

УДК 69.059.4:625.84

МОРОЗНО-СОЛЬОВИЙ ВПЛИВ НА ЦЕМЕНТОБЕТОН

Канд. техн. наук Г. В. Бражник

FROST-SALT INFLUENCE ON CEMENT CONCRETE

PhD (Tech.) H. Brazhnyk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336346>



Анотація. У статті розглянуто гіпотези морозного руйнування бетонів в умовах змінного замерзання та відтавання. Показано, що з морозно-сольовим впливом середовища NaCl солі відкладаються в порах і дефектах структури бетону. Експериментально доведено, що кристалізація солей призводить спочатку до ущільнення рівнів структури бетону, а потім, з наростанням тиску солі, що кристалізується, - до швидкої втрати міцності і поступового руйнування бетону.

Ключові слова: цементобетон, морозостійкість, морозно-сольова дія, розчини солей, міцність.

Abstract. The article explores hypotheses concerning frost-induced damage in concrete under alternating freezing and thawing conditions, and examines methods for improving the frost resistance of road cement concretes. It is shown that the primary causes of frost damage in road concrete include the freezing of water in pores and capillaries, loosening of the surface layer, subsequent abrasion, and early layer-by-layer structural destruction that penetrates deeper into the concrete mass. When a pore or capillary is filled with water, ice formation generates stress in the microvolume of cement concrete due to pressure from growing ice crystals on the pore walls. This pressure is initially transmitted to the remaining liquid phase, which does not freeze at -18°C , as the crystallization of pure ice enriches the remaining liquid with alkalis or salts. Consequently, the impact of temperature cycling is exacerbated by additional effects from salt solutions. The article presents research on the influence of concrete composition incorporating the plasticizer «FM 21» and varying levels of entrained air on the density, strength, and frost resistance of cement concretes. It is demonstrated that under freeze-salt exposure with NaCl, salts are deposited in the pores and defects of the concrete structure. Experiments confirm that salt crystallization initially leads to densification of structural layers, followed by a rapid loss of strength and gradual concrete degradation as crystallization pressure increases. Thus, the study concludes that frost damage to road concretes during operation results from a combined effect of hydraulic pressure from water and crystallization pressure from ice and salts. It is proposed that frost resistance can be enhanced by increasing the density of concrete's

structure at all levels. Existing concrete mix design techniques can achieve such density by reducing the water-to-cement (W/C) ratio through the use of modern superplasticizers, decreasing cement paste porosity via powdered microstructure modifiers, and lowering capillary porosity by using cements with active mineral additives.

Keywords: cement concrete, frost resistance, frost-salt action, salt solutions, strength.

Однією з основних причин руйнування бетону є багаторазове його змінне замерзання та відтавання в насиченому водою стані. Це пояснюють збільшенням обсягу льоду в порах бетону на 9-10 %, внаслідок чого створюється тиск води на стінки пор, і в бетоні виникають значні внутрішні напруження.

Вивченням причин руйнування бетонів і проблем довговічності займалися В. І. Бабушкін, Г. І. Горчаков, В. С. Гладков, І. М. Грушко, Є. А. Гузєєв, Л. М. Добшиц, Г. Г. Добролюбов, П. Г. Комохів, І. М. Красний, Б. О. Крилов, А. В. Лагойда, С. А. Миронов, В. М. Москвін, М. А. Мощанський, А. М. Плугін, О. С. Попова, В. Б. Ратінов, В. П. Сизов, Н. М. Свіриденко, В. І. Соломатов, В. П. Сопов, В. Ф. Степанова, С. М. Толмачов, В. В. Стольников, О. В. Ушеров-Маршак, А. Є. Шейкін, С. В. Шестоперов, А. Г. Шлаєн, А. М. Шейнін та багато інших учених.

Ними встановлені основні фактори, що впливають на морозо- та морозосолестійкість бетонів, основними з яких є величина водоцементного співвідношення, тонкість помелу, мінеральний склад і ступінь гідратації цементу, вид заповнювачів, умови твердіння, склад, щільність і вік бетону, показники пористості бетону та інші. Ступінь морозного впливу в цілому визначений фазовими переходами вологи в бетоні та його капілярно-пористою структурою. Показано, що основними причинами морозного руйнування бетону покриття є замерзання води в порах і капілярах, розпушення поверхневого шару бетону, подальше його стирання та наступне поширене руйнування структури, яке поширюється в глибину масиву бетону.

