

УДК 504:625.7

Харитонova Н. М., <https://orcid.org/0000-0001-5732-3407>Ярошук О. С., <https://orcid.org/0000-0003-1550-0131>*Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури (ДП «НІРІ»)
м. Київ, Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗНИМИ КРАЇНАМИ СВІТУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПІД ЧАС ЗИМОВОГО УТРИМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Анотація

Вступ. Одним із ключових чинників безпеки дорожнього руху в зимовий період є належний рівень зчеплення шин з дорожнім покриттям. У зв'язку із цим зростають вимоги до якості зимового утримання автомобільних доріг, зокрема щодо ефективного зменшення слизькості покриття. У різних країнах застосовуються різні підходи до використання протиожедедних матеріалів, що зумовлено кліматичними особливостями, типами дорожнього покриття, інтенсивністю транспортних потоків, екологічними міркуваннями та економічними чинниками. Значну роль відіграють як фізико-хімічні властивості матеріалів, так й оптимізація їх складу та дозування відповідно до конкретних умов експлуатації.

Проблематика. З початком повномасштабного вторгнення РФ було зруйновано завод «Артемсіль» — основне підприємство, що забезпечувало постачання солі для зимового утримання автомобільних доріг в Україні. Це поставило перед фахівцями термінове завдання — пошук альтернативних протиожедедних матеріалів для забезпечення безпеки дорожнього руху в зимовий період. На сьогодні тривають дослідження властивостей матеріалів, які постачаються з різних країн і мають відмінне походження та характеристики. Особливе значення надається підвищенню ефективності їх використання, а також удосконаленню норм витрат з урахуванням реальних кліматичних і експлуатаційних умов.

Мета. Виконати аналіз і врахувати досвід та найкращі практики використання протиожедедних матеріалів різними країнами світу під час зимового утримання автомобільних доріг.

Матеріали та методи. Аналізування існуючого досвіду поводження з протиожедедними матеріалами інших країн надасть можливість запровадження його на території нашої країни.

Результати. У статті розглянуті дослідження, які проводились різними країнами щодо використання і поводження з протиожедедними матеріалами.

Висновки. У сучасних умовах актуальним є завдання оптимізації системи поводження з протиожедедними матеріалами в Україні. Це передбачає впровадження новітніх методів і стратегій, спрямованих на підвищення ефективності зимового утримання доріг. Необхідно розробити чіткі процедури лабораторних випробувань та методики оцінювання ефективності різних типів протиожедедних реагентів у реальних (польових) умовах експлуатації. Такий підхід дозволить обґрунтовано обирати матеріали з урахуванням як їхніх технічних характеристик, так і економічної доцільності.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожній покриття, зимова слизькість, зимове утримання, протиожедедні матеріали.

Вступ

Зимова слизькість на автомобільних дорогах призводить до численних аварій і небезпечних ситуацій. Застосування протиожедедних матеріалів є ефективним засобом боротьби із цією проблемою. Зважаючи на підвищену частоту несприятливих погодних умов та зміну клімату, вивчення властивостей і характеристик протиожедедних матеріалів набуває все більшої

актуальності [1, 2]. Вибір типу протиожеледного матеріалу, схеми нанесення їх на дорожній покриття залежать від різних чинників:

- кліматичні умови (у різних регіонах світу температура та вологість відрізняються);
- інтенсивність транспортних потоків;
- екологічні аспекти (деякі матеріали можуть мати негативний вплив на флору або фауну);
- економічні аспекти (вартість матеріалу, умови транспортування);
- фізико-хімічні показники (матеріали мають різний температурний діапазон дії, швидкість дії, тривалість ефекту).

Питання ефективності протиожеледних матеріалів є предметом активного вивчення в багатьох країнах світу. Науковці досліджують здатність цих матеріалів забезпечувати необхідний рівень зчеплення в різних дорожньо-кліматичних умовах. Постійно ведеться пошук більш ефективних рішень, проводяться наукові дослідження з метою підвищення якості та ефективності реагентів, що використовуються для зимового утримання доріг.

