

УДК 625.76

Харченко А.М., канд. тех. наук, Смірнов А.М.

ОСНОВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В НАПРЯМКУ ОБҐРУНТУВАННЯ РІВНІВ ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ В ЗИМОВИЙ ПЕРІОД

Анотація. У статті розглянуто проблему обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період. Проаналізовано основні види робіт по боротьбі із зимовою слизькістю, проблему обґрунтування ресурсів дорожньої організації та маршрутизації спецтехніки. Досліджена література підтримки прийняття рішень щодо виконання операцій по зимовому утриманню доріг з використанням методів оптимізації маршрутизації автомобілів та витрат хімічних реагентів.

Ключові слова. Зимове утримання, стан покриття, реагенти, маршрутизація

UDC 625.76

Kharchenko A., Cand. Eng. Sci (Ph.D), Smirnov A.

BASIC RESEARCH IN THE DIRECTION OF JUSTIFICATION OF THE LEVELS OF ROAD MAINTENANCE IN THE WINTER PERIOD

Abstract. The article considers the problem of justifying the levels of road maintenance in winter. The main types of work to combat winter slipperiness, the problem of justifying the resources of the road organization and the routing of special equipment were analyzed. The literature of support of decision-making on performance of operations on winter road maintenance with use of methods of optimization of routing of vehicles and consumption of chemical reagents is investigated.

Keywords. Winter maintenance, pavement condition, reagents, routing.

УДК 625.76

Харченко А.Н., канд. тех. наук, Смирнов А.Н.

ОСНОВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ ОБОСНОВАНИЯ УРОВНЕЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Аннотация. В статье рассмотрена проблема обоснования уровней обслуживания автомобильных дорог в зимний период. Проанализированы основные виды работ по борьбе с зимней скользкостью, проблема обоснования ресурсов дорожной организации и маршрутизации спецтехники. Исследована литература поддержки принятия решений по выполнению операций по зимнему содержанию дорог с использованием методов оптимизации маршрутизации автомобилей и расхода химических реагентов.

Ключевые слова. Зимнее содержание, состояние покрытия, реагенты, маршрутизация

Вступ

Зимове утримання доріг, 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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз досліджень та публікацій показав, що в роботах [1-3] були визначені основні нормативно-правові положення обґрунтування методів боротьби з зимовою слизькістю в умовах України. Проте, слід зазначити, що в цих документах чітко не визначено порядок обґрунтування рівнів зимового обслуговування доріг. Вивчення зарубіжного досвіду дозволяє сформулювати основні напрямки подальших досліджень цієї проблематики. Зокрема, в роботах [4-7,19-22] розглядається використання хімічних та абразивних матеріалів, їх вплив на навколишнє середовище. В роботах [5,8-17] 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 [23-29] 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.

Постановка завдання

Завданням даного дослідження є аналіз основних методів обґрунтування рівнів обслуговування автомобільних доріг в зимовий період за рахунок оптимізації ресурсів та маршрутизації спецтехніки.

Основна частина

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).

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.

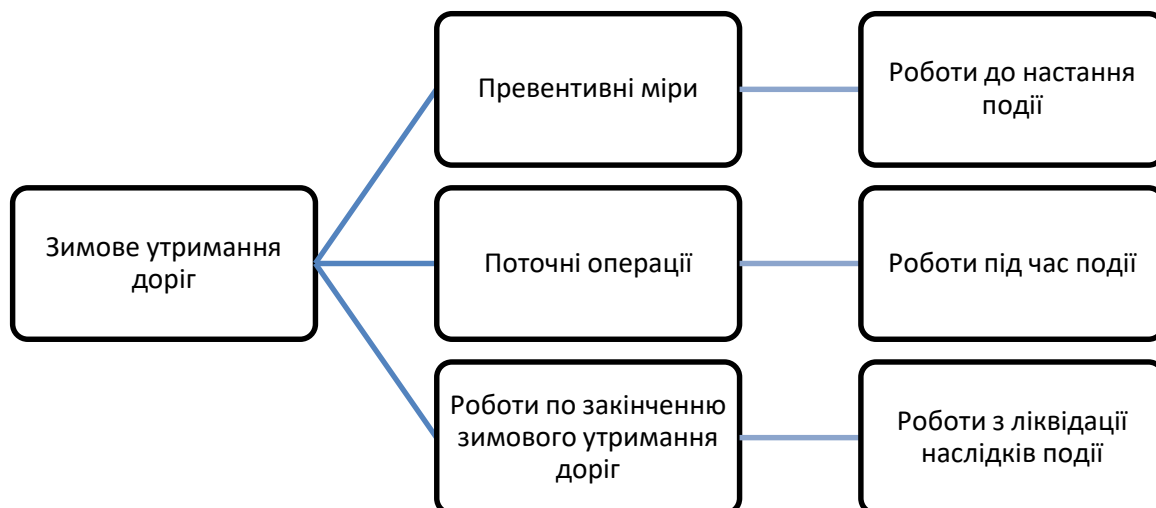


Рисунок 1 – Традиційний перелік робіт з зимового утримання доріг

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 [2], іншими державними стандартами з урахуванням народногосподарського та адміністративного значення дороги, оснащеності дорожньо-експлуатаційної служби необхідними машинами, обладнанням та матеріалами [3].