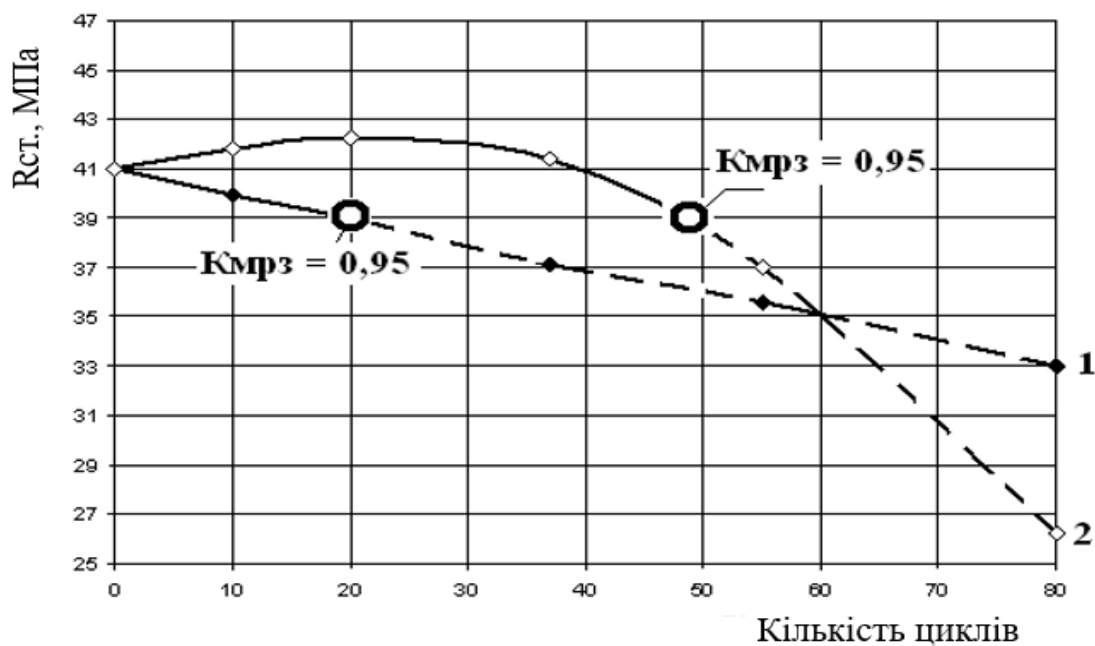
З заповненням пори або капіляра водою утворення льоду буде супроводжуватися виникненням напруженого стану в мікрообсязі цементного бетону через тиск зростаючих кристалів льоду на стінки пор. Тиск зростаючих кристалів льоду насамперед передається на рідку фазу, що залишилася не замерзлою за температури -18°C , оскільки з випаданням прісних кристалів льоду рідка фаза, що залишилася, збагачується лугами або солями. Тому вплив циклічної зміни температури посилений додатковим впливом розчинів солей.

Оскільки стала поширеною практика застосування солей (NaCl , CaCl_2) для видалення льоду з дорожніх покриттів, дифузія солі в бетон призводить до виникнення градієнта її концентрації, що також викликає підвищену напругу, лущення та відшаровування поверхневого шару. За присутності солей збільшуються осмотичні явища в бетоні, що замерзає, підвищується в'язкість рідкої фази. У результаті зростає величина гідравлічного тиску, що прискорює руйнування бетону (відомо, що з замерзанням води за температури -5°C створюється тиск близько 5000 МПа. Так само за будь-якої температури замерзання є частина води, що випаровується, розташована в порах цементного каменю. У разі застосування 5 % розчину NaCl утворюються кристали солі, зростання яких можливе з подальшим заморожуванням. Це і може пояснювати зростання міцності бетону до певної кількості циклів замерзання та відтавання, поки зростання кристалів солі не створюватиме додатковий тиск на стінки пор і капілярів, що призведе до локального руйнування бетону.

