

Обґрунтування методики оперативного дослідження експлуатаційної надійності кислотостійких бетонів при дії кліматичних циклів “заморожування – відтавання” ультразвуковим імпульсним методом

Я.О. Серіков

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна
s0509088828@gmail.com

Анотація

Визначення експлуатаційної надійності, довговічності будівельних об'єктів є одним із важливих завдань у будівництві. Одним із найменш вивчених аспектів для бетону є сумісний вплив на його міцність, експлуатаційну надійність циклічних кліматичних навантажень із заморожування та відтавання, особливо в тому разі, якщо такі навантаження супроводжуються зволоженням із наступним заморожуванням бетону. Особливо важливим є вирішення цього завдання для кислотостійких бетонів, які широко використовують у різних галузях для спорудження площадок, на яких розвантажують, розподіляють чи використовують агресивні матеріали та рідини – кислоти, луґи тощо. Клас бетонів за морозостійкістю визначають на етапі їх виготовлення із застосуванням регламентованих руйнівних методів. Такі методи передбачають випробування спеціально виготовлених зразків бетону для визначення їх міцності пресовим навантаженням після серії циклів “заморожування – відтавання”, які проводять у морозильній камері. Необхідність визначення міцності кислотостійких бетонів у процесі експлуатації будівельного об'єкта обумовлюється тим, що його насичення в реальних умовах відбувається не тільки водою, а й розчином агресивного середовища, що може активізувати зниження його міцності, а отже – зниження експлуатаційної надійності. Наведені результати проведених експериментів свідчать про реальну можливість визначення міцності кислотостійких бетонів у процесі експлуатації із застосуванням ультразвукового імпульсного методу.

Ключові слова: кислотостійкі бетони; морозостійкість; експлуатація; випробування; ультразвуковий імпульсний метод.

Отримано: 05.09.2023

Відредаговано: 25.09.2023

Схвалено до друку: 29.09.2023

Вступ

Кислотостійкі бетони широко застосовують у будівництві, а також при ремонті та реконструкції промислових об'єктів у разі необхідності захисту визначених конструкційних елементів від дії агресивних середовищ. Значне поширення одержало використання кислотостійких бетонів при будівництві площадок для перекачування кислот та лугів із залізничних цистерн, площадок навколо наливних споруд, фундаментів під насоси тощо. Визначним є те, що найчастіше такі будівельні об'єкти експлуатують на відкритому повітрі. У цьому разі застосовуване покриття кислотостійким бетоном, на додаток до впливу агресивних середовищ, піддається й негативному впливу таких кліматичних змін, як циклічна дія низьких і високих температур навколишнього повітря в сукупності зі зволоженням, тобто підлягає періодичному заморожуванню й відта-

ванню. При цьому зволоження відбувається не тільки атмосферними опадами, а й агресивним розчином. За таких умов експлуатації важливою характеристикою кислотостійких бетонів є їхня морозостійкість, що значною мірою визначає їхню надійність в експлуатації й життєвий термін. Сутність дії досліджуваного кліматичного фактора на міцність бетону полягає в наступному. В осінню пору року бетон насичується атмосферною вологою (водою) на визначену глибину від його поверхні. Надалі, при переході температури зовнішнього повітря в область від'ємних значень, відбувається замерзання води, яка міститься в порах бетону. Цей процес супроводжується збільшенням її об'єму. Тобто в результаті формується багаторазовий вплив кристалізаційного тиску льоду на бетон (утворюється періодичне внутрішнє розтягальне навантаження). Внаслідок цього виникає порушення структури бетону, причому на першому

етапі – його поверхневого шару, а надалі й на більшій глибині. Тобто відбувається зниження основних характеристик бетону – міцності й довговічності, його експлуатаційної надійності. При цьому слід зазначити, що одним із найменш вивчених процесів для бетону будівельних об'єктів, особливо кислотостійкого, є сумісний вплив на їхню міцність та експлуатаційну надійність циклічної дії високих і низьких температур навколишнього повітря при одночасному його зволоженні. Необхідність вирішення поставленого завдання поглиблюється тим, що насичення кислотостійких бетонів відбувається, як правило, агресивним розчином, а не атмосферою вологою.