Основна частина

Найбільш традиційним протиожеледним матеріалом, який використовують в Європі та інших країнах світу є натрію хлорид (NaCl). За походженням існують наступні типи солі NaCl : кам'яна, сонячна, вакуумна сіль. Кам'яну сіль видобувають з використанням обладнання та технологій для видобутку твердих порід. Сонячну сіль отримують шляхом випаровування морської води або розсолу з соляних відкладень або видобутком із солоних озер, вакуумну сіль отримують шляхом вакуумування та сушіння розчину, отриманого після закачування води в підземні свердловини.

Натрію хлорид має щільність $2,17 \text{ г/см}^3$, розчинність у воді 359 г/л за температури 20°C .

Також досить поширені протиожеледні матеріали такі як кальцію хлорид, магнецію хлорид.

Кальцію хлорид (CaCl_2) має щільність $2,16 \text{ г/см}^3$, розчинність у воді 740 г/л за температури 20°C . CaCl_2 зустрічається в природі у вигляді соляного розчину, але для промислового використання його в основному виробляють із соляної кислоти (HCl) і карбонату кальцію (CaCO_3) або отримують як побічний продукт виробництва соди. Утворення кристалів відбувається нерівномірно, ніж у випадку з NaCl , що призводить до пластівчастої форми при висиханні. Кальцію хлорид дуже гігроскопічний, тобто він притягує воду і вологу з повітря, що робить його хорошим осушувачем у промисловості та харчовій промисловості. Однак для зимового обслуговування доріг ця властивість іноді може приводити до проблеми, тому що водії приймають водяну плівку за ожеледь.

Магнецію хлорид (MgCl_2) має щільність $2,32 \text{ г/см}^3$, розчинність у воді 542 г/л за температури 20°C . Магнецію хлорид у природних умовах зустрічається в мінералах та міститься в морській воді. Як і кальцію хлорид, він дуже гігроскопічний з тими ж недоліками, описаними вище. Одержують його з оксиду магнецію (MgO), хлору (Cl_2) і коксу (C). Він служить основою для отримання елементарного магнецію і як харчова добавка. Його також використовують в різній промисловій продукції (сплави, паливо).

В Європі протиожеледні матеріали використовують для автомобільних доріг, якщо вони відповідають вимогам європейських стандартів серії EN 16811, є нешкідливими з точки зору безпеки, здоров'я та впливу на навколишнє середовище.

У першій частині цієї серії стандартів [3] наведені вимоги та методи випробувань натрію хлориду (хімічного складу, вологості, зернового складу, протизлежувальних властивостей), а також до розсолу натрію хлориду, а саме до вмісту нерозчинних у воді речовин, хімічного складу.

У другій частині серії стандартів [4] наведені ті ж вимоги та методи випробувань до кальцію хлориду, магнецію хлориду та їх розчинів.

У третій частині серії стандартів [5] наведені вимоги та методи випробувань інших твердих і рідких протиожеледних реагентів. У цій частині наведено процедуру визначення показника плавильної здатності, а також визначення корозійної активності, температури спалаху, біорозкладання, нерозчинних у воді речовин, кінематичної в'язкості, електропровідності, насипної щільності, щільності розчину, вимоги до добавок, визначення опору ковзанню.

У США та Канаді для оцінювання якості натрію хлориду, що використовується як протижеледний реагент, застосовують стандарт ASTM D632-12 [6]. Він поширюється на сіль, отриману як із природних родовищ (кам'яна сіль), так і шляхом випарювання (сонячна сіль). У межах цього стандарту розрізняють два типи матеріалу. Тип I призначений для використання як протижеледний реагент на дорожніх покриттях або для стабілізації заповнювачів. Тип I додатково поділяється на два сорти: Сорт I — стандартна градація, та Сорт II — спеціальна градація. Тип II призначений виключно для стабілізації заповнювачів або для інших цілей, не пов'язаних із боротьбою з ожеледицею. Такий підхід дозволяє чітко регламентувати вимоги до матеріалу залежно від сфери його застосування.

Головний показник ефективності протижеледних матеріалів — плавильна здатність. Випробування визначення плавильної здатності перш за все призначені для з'ясування відмінностей між окремими агентами щодо їх початкової швидкості розморожування та подальшого розвитку ефективності розморожування. Цей показник передбачає визначення кількості льоду, який плавиться з часом, використовуючи певну кількість протижеледного реагенту за заданої температури.