Зимове утримання автомобільних доріг загального користування в Україні нормується за складністю робіт [3]:

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

Згідно проведеного аналізу світового досвіду, зазвичай, застосування хімічних реагентів, включаючи витрати на матеріал, робочу силу та обладнання, складає приблизно одну третину прямих витрат [4]. Витрати піску та інших абразивів складають більше ніж 10 відсотків бюджетних коштів виділених на зимове утримання [5]. Використання хімічних речовин та абразивних матеріалів також пов'язано з багатьма непрямими витратами, що включає пошкодження автотранспортних засобів, вплив на інфраструктуру та навколишнє середовище [6-7].

В останні роки у світі широко використовуються так звані служби прогнозування снігових опадів та термічне картографування (більшість дорожніх агентств Європи, Японія, США).

Слід зазначити, 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. Деякі дослідники [5-7] 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.

Проблема маршрутизації спецтехніки по зимовому утриманню доріг напряду пов'язана з рівнями обслуговування, так як завдяки вирішенню цієї

проблеми можна визначити оптимальну кількість необхідних ресурсів (одиниць спецтехніки) для виконання робіт.

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 [5]:

$$G = (R, L), \quad (1)$$

де R – мережні вузли,

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 як:

$$d_p = d_{ik} + d_{k,g} + \dots + d_{m,j} = \sum_{(l,m) \in p} d_{l,m}. \quad (2)$$

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

В роботах Assad, Golden [8] Eiselt [9,10], Dror [11] 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 [12], Jaquet [13], Blesik [14], McDonald [15], Anderson та ін. [16]. 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 [17]. В роботі Turchi [18] 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 умовах. Наприклад, в роботах Malmberg,

Axelsson[19]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 [20].

В роботах Ketcham [21] 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 [22].

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 [23].

Методи метаевристики базуються на імітаційному підході [24-29] 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 1 наведено характеристику моделей маршрутизації спецтехніки, які використовуються в інших країнах для обґрунтування кількості ресурсів та часу виконання операцій із зимового утримання автомобільних доріг.

Таблиця 1 – Характеристика моделей маршрутизації автомобілів для (адаптовано з [28])

Автор	Тип проблеми	Рівень планування	Характеристика проблеми	Мета функції цілі	Структура моделі	Метод вирішення
Еванс Еванс і Вант	Маршрутизація солерозки дувача	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 солерозки дувача	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 абразив. матеріалів	Операційний	Послідовність обслуговування і максимальна тривалість маршруту	Мінімальні порушення маршруту	Проблема «маршрутизація дуги»	Паралельно-конструктивний метод
Кук і Альпрін	Маршрутизація солерозки дувача	Операційний	Потужність автомобіля, балансування навантаження, і надання двосторонніх послуг	Мінімальний час розповсюдження посипкових матеріалів	Проблема «маршрутизація дуги»	Паралельно-конструктивний метод
Унгерер	Маршрутизація солерозки дувача	Реальний час	Потужність автомобіля та максимальна довжина маршруту	Мінімальна загальна відстань	Проблема маршрутизац. солерозкид.	Паралельно-конструктивний метод

Продовження табл. 1

Автор	Тип проблеми	Рівень планування	Характеристика проблеми	Мета функції цілі	Структура моделі	Метод вирішення
Дарлінг	Моделювання комбінованого сектору і маршрутизації солерозки дувача	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 солерозки дувача	Стратегічний	Компактність, балансування робочого навантаження, частота обслуговування	Мінімальне сервісне обслуговування до закінчення маршруту	Проблема «маршрутизації дуги»	Кластерний метод
Сойстер	Маршрутизація солерозки дувача	Операційний	Потужність автомобіля, посипка двох смуг за один прохід	Мінімальна відстань посипки	Проблема «маршрутизації дуги»	Методи імітаційного моделювання
Хагані і Цяо	Маршрутизація солерозки дувача	Операційний	Сервісне обслуговування, потужність автомобіля	Мінімальна кількість спецтехніки	Проблема «маршрутизації дуги»	Методи імітаційного моделювання
Син і Еглес	Маршрутизація солерозки дувача	Операційний	Потужність автомобіля, декілька маршрутів на один солерозкидач	Мінімальна кількість спецтехніки	Проблема «маршрутизації дуги»	Композитний метод
Хагані і Цяо	Маршрутизація солерозки дувача	Операційний	Послідовність обслуговування, потужність автомобіля, максимальна тривалість маршруту	Мінімальні ресурси до закінчення операцій	Лінійний МІР	Композитний метод
Еглеса	Маршрутизація солерозки дувача	Операційний	Сервісна послідовність та потужність автомобіля, групування вуличних сегментів	Мінімальна кількість спецтехніки	Розгалужений алгоритм	Методи імітаційного моделювання
Бенсон і співавт	Маршрутизація солерозки дувача	Операційний	Потужність автомобілів, швидкість сервісного обслуговування	Місткість автомобілів, часові рамки посипки	Нелінійний МІР	Композитний метод
Цяо	Маршрутизація солерозки дувача	Операційний	Рівень обслуговування автомобілів	Мінімальна кількість спецтехніки	Лінійний МІР	Композитний метод

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 [26]:

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.

