744/0365-8171-2022-111-092-098

URL: [http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/111/92-](http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/111/92-98.pdf)

98.pdf

ISSN 0365-8171 (Print)

ISSN 2707-4080 (Online)

Статті, які додатково висвітлюють результати дисертаційного дослідження:

4. Tokin, O., & Smirnov, A. (2023). Development Of A Mathematical Model Of Vehicle Routing During Winter Road Infrastructure Maintenance. *Scientific Journal of Polonia University*, 60(5), 122-127.

DOI: 10.23856/6014

URL: <http://pnap.ap.edu.pl/index.php/pnap/article/view/1206>

ISSN 2957-1898 (Print)

ISSN 2957-2096 (Online)

5. Харченко А.М., Смірнов А.М. Основні дослідження в напрямку обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*, Київ, 2017. Вип. 102. С. 131-143.

URL: [http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/102/131-](http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/102/131-143.pdf)

143.pdf

ISSN 0365-8171 (Print)

ISSN 2707-4080 (Online)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Смірнов А., Токін О. Сфера застосування інноваційної техніки та обладнання при зимовому утриманні доріг. *International scientific conference «Processes of globalisation and transformation »*. Riga, 2023. P. 40-41.

DOI: 10.30525/978-9934-26-309-5-12

URL:

<http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/324/8952/18742-1>

ISBN: 978-9934-26-309-5

7. Токін О.П., Смірнов А.М. Перспективи використання комбінованої снігоочисної техніки в утриманні доріг. Збірник тез *Міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво»*. Одеса, 2023. С. 127-130.

URL:

https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_tez_konferentsii_GTB_2023.pdf

8. Смірнов А.М. Особливості зимового утримання доріг в різних країнах світу. *International scientific conference «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukrain and the European Union»*. the Republic of Poland, 2022. С. 63-66.

DOI: 10.46299/ISG.2022.2.14

URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/12/Modern-stages-of-scientific-research-development.pdf>

ISBN 979-8-88862-818-8

9. Смірнов А.М. Аналіз світового досвіду утримання автомобільних доріг у зимовий період. *International scientific and practical conference «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects»*. Prague, 2021. С. 109-111.

DOI: 10.30525/978-9934-26-109-1-26

URL: <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/147/4397/9179-1>

ISBN: 978-9934-26-109-1

10. Харченко А.М., Смірнов А.М., Науменко Е.А. Зимове утримання автомобільних доріг: досвід США. *LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету: тези доповідей*. К.: НТУ, 2021. С. 151.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view

11. Харченко А.М., Смірнов А.М. Досвід США з зимового утримання доріг. *LXXVI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету, присвячена 75-річчю з дня заснування університету: тези доповідей.* К.: НТУ, 2020. С. 135.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWlv/view>

12. Смірнов А.М. Підвищення продуктивності бригад з утримання доріг. *Ювілейна LXXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету : тези доповідей.* Том 2 - К.: НТУ, 2019. С. 168.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL:

<https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view>

13. Харченко А.М., Смірнов А.М. Вплив даних метеозведень на боротьбу з зимовою слизькістю на дорогах. *LXXIV Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету: тези доповідей.* К.: НТУ, 2018. С. 189.

ISSN 2786-6459 (Print), ISSN 2786-6467 (Online).

URL:

https://drive.google.com/file/d/1_uA1WGugEVOGtLukG_ZMX71VgXPIq98l/view

14. Смірнов А.М. Підготовка дорожніх організацій до зимового утримання доріг. *V міжнародна науково-практична конференція «Економічний розвиток:*

теорія, методологія, управління»: збірник наукових праць та тез наукових доповідей. Прага, 2018. С. 261-263.

ISBN 978-617-673-833-6

URL: <https://surl.li/sqwoex>

Свідоцтва та патенти:

15. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір. № 120057. Україна. Літературний письмовий твір науково го характеру «Методичний підхід до утримання автомобільних доріг у зимовий період». Харченко А.М., Смірнов А.М. Дата реєстрації 26.06.2023 р.

16. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір. № 120343. Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період». Харченко А.М., Смірнов А.М. Дата реєстрації 06.07.2023 р.