Багато випробувань проводили з солями різного за розміром зернового складу. Розмір зерен відіграє важливу роль у швидкості танення, характері нанесення та відповідно ефективності плавлення.

Згідно з дослідженнями, проведеними Шведською транспортною адміністрацією, походження солі не дуже впливає на її плавильну здатність [7]. Проте гранулометричний склад є важливим показником, який впливає на плавильну здатність (рис. 1).

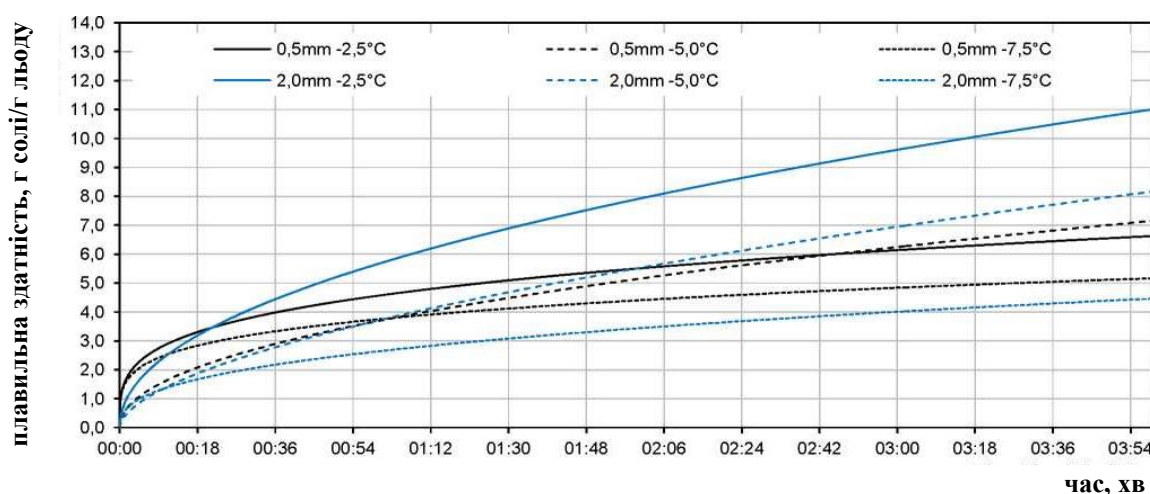


Рисунок 1 — Графіки залежності плавильної здатності від розміру зерен солі за різних температур

Дослідження, проведені в Австрії показали, що більші за розміром зерна проникають глибше в лід і плавлять його. Дрібніші зерна мають велику площу контакту з льодом, тому плавлення льоду відбувається швидше. Зерна дрібного розміру приводять до більш високої ефективності на початку процесу плавлення льоду, але швидше здуваються транспортними потоками. Також завжди є втрата дрібнозернистого матеріалу з кузовів вантажівок під час перевезення солі. Дрібнозерниста сіль швидко тоне та утворює мокру поверхню. Однак волога поверхня може знов заморозитись за низької температури. Найкраще застосування дрібнозернистої солі — оброблення тонких шарів льоду на дорожньому покритті, а також попередня обробка [8, 9].

Кожне окреме зерно утворює довкола себе конус, діаметр якого залежить від діаметра зерна (рис. 2). Дрібні зерна утворюють майже однорідну поверхню, на якій утворюється розсіл. Крупні зерна також спочатку утворюють конус, але з ширшою основою. Крупні зерна проникають глибше в лід. Через невелику кількість крупних зерен на покритті суцільна плівка розсолу не

утворюється. Коли зерно досягає покриття, під льодом утворюється плівка розсолу. Ця плівка розсолу подекуди приводить до відшарування льоду від покриття. Цей ефект можна використовувати спеціально для видалення замерзлого льоду або снігу, що налипає, потім його можна легше прибрати плугом.