Для перевірки висловленого припущення досліджено морозостійкість бетону у воді та в розчині 5 % NaCl, за ДСТУ Б В.2.7-47. Склад бетону підбраний за принципом забезпечення найбільшої щільності для цих матеріалів: цемент – 380 кг/м³, пісок – 560 кг/м³, щебінь фракції 5-10 – 536 кг/м³, щебінь фракції 10-20 – 804 кг/м³, добавка FM-21 – 6 л/м³. Рухливість бетонної суміші – Р1. У дослідженнях використали цемент ПЦ II/A-III М400, пісок кварцовий Вознесенського кар'єру з Мкр = 2,4, щебінь гранітний – «Кіровоградграніт» фракцій 5-10 і 10-20 мм. До складу бетонної суміші вводили суперпластифікатор FM-21 виробництва Німеччини.

Дослідження морозостійкості (рис. 1) показало, що у зразків бетону, які заморожували за температури -50 °С і розморожували за температури +18 °С у розчині 5 % NaCl, до 37 циклів випробувань на морозостійкість за прискореною методикою значних змін у міцності не спостерігали. Подальше же заморожування та розморожування – призвело до різкого зниження міцності та руйнування зразків.

У зразків бетону, що досліджували у воді протягом усього експерименту, спостерігали поступове зниження міцності, видимі зовнішні руйнування виявили лише після 50 циклів замерзання та відтавання.



1 – зразки бетону, що випробували в воді

2 – зразки бетону, що випробували в 5% розчині NaCl

Рис. 1. Залежність міцності бетону від кількості циклів замерзання та відтавання в різних середовищах

Зниження міцності бетонів за морозно-сольового впливу для прийнятого методу випробування починається після 37 циклів і відбувається досить інтенсивно, що опосередковано підтверджує

припущення про накладання кристалізаційного тиску солей у порах бетону на тиск льоду та води на стінки пор.

Проведені нами дослідження показали, що за морозно-сольового впливу,

крім описаних явищ, має місце кристалізація солей у порах і капілярах цементного каменю та розчину. Якщо льодоутворення можливе відносно у великих порах і капілярах, то солі можуть кристалізуватися в порожнинах практично будь-яких розмірів. З кристалізацією солей на якомусь початковому етапі кристали сприятимуть «заростанню» пор і капілярів, тобто ущільненню мікроструктури, що призведе до підвищення міцності бетону взагалі, як зазначають багато дослідників.

Тобто після певної кількості циклів замерзання-відтавання відбувається зміцнення бетону, яке можна пояснити кристалізацією солей у порах і дефектах структури, а також гідратацією цементу, що триває, за топохімічною схемою в результаті гідравлічного тиску води. Наведене вище підтверджують дані оптичної мікроскопії. На зрізах бетону, зроблених до початку випробувань на морозостійкість, видно його структуру, що включає пори, а також дрібний і крупний заповнювач (рис. 2).