Постановка проблеми

Як критерій морозостійкості бетону прийнято кількість циклів “заморожування – відтавання” без визначеної втрати його міцності [1, 2]. Відповідно до положень державного стандарту дослідження бетону на морозостійкість виконують двома базовими та двома прискореними методами [3]. Незалежно від методу випробування бетону проводять у лабораторних умовах із використанням серії зразків встановленої форми й розмірів. Зразки виготовляють за технологією, що є аналогічною при виготовленні промислового бетону. З готової серії зразків визначену кількість використовують як контрольні для визначення початкової міцності бетону на стиск (R_{ct}) пресовим навантаженням, тобто руйнівним методом. Інші зразки бетону в процесі дослідження насичують водою з наступним заморожуванням у морозильній камері, тобто піддають впливу ряду циклів “заморожування – відтавання”. Після визначеної кількості циклів із серії цих зразків відбирають встановлену їх кількість для виявлення втрати міцності бетону $R_{ct,i}$ пресовим методом. Такі циклічні дослідження проводять до того моменту, коли зменшення міцності бетону на стиск, у порівнянні з середньою R_{ct} контрольних зразків, досягає величини, визначеної в ДСТУ Б В.2.7-47-96 [3]. Виходячи з кількості витриманих бетоном циклів “заморожування – відтавання”, з урахуванням типу бетону та його призначення, встановлюють марку бетону за морозостійкістю (F).

Умови, в яких експлуатується кислотостійкий бетон, можуть відрізнятися від лабораторних. Це визначається в основному тим, що хімічний склад речовин, які можуть його насичувати, характеризується агресивністю до його структури, а отже й міцності – R_{ct} . У наш час відбуваються реальні кліматичні зміни, на додаток до цього може змінюватися й активність дії. Це визначає необхідність періодичного оперативного контролю міцності бетону (R_{ct}), особливо стосовно відповідальних будівельних конструкцій. Забезпечити такий вид контролю регламенто-

ваним методом неможливо. З викладеного вище формується актуальність завдання розробки методу оперативного дослідження експлуатаційної надійності кислотостійких бетонів при дії кліматичних циклів “заморожування – відтавання”.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наразі у розвитку вирішення аналізованого завдання розроблено методу, в якій оцінку морозостійкості бетону визначають на основі інформації про кінетику дифузії вологи й утворення льоду в порах бетону при дії циклів “заморожування – відтавання”. Таку інформацію одержують на основі вимірювань кондуктометричним методом [4]. Показано, що використання цього методу дозволяє встановити швидкість дифузії води та фронту утворення льоду, а також глибину промерзання зразків бетону, відповідну цим параметрам. За опублікованими даними такі дослідження дозволяють отримати більш надійні результати відносно стану бетону при циклах “заморожування – відтавання”, ніж при застосуванні регламентованих методів [3]. Основним недоліком такої методики є неможливість оперативного визначення характеристик бетону на натурних експлуатованих об'єктах.

Наведено також результати дослідження механізму дії процесу “заморожування – відтавання” на фізико-механічні характеристики гумобетону з застосуванням тензометричного методу [5]. У цьому разі для вивчення зміни характеристик бетону в процесі випробувань на морозостійкість реалізовано два варіанти вимірювань: 1 – при наклеюванні тензорезисторів на поверхню бетону; 2 – при вбудовуванні тензорезисторів у зразки бетону на етапі їх виготовлення. В цьому методі використовувалась залежність “деформація бетону – зміна опору тензорезистора”, що відображає зміну поверхневої й внутрішньої структури бетону, а отже і його основної характеристики – R_{ct} . У контексті поставленого завдання до недоліків такого методу досліджень відноситься порівняна складність його реалізації у виробничих умовах. Це викликано необхідністю вбудовування тензодавачів у бетон об'єкта на етапі його спорудження, а також реалізацією заходів зі збереження їх схеми для наступних вимірювань.