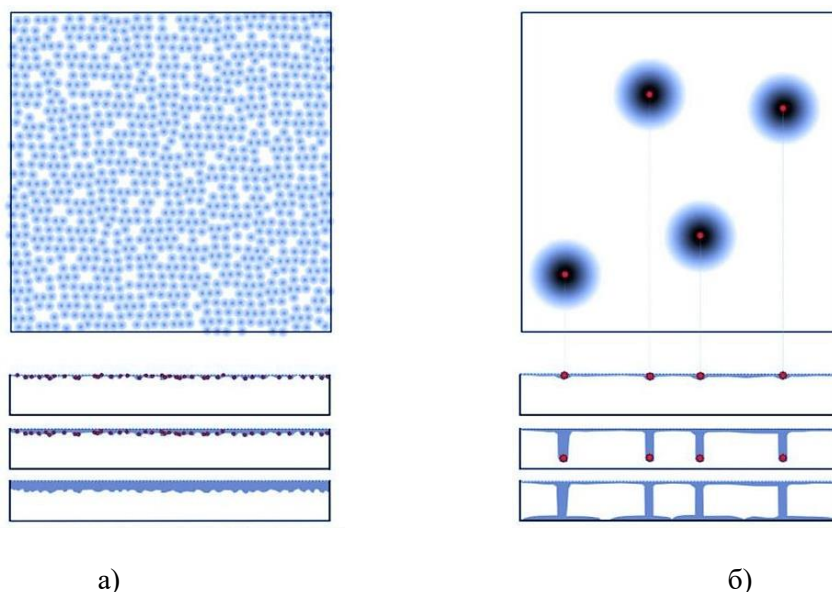


Рисунок 2 — Вигляд в плані та розрізі крижаного покриття під час впливу дрібнозернистої солі (а) і крупнозернистої солі (б)

Науковцями Австрії була створена модель, за допомогою якої можна визначити необхідну кількість нанесення протижелезедного матеріалу, час нанесення залежно від кількості опадів, руху транспорту, температури та типу дорожнього покриття протягом кількох циклів нанесення. Крім того, за допомогою цієї моделі можна оцінити зчеплення з дорогою.

У Віденському технологічному університеті провели дослідження, згідно якого час нанесення протижелезедних матеріалів (ПОМ) становив 1 годину, максимальна кількість солі, що наносять, становить 40 г/м^2 для того, щоб дорога залишалася чорною. За таким сценарієм кількість ПОМ становитиме 400 г/м^2 за 10 годин, що не є економічним.

В умовах економного ставлення до ресурсів стає питання оптимізування розподілу протижелезедних матеріалів по поверхні покриття автомобільної дороги. Експериментально встановлено втрати протижелезедних матеріалів, спричинені знесенням під час процесу розкидання і спричинені знесенням потоком транспорту. Кількість солі, яка залишалася на дорозі через 10 хвилин після процесу посипання, становила приблизно 30 – 50 % від її початкової кількості [10]. Це означає, що кількість снігу, який може бути розплавлений, зменшується вдвічі. Відповідно, у доріг зі значною інтенсивністю руху, використання сухої солі не рекомендується.

Під час вибору солі за крупністю зерен керуються наступними аспектами: доступність матеріалу, чистота матеріалу, простота поводження з матеріалом, простота застосування [9].

Крупні кристали солі (3 – 5 мм) перешкоджають утворенню зв'язку між льодом та покриттям, вони плавлять лід впродовж більш тривалого періоду часу. Але проблема з крупними зернами солі у тому, що вони відлітають до узбіччя під час розкидання. А також крупнозерниста сіль довше розчиняється під час приготування розсолу та утворює більше осаду.

В країнах Європи також поширене використання зволоженої солі. Попередньо змочена сіль краще прилипає до дороги, має меншу витрату і краще розподіляється, ніж суха. Суху сіль змішують з розсолем, вона зволожена потрапляє на розкидальну лопату транспортного засобу, що забезпечує кращий розподіл по дорожньому покриттям.

Якщо сипучість солі низька, перед нанесенням або під час розсипання вологої солі утворюються злиплі грудки, що призведе до її нерівномірного розподілу. Якщо використовувати перезволожену сіль, це може призвести до засмічення транспортних засобів. Щоб забезпечити необхідну сипучість матеріалу, до солі додають речовини, що запобігають злежуванню (наприклад, фероціаніди). Не можна додавати гідрофобні добавки до солей, оскільки вони сповільнюють процес танення. Сіль можна вважати сипучою, якщо вона майже повністю проходить між пальцями, якщо тримати долоню горизонтально, а під час відкриття долоні окремі зерна не злипаються.