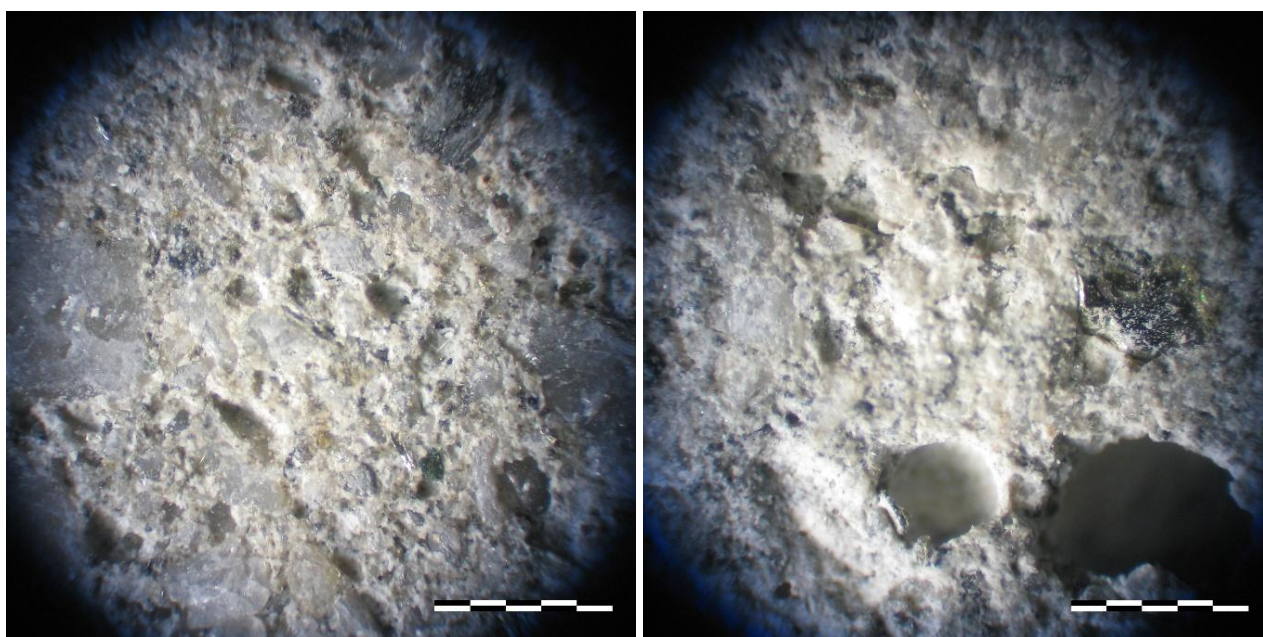


Рис. 2. Зріз зразка бетону до початку випробування (збільшення 32^x)

Після 37 циклів випробування бетону за прискореною методикою (заморожування за температури -50°C у розчині 5 % NaCl, розморожування – у тому самому розчині за температури $+18^{\circ}\text{C}$) на зрізах бетону, збільшених у 32 рази, стають видні блискучі кристали солі, які рівномірно розташовані по всій поверхні зрізу. Ці кристали відкладаються насамперед у різних порожнинах і дефектах структури (рис. 3, 4). На фотографії збільшення в 100 разів

наведені пори з сіллю, що кристалізуються, і кристал NaCl, що росте на стінці пори.

На зразках, випробовуваних на морозостійкість у воді, відкладення кристалів солі немає (рис. 5). Це підтверджує висловлене вище припущення про заростання пор з кристалізацією на стінках солі з водного розчину. І в цьому випадку руйнація бетону відбувається через тиск зростаючих кристалів льоду на стінки пор, що виникає за від'ємних температур.

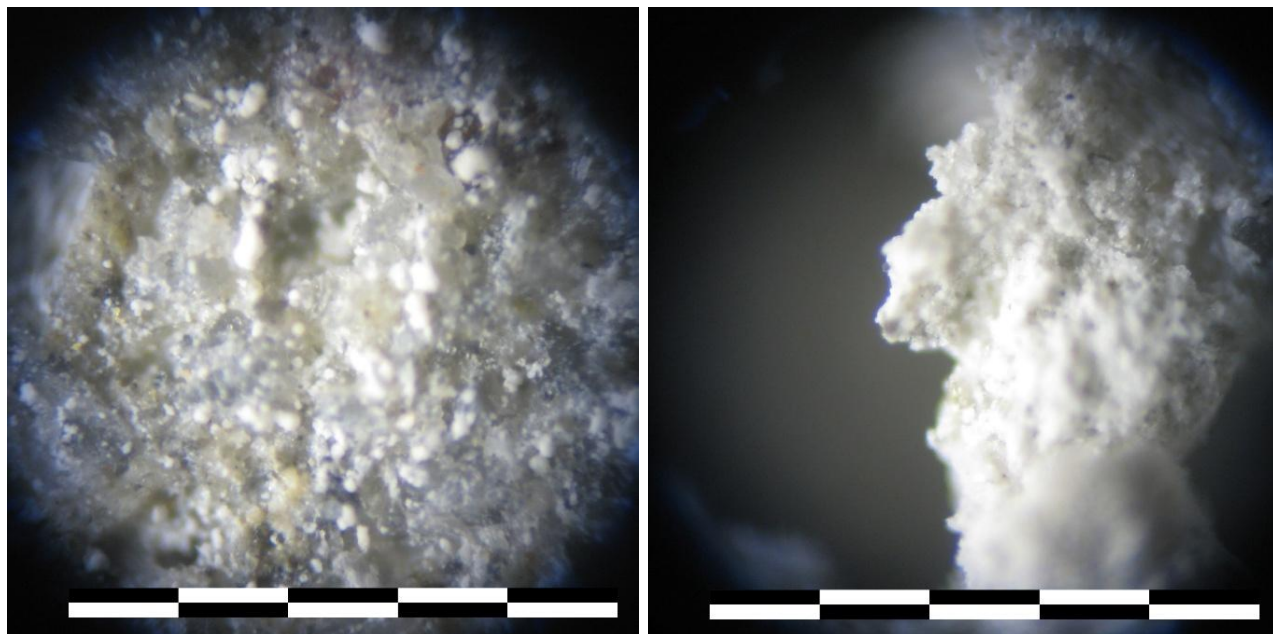


Рис. 3. Зріз зразка бетону після 37 циклів замерзання та відтавання в розчині 5 % NaCl (збільшення 100^x)