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 [26]. 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 – Показує довжину сегменту дороги i , виражену як кількість часових інтервалів, необхідних для її проходження;

L_k – Показує довжину маршруту k , виражену як кількість часових інтервалів, необхідних для її проходження;

λ_i – Представляє 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 – представляє 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.

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 , і 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:

$$Y = f(X, R, l), \quad (3)$$

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

$$Y' = f'(X, R, l), \quad (4)$$

f' – лінійна функція.

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

$$c_{i,t} = \max(0, c_{i,t-1} + w_{i,t} - \Delta \cdot y'_{i,t}), \quad (5)$$

де Δ – 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 [26]:

$$\sum_i \sum_t \lambda_i \cdot c_{i,t} + \beta \sum_k \sum_t L_k \cdot x_{k,t} \rightarrow \min, \quad (6)$$

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

Обмеження:

$$c_{i,t} = \max(0, c_{i,t-1} + w_{i,t} - \Delta \cdot y'_{i,t}). \quad (7)$$

$$c_{i,t} \leq \Phi_i. \quad (8)$$

$$\sum_i y_{i,t} \leq d. \quad (9)$$

$$Y = f(X, R, l). \quad (10)$$

$$Y' = f'(X, R, l). \quad (11)$$

Висновок

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.

Література

1. П Г.1-218-118:2005 Єдині правила зимового утримання автомобільних доріг.
2. ДСТУ 3587–97 Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану.
3. П Г.1-218-113:2009 Технічні правила ремонтів та утримання автомобільних доріг загального користування України.
4. Perrier N, Langevin A., Campbell J. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part IV: vehicle routing and fleetsizing for plowing and snow disposal. *Computers & Operations Research* 2005, doi:10.1016/j.cor.2005.05.008.
5. 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: 10.1016/j.cor.2004.07.006.
6. 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: 10.1016/j.cor.2004.07.007.
7. Transportation Research Board. Highway deicing. Comparing salt and calcium magnesium acetate. Special Report 235, National Research Council, Washington, DC, 1991.
8. 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.
9. Eiselt HA, Gendreau M, Laporte G. Arc routing problems. Part I: the Chinese postman problem. *Operations Research* 1995;43:231–42.
10. Eiselt HA, Gendreau M, Laporte G. Arc routing problems. Part II: the rural postman problem. *Operations Research* 1995;43:399–414.
11. Dror M, editor. *Arc routing: theory, solutions and applications*. Boston, MA: Kluwer, 2000.
12. Durth W, Hanke H. Optimization of winter road service. *Straße und Autobahn* 1983;34:63–71.
13. Jaquet J. Winter maintenance by Vinterman. In: Ninth PIARC International Winter Road

- Congress. Vienna, Austria: Bundesministeriumfur Wirtschaftliche Angelegenheiten; 1994. P. 8–15.
14. Blesik KH. Optimization in winter maintenance. In: Ninth PIARC International Winter Road Congress. Vienna, Austria: Bundesministeriumfur Wirtschaftliche Angelegenheiten; 1994. P. 440–6.
 15. McDonald A. Managing the elements. Traffic Technology International 1998;152–4.
 16. 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.
 17. Gini M, Zhao Y. Automated route planning and optimizing software. Final Report, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, Minnesota, 1997.
 18. Turchi JR. A taxonomy of winter maintenance decision support systems. MSc project, University of Minnesota Duluth, 2002.
 19. Malmberg A, Axelson L. Expert system: En Forstudie och Prototyp. Hogskolan, Ostersund, 1991.
 20. Ljungberg M. Expert system for winter road maintenance. In: Ninth AASHTO/TRB Maintenance Management Conference. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2000. P. 167–75.
 21. 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.
 22. Ministry of Transportation of Ontario. Maintenance manual. Maintenance Office, Ontario Ministry of Transportation, St. Catharines, Ontario, Canada, 1999.
 23. Xin Z, Eglese RW. The road gritting problem and its heuristic solution. Working paper, Lancaster University, Lancaster, 1989.
 24. Eglese RW. Routeing wintergritting vehicles. Discrete Applied Mathematics 1994;48:231–44.
 25. 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.
 26. 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.
 27. 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.
 28. Thomas H. Maze. Performance Measures for Snow and Ice Control Operations (2009) <https://doi.org/10.17226/23051>
 29. Mónica Alejandra Altamirano. Innovative contracting practices in the road sector. Cross-national lessons in dealing with opportunistic behaviour. PhD Thesis Series on Infrastructures. 2010.

Рецензенти:

Батракова А.Г., д-р техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.
Яценко І.В., канд. екон. наук, Національний транспортний університет.

Reviewers:

Batrakova A.H., Dr. Tech. Sci., Kharkiv National Automobile and Highway University.
Yatsenko I.V., Cand. Econ. Sci., National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: **08.08.2017 р.**