Розсіл для зволоження сухої солі зазвичай являє собою розчин солі, виготовлений з води та натрію хлориду з концентрацією 10 – 23 %. Замість натрію хлориду для виготовлення розсолу іноді використовують кальцію хлорид або магнію хлорид, щоб знизити температуру замерзання розсолу або досягти кращих властивостей розтікання.

Можливо використовувати сіль з розсолом у різних співвідношеннях, хоча в Австрії використовують змішування 70 % сухої солі та 30 % розсолу, що зарекомендувало себе на практиці. Відповідно до [11], низькі рівні вологості призводять до великих втрат через роздування солі. Якщо частка розсолу збільшується вище 30 %, це призводить до утворення грудок і погіршення розосередження по поверхні покриття.

Також для боротьби з ожеледицею використовують лише одні розсоли. Переваги використання тільки розсолу — в зменшенні загальної кількості солі, її миттєвому ефекті плавлення та відсутності роздування зерен потоками транспорту. Але у ситуаціях, коли температура покриття нижче мінус 5 °C розсоли застосовувати не рекомендується [9]. Крім того, розчин солі дуже їдкий і може швидше пошкодити обладнання для розкидання солі та його електричні з'єднання.

Якщо кількість снігу, що випав між двома операціями нанесення перевищує кількість снігу, який можна розплавити за допомогою внесеної кількості солі, дорога не може бути очищеною повністю від снігу чи льоду. Після процесу відтавання знову відбувається поступовий процес замерзання, оскільки розсіл розбавляється подальшим снігопадом до такої міри, що температура замерзання стає вищою за температури покриття дороги.

Під час використання протиожеледних матеріалів важливим поняттям є **евтектична точка**. Це найнижча температура, за якої знаходяться в рівновазі дві фази — концентрований розчин та лід. Для розчину NaCl з концентрацією 23 % ця точка становить близько мінус 21 °C. Якщо температура навколишнього середовища становиться нижче евтектичної точки, розчин починає кристалізуватися і льодяна кристалічна структура не дає ефекту плавлення [12]. Нижче цієї точки збільшення концентрації розсолу не приводить до плавлення льоду. Тобто необхідна умова, щоб температура поверхні покриття була вище температури замерзання розчину.



Рисунок 3 — Графік залежності між температурою замерзання та концентрацією розчину натрію хлориду

Подібно до NaCl , CaCl_2 також має евтектичну точку, нижче якої подальше зниження температури замерзання неможливе, і яка набагато нижча за NaCl . Ось чому CaCl_2 в основному використовується при дуже низьких температурах. Евтектична точка розсолу CaCl_2 з концентрацією 30,2 % становить мінус 55 °C. Евтектична точка розсолу MgCl_2 з концентрацією 21,4 % становить мінус 33 °C.

Експериментальні дані вимірювання температури на поверхні льоду [13] дають можливість корегувати застосування і розхід різних типів реагентів залежно від економічних, технічних і погодних умов на дорогах.

У Австрії науковці проводили дослідження, в яких визначали оптимальний ступінь зволоження солі залежно від температури поверхні покриття, визначали зв'язок між концентрацією розсолу та температурою його замерзання. Розсін розводили до моменту його замерзання. У результаті досліджень було встановлено, що оптимальна витрата зволоженої солі складає 5 – 40 г/м², при цьому сіль зволожували розсолом з концентрацією 10 – 23 %.

У різних країнах існує тенденція до застосування сухого розсіювання солі у регіонах з більш вологим кліматом, а вологе розсіювання солі використовують у сухих регіонах.