Опубліковані також результати досліджень впливу циклів “заморожування – відтавання” на фіброцементні плити методом акустичної емісії [6]. При дослідженні зразки фіброцементних плит піддавали одному й десяти циклам “заморожування – відтавання”. Після етапу “відтавання” досліджували зміну характеристик фіброцементу за параметрами акустичної емісії при триточковому вигинному навантаженні плити. Для аналізу результатів, одержаних мето-

дом акустичної емісії, використовувалася штучна нейронна мережа. Недоліком розробленого методу є його відносна складність, що обумовлює й економічну недоцільність його реалізації у виробничих умовах. Це визначається достатньо високою вартістю приладового забезпечення, необхідністю спеціальної кваліфікації оператора, а також і тим, що при виконанні вимірювань у виробничих умовах присутня значна ймовірність наявності вібраційних і акустичних перешкод. Цей фактор значно утруднює одержання надійних результатів при дослідженні матеріалів методом акустичної емісії, і для його виключення потребується додаткове ускладнення апаратури (встановлення додаткових фільтрів інформаційних сигналів тощо) [7].

Опубліковані також результати досліджень, спрямовані на вирішення завдання *точного* визначення морозостійкості бетону [8]. Авторами проведено системний аналіз результатів опублікованих фундаментальних досліджень аналізованої проблеми з урахуванням ступеня кореляції параметрів, критеріїв прийнятності їх використання та практичного досвіду. За результатами досліджень розроблено концепцію визначення необхідних характеристик для тестування бетону. За ідеологією авторів тест передбачає вимірювання такого комплексу характеристик: капілярне всмоктування вологи; внутрішні пошкодження бетону; дослідження на заморожування – відтавання. У результаті проведених досліджень автори роблять висновок, що для вирішення завдання, яке полягає в одержанні надійної оцінки морозостійкості бетону, що включає і його довговічність, експлуатаційну надійність, необхідна концепція вимірюваних характеристик. Вимірювані характеристики повинні забезпечувати інформацію з процесу створення й розвитку пошкоджень, а також щодо вимірювання пошкоджень. При цьому підкреслено, що такі важливі характеристики бетону, як внутрішні пошкодження, що спостерігаються при

впливі досліджуваних кліматичних дій, можуть бути визначені з достатньою точністю на основі використання ультразвукового неруйнівного методу [8].

Виклад основного матеріалу

Постановка завдання визначає, що дослідження стану бетону при циклічному впливі заморожування – відтавання необхідно проводити з використанням неруйнівних методів. Аналіз практики використання цього класу методів і нормативних документів показує, що ультразвуковий імпульсний метод є одним із найбільш ефективних [7, 9, 10]. Необхідна достовірність даних вимірювань у цьому разі забезпечується в результаті циклу вимірювань, що виконуються на тих самих бетонних об'єктах. За вимірювану характеристику інформаційного сигналу, яка використовувалася для аналізу взаємозв'язку “кількість циклів заморожування – відтавання – міцність кислотостійкого бетону – параметр неруйнівного контролю”, було визначено “приведений час поширення ультразвукових коливань” (t_n – час поширення ультразвукових коливань у бетоні, приведений до постійної відстані між випромінювальним і приймальним перетворювачами) [7]. Сутність цього параметра полягає у вимірюванні часу поширення ультразвукових коливань на постійній (фіксованій) відстані між випромінювальним і приймальним ультразвуковими перетворювачами. Тобто ультразвукові перетворювачі закріплювалися в конструкції на постійній відстані один від другого [7]. Необхідність такого рішення було продиктовано умовою проведення натурних вимірювань – застосуванням поверхневого розташування ультразвукових перетворювачів. При цьому також спрощується процес камеральної обробки результатів вимірювання за рахунок виключення операції з обчислення швидкості поширення ультразвукових коливань, що також виключає й ту похибку, яка формується при