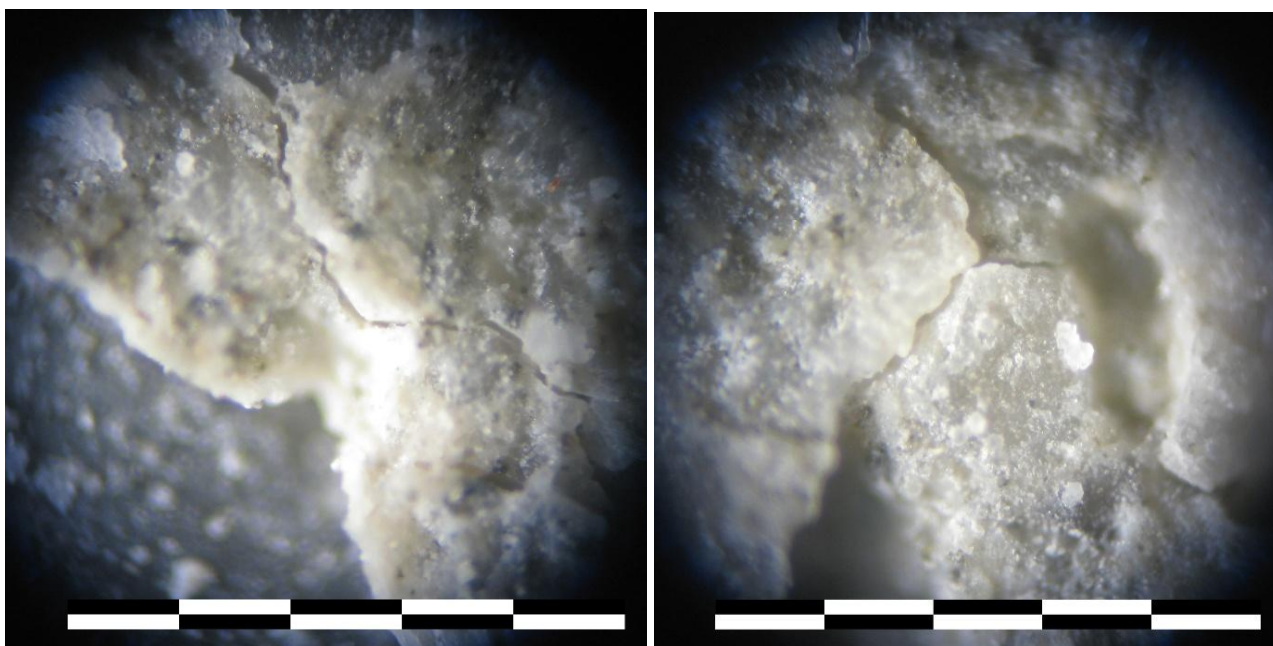


Рис. 4. Зріз зразка після 50 циклів замерзання та відтавання в розчині 5 % NaCl (збільшення 100^x)