Профілактичне нанесення протижеледних матеріалів застосовують безпосередньо перед випадінням опадів. Це слугує запобіганню слизькості на дорозі (утворенню інію). За допомогою профілактичного нанесення протижеледних матеріалів якомога ближче до початку утворення інію (приблизно 5 – 10 г/м² за 1 годину до випадіння опадів) можна уникнути слизькості на дорогах. Під час інію водяна пара в повітрі осідає на холодному покритті дороги у вигляді льоду. Зазвичай іній з'являється рано вранці. У ряді випадків як фрикційний протижеледний матеріал застосовується пісок. Його перевага полягає в негайному підвищенні зчеплення коліс з дорожнім покриттям після нанесення, зокрема навіть на ущільнених снігових покриттях. Це відбувається завдяки вдавлюванню піщинок у сніг або лід під дією транспортних засобів. На відміну від кристалів солі, яким потрібен час для початку дії (від 5 хвилин до 60 хвилин), пісок діє миттєво. Водночас він легко видається з проїзної частини колесами автомобілів. Якщо дорожня сіль змивається дощем або талими водами, то пісок, що розсипається, залишається на узбіччях і вимагає механізованого прибирання. З огляду на це, застосування піску доцільне в окремих локальних зонах, зокрема на підйомах, у період інтенсивних снігопадів тощо. Однак профілактичне нанесення напередодні ввечері неефективне через втрати, спричинені знесенням солі транспортом.

Якщо під час або після нанесення протижеледного матеріалу випадає новий сніг, то кількість цього снігу може бути більше кількості, яку може розплавити протижеледний матеріал, в такому випадку може утворитися сльота, яка згодом знову може замерзнути. Тоді за наявності замерзлої сльоти зчеплення стає гіршим, ніж з чистим снігом. Замерзлу сльоту важче побачити водіям, тому її потрібно вчасно видаляти з покриття.

В даний час у європейських країнах більше уваги приділяється превентивним заходам запобігання утворенню льоду на покритті автомобільних доріг шляхом механічного прибирання снігу. Оскільки розчищений сніг не потрібно плавити, то хороша організація схеми розчищення має важливе економічне значення.

Також в різних країнах світу вдосконалюють моделі датчиків для прогнозування погоди та температури на поверхнях покриттів доріг.

Висновки

Завданням зимового утримання автомобільних доріг є забезпечення високого рівня безпеки. Для цього науковці продовжують вивчати і досліджувати характеристики протижеледних матеріалів для більш ефективного їх використання.

Встановлено, що завдяки кращому розподілу по площі дорожнього покриття, дрібнозерниста сіль забезпечує швидший та рівномірніший протижеледний ефект. Натомість крупнозерниста сіль є більш ефективною для видалення снігу, що налип або льоду. Потрапляючи в товщу льоду, великі

кристали солі демонструють вищу ефективність плавлення порівняно з дрібними. Крім того, крупні зерна мають більшу масу, що зменшує їх знесення вітром, однак під час механічного розподілу вони можуть відскакувати на узбіччя чи прилеглі ділянки ґрунту. Під час застосування вологої солі досягається кращий розподіл по поверхні та зменшується загальна витрата реагенту порівняно із сухою сіллю. Водночас температура кристалізації розсолу повинна залишатися істотно нижчою за температуру поверхні покриття. Ефективним заходом є профілактичне оброблення покриття, яке передбачає нанесення протижеледних матеріалів з метою запобігання утворенню інію. Проте, таке оброблення може втратити ефективність у випадку інтенсивного транспортного руху, що спричиняє знесення реагенту з поверхні. Після розтавання снігу внаслідок дії протижеледних засобів, необхідно своєчасно видаляти снігову сльоту, щоб запобігти її повторному замерзанню. Оскільки самі реагенти не здатні швидко ліквідувати значні снігові чи крижані утворення доцільно застосовувати механічне прибирання снігу.

З метою підвищення ефективності зимового утримання автомобільних доріг доцільно враховувати як міжнародний досвід, так і практику застосування протижеледних матеріалів в умовах України. Це дозволить науково обґрунтувати та встановити оптимальні норми витрат матеріалів, що забезпечать баланс між безпекою дорожнього руху, економічною доцільністю та мінімізацією впливу на навколишнє середовище.

Список літератури

1. Харитонova Н. М. Ярошук О. С. Альтернативні протижеледні матеріали для боротьби з утворенням та ліквідації зимової слизькості на автомобільних дорогах. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 30. С. 416–423. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.416>.
2. Касків В. І., Півторацький Д. С., Бідненко Н. А., Дубова О. А. Узагальнення міжнародного досвіду в боротьбі із зимовою слизькістю. *Дороги і мости*. Київ, 2021. Вип. 23. С. 225–236. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.225>.
3. ДСТУ EN 16811-1:2022 (EN 16811-1:2016, IDT) Обладнання та вироби для зимового обслуговування. Засоби проти обледеніння. Частина 1. Хлорид натрію. Вимоги та методи випробувань. Київ. 2022 р. 56 с. (Інформація та документація).
4. ДСТУ EN 16811-2:2022 (EN 16811-2:2016, IDT) Обладнання та вироби для зимового обслуговування. Засоби проти обледеніння. Частина 2. Хлорид кальцію та хлорид магнію. Вимоги та методи випробувань Київ. 2022 р. 54 с. (Інформація та документація).
5. ДСТУ EN 16811-3:2022 (EN 16811-3:2015, IDT) Обладнання та вироби для зимового обслуговування. Засоби проти обледеніння. Частина 3. Інші тверді та рідкі засоби проти обледеніння. Вимоги та методи випробувань. Київ. 2022. 47 с. (Інформація та документація).
6. ASTM D632-12 Standard Specification for Sodium Chloride. in D 632, ed. USA: American Society for Testing and Materials (ASTM), 2012.
7. Ketcham S., Minsk L. D., Blackburn R. R., Fleege E. J. Manual of practice for an effective anti-icing program: a guide for highway winter maintenance personnel. United States. Federal Highway Administration, 1996.
8. Hoffmann M., Blab R., Nutz P. Forschungsbericht Optimierung der Feuchtsalzstreuung. TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften, 2011.
9. Leila Hashemian, Neeraj Saroj, Babak Mehran, Alireza Bayat. Salt Gradation Analysis for Winter Road Maintenance. *Civil Engineering Journal*, 2020, Vol 6, No 9.
10. Hausmann G. Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn. Forschungsbericht Kommzept Ingenieurbüro Hausmann, Bannewitz, 2009.
11. Badelt H. Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST, Bergisch Gladbach, 2007.
12. Durth W., Hanke H. Handbuch Straßenwinterdienst. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2004.

13. Гамеляк І. П., Дмитрієв М. М., Попелиш І. І., Корітчук С. О., Семенченко О. В. Ефективність застосування антиожедних хімреагентів при зимовому утриманні автомобільних доріг та аеродромів. *Вісник НТУ*. Вип. 1 (46), 2020. С. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-063-072>.