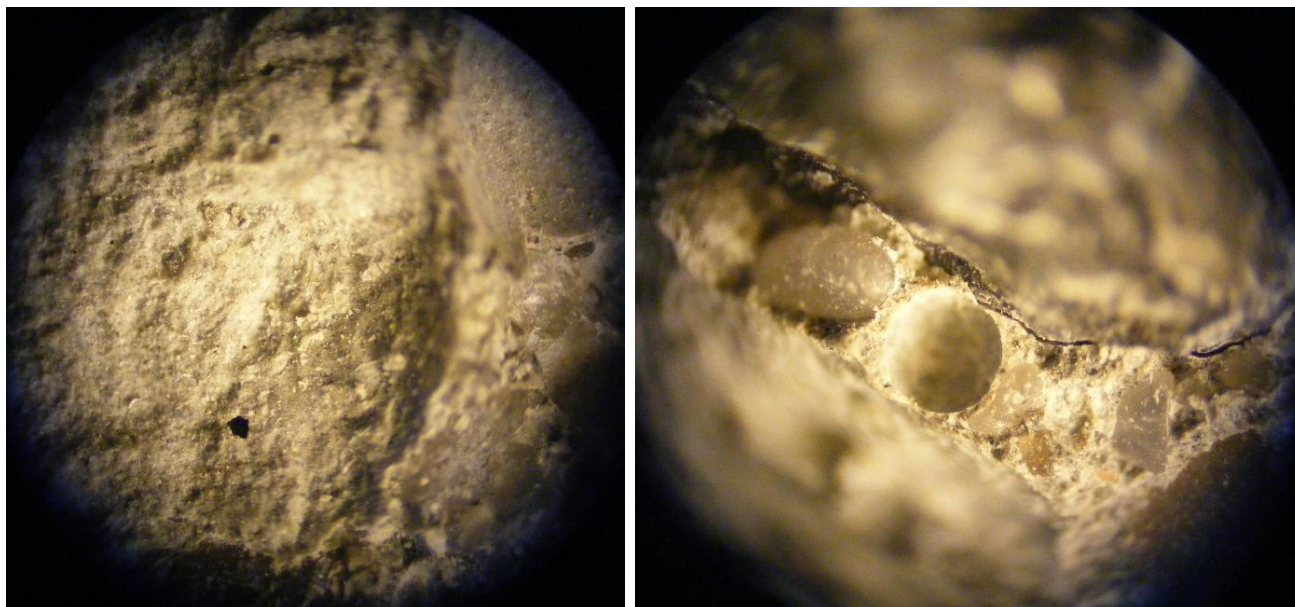


Рис. 5. Зріз зразка бетону після 50 циклів замерзання та відтавання у воді (збільшення $32\times$ і $100\times$)

Отже, можна зробити висновок, що причиною морозного руйнування дорожніх бетонів у період експлуатації є комплекс впливів, викликаний впливом гідравлічного тиску води та кристалізаційних тисків льоду і солей. У цьому випадку логічним буде припущення, що підвищення морозостійкості можна досягти шляхом підвищення густини структури бетону на всіх її рівнях [1, 2], ураховуючи, що з підвищенням щільності бетонів зменшується в першу чергу відкрита пористість бетонів, яка негативно впливає на морозостійкість. Відомі методи підбору складів бетону дають змогу забезпечити таку високу щільність за рахунок зменшення В/Ц шляхом застосування сучасних гіперпластифікаторів, зменшення пористості цементного каменю за рахунок введення порошкоподібних модифікаторів мікроструктури, зниження величини пористості капілярної з використанням цементів з активними мінеральними добавками і т. п.

Висновки. Існує кілька різних гіпотез морозного руйнування бетонів в умовах змінного замерзання-відтавання, за якими руйнування починається в порах і дефектах структури, заповнених водою, і є результатом тиску води або льоду на стінки пор.

Встановлено, що для дорожніх бетонів механізм руйнування може відрізнитися від вищезгаданого через те, що вони зазнають морозно-сольового впливу серед NaCl. При цьому солі, відкладаючись у порах, можуть мати додатковий кристалізаційний вплив на стінки пор.

Експериментально доведено, що кристалізація солей у порах та інших дефектах структури призводить спочатку до ущільнення рівнів структури бетону та зміцнення бетону, а потім, з наростанням тиску солі, що кристалізується, – до швидкої втрати міцності та поступового руйнування бетону.

Список використаних джерел

1. Морозостійкі дорожні бетони з оптимізованим повітроутягненням / С. М. Толмачов, І. Г. Кондратьєва, О. А. Беліченко, Г. В. Матяш. *Будівельні конструкції: матеріали VII науково-технічного семінару «Структура, властивості та склад бетону» «Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості»*. Київ: НДІБК, 2009. Вип. 72. С. 553–560.
2. Взаимосвязь воздухоудержания бетонной смеси и морозостойкости бетона / А. В. Матяш, С. Н. Толмачев, И. Г. Кондратьева, А. Ю. Вялых. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, 2010. № 57. С. 195-202.

Бражник Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів ім. М. І. Волкова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0009-0004-6630-1209. Тел.: +38(050)90-98-190. E-mail: anna.matyash@ukr.net.

Brazhnyk Hanna, PhD (Tech.), Senior Lecturer, Department of Technology of Road Construction Materials named after M. I. Volkov, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID ID: 0009-0004-6630-1209. Tel.: +38(050)90-98-190. E-mail: anna.matyash@ukr.net.

Статтю прийнято 18.06.2025 р.