References

1. Kharytonova N. M., Yaroshchuk O. S. Alternatyvni protyozheledni materialy dlia borotby z utvorenniam ta likvidatsii zymovoi slyzkosti na avtomobilnykh dorohakh (Alternative anti-icing materials for combating the formation and elimination of winter slipperiness on highways.). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Vyp. 30. P. 416–423. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.416> [in Ukrainian].
2. Kaskiv V. I., Pivtoratskyi D. S., Bidnenko N. A., Dubova O. A., Uzahalnennia mizhnarodnoho dosvidu v borotbi iz zymovoiu slyzkistiu (Generalization of international experience in combating winter slipperiness). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2021. Vyp. 23. P. 225–236. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.225> [in Ukrainian].
3. DSTU EN 16811-1:2022 (EN 16811-1:2016, IDT) Obladnannia ta vyroby dlia zymovoho obsluhovuvannia. Zasoby proty obledeninnia. Chastyna 1. Khloryd natriiu. Vymohy ta metody vyprobuvan (Equipment and products for winter maintenance. Anti-icing agents. Part 1: Sodium chloride. Requirements and test methods). Kyiv. 2022. 56 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
4. DSTU EN 16811-2:2022 (EN 16811-2:2016, IDT) Obladnannia ta vyroby dlia zymovoho obsluhovuvannia. Zasoby proty obledeninnia. Chastyna 2. Khloryd kaltsiiu ta khloryd mahniiu. Vymohy ta metody vyprobuvan (Equipment and products for winter maintenance. Anti-icing agents. Part 2. Calcium chloride and magnesium chloride. Requirements and test methods) Kyiv. 2022. 54 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
5. DSTU EN 16811-3:2022 (EN 16811-3:2015, IDT) Obladnannia ta vyroby dlia zymovoho obsluhovuvannia. Zasoby proty obledeninnia. Chastyna 3. Inshi tverdi ta ridki zasoby proty obledeninnia. Vymohy ta metody vyprobuvan (Equipment and products for winter maintenance. Anti-icing agents. Part 3. Other solid and liquid de-icing agents. Requirements and test methods). Kyiv. 2022. 47 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
6. ASTM D632-12 Standard Specification for Sodium Chloride. in D 632, ed. USA: American Society for Testing and Materials (ASTM), 2012 [in English].
7. Ketcham S., Minsk L. D., Blackburn R. R., Fleege E. J. Manual of practice for an effective anti-icing program: a guide for highway winter maintenance personnel. United States. Federal Highway Administration, 1996 [in English].
8. Hoffmann M., Blab R., Nutz P. Forschungsbericht Optimierung der Feuchtsalzstreuung. TU Wien - Institut für Verkehrswissenschaften, 2011 [in English].
9. Leila Hashemian, Neeraj Saroj, Babak Mehran, Alireza Bayat. Salt Gradation Analysis for Winter Road Maintenance. *Civil Engineering Journal*, 2020, Vol 6, No 9 [in English].
10. Hausmann G. Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn. Forschungsbericht Kommzept Ingenieurbüro Hausmann, Bannewitz, 2009 [in English].
11. Badelt H. Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST, Bergisch Gladbach, 2007 [in English].
12. Durth W., Hanke H. Handbuch Straßenwinterdienst. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2004 [in English].
13. Hameliak I. P., Dmytriiev M. M., Popelysh I. I., Koritchuk S. O., Semenchenko O. V. Efektyvnist zastosuvannia antyozhelednykh khimreagentiv pry zymovomu utrymanni avtomobilnykh dorih ta aerodromiv (Efficiency of application of anti-icing chemicals in winter maintenance of roads and airfields). *Visnyk NTU*. Vyp. 1 (46), 2020. P. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-063-072> [in Ukrainian].

Nataliia Kharytonova, <https://orcid.org/0000-0001-5732-3407>

Lesya Yaroshchuk, <https://orcid.org/0000-0003-1550-0131>

State Enterprise “National Institute for Development Infrastructure” (SE “NIDI”), Kyiv, Ukraine

**STUDY OF THE PROPERTIES OF DE-ICING MATERIALS
IN DIFFERENT COUNTRIES OF THE WORLD FOR EFFECTIVE USE DURING WINTER
MAINTENANCE OF HIGHWAYS**

Abstract

Introduction. One of the key factors ensuring road safety in winter is adequate tire grip. Consequently, the quality requirements for winter road maintenance are increasing, particularly regarding the efficient reduction of surface slipperiness. Different countries apply various approaches to the use of de-icing materials, influenced by climatic conditions, pavement types, traffic flows intensity, environmental concerns, and economic factors. Both the physicochemical properties of materials and the optimization of their composition and dosage according to specific operational conditions play a significant role.

Problem statement. With the start of the full-scale Russian invasion, the Artemsil plant — Ukraine’s main supplier of road salt for winter maintenance — was destroyed. This urgent situation has compelled specialists to seek alternative de-icing materials to ensure road safety in winter. Research is ongoing into the properties of materials imported from various countries, each with different origins and characteristics. Particular attention is being given to improving their efficiency and refining consumption standards based on actual climatic and operational conditions.

Objective. To analyze and take into account international experience and best practices in the use of de-icing materials for winter road maintenance.

Materials and Methods. An analysis of existing international practices in the handling of de-icing materials will enable their adaptation and implementation in Ukraine.

Results. The article presents research conducted in various countries regarding the use and management of de-icing materials.

Conclusions. In the current context, it is crucial to optimize Ukraine’s de-icing material management system. This includes implementing modern methods and strategies aimed at increasing the efficiency of winter road maintenance. It is essential to develop standardized laboratory testing procedures and evaluation methods to assess the effectiveness of different types of de-icing agents under real (field) operating conditions. Such an approach will allow for informed selection of materials based on both their technical characteristics and economic feasibility.

Keywords: highway, road pavement, winter slipperiness, winter maintenance, de-icing materials.