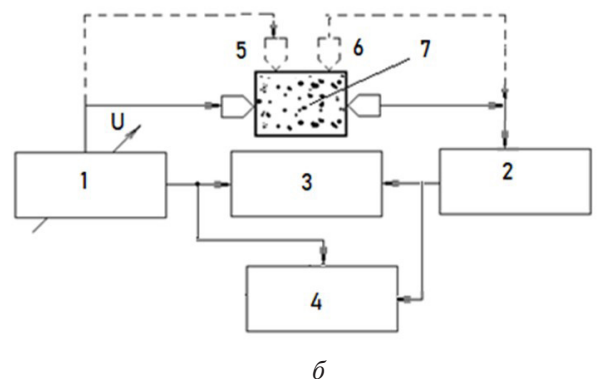
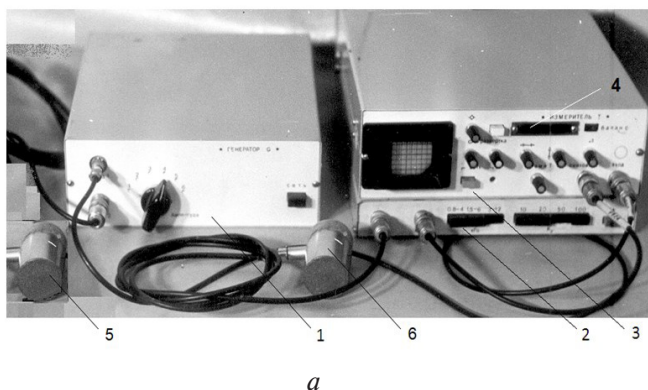


Рис. 1. Контрольно-вимірювальна система для дослідження міцності бетону на морозостійкість ультразвуковим методом: а – загальний вигляд; б – схема функціональна: 1 – генератор зондувальних імпульсів; 2 – широкосмуговий підсилювач; 3 – осцилографічний індикатор; 4 – цифровий реєстратор; 5, 6 – випромінювальний та приймальний п'єзокерамічні перетворювачі; 7 – зразок бетону

Міцність зразків із кислотостійких бетонів при стиску ($R_{ст}$) та результуюча зміна параметра ультразвукових коливань (t_n) при випробуванні на морозостійкість

№ складу бетону	Міцність бетону, МПа						Результуюче зниження міцності бетону, $R_{ст}$, %	Результуюча зміна параметра ультразвукових коливань, t_n , %
	Кількість циклів “заморожування – відтавання”, n							
	0	20	40	60	80	100		
1	19,7	18,1	17,1	16,2	15,9	15,4	17	43,5
2	23,8	17,4	15,2	13,0	9,5	6,4	73	60,8
3	25,7	25,1	24,5	24,1	23,2	22,6	12	22,1
4	32,3	31,6	31,0	30,5	30,1	29,9	7,3	19

вимірюванні відстані між випромінювальним і приймальним ультразвуковими перетворювачами при визначенні швидкості ультразвукових коливань [7].

Дослідження взаємозв'язку “кількість циклів заморожування – відтавання – міцність кислотостійкого бетону – параметр неруйнівного контролю” виконувалося з використанням спеціалізованої апаратури (рис. 1) [11]. Апаратура включала генератор зондувальних імпульсів (1) з регульованою напругою на виході, спеціалізований широкосмуговий підсилювач (2), осцилографічний індикатор (3), цифровий реєстратор часу поширення пружної хвилі (4). Для введення зондувальних імпульсів і прийому інформаційних сигналів застосовувалися перетворювачі з п'єзо-кераміки ЦТС-19 циліндричного типу з насадками типу “конічний концентратор”. Вибір такого типу насадок на перетворювачі обумовлений постановкою завдання експерименту, яке вимагає забезпечення точного дотримання постійної відстані між випромінювальним і приймальним перетворювачами протягом усіх досліджень.

Для проведення досліджень із визначення морозостійкості кислотостійких бетонів було виготовлено 4 серії контрольних зразків. Компоненти бетонної суміші в кожній серії зразків відповідали чотирьом базовим складам, які застосовують на практиці. Зразки виготовляли у вигляді кубів розміром $100 \times 100 \times 100$ мм.

Випробуванням піддавалися зразки нормального тужавлення у віці 28 діб. Перед початком циклічного впливу “заморожування – відтавання” ($K_{ц.м.}$) зразки занурювали у воду з температурою $t_b^\circ = 15...20$ °С і витримували до повного водонасичення протягом визначеного часу ($T = 9$ діб). Відповідно до стандартної методики випробувань [3], водонасичені зразки витримували у морозильній камері 4 години при температурі $t_i^\circ = -15...20$ °С. Після витримки в морозильній камері зразки занурювали у воду з температурою $t_b^\circ = 15...20$ °С для їх відтавання. Через кожні 10 циклів “заморожування – відтавання” зразки зважували, вимірювали приведений час поширення ультразвукових коливань (t_n) й міцність бетону при стиску ($R_{ст.i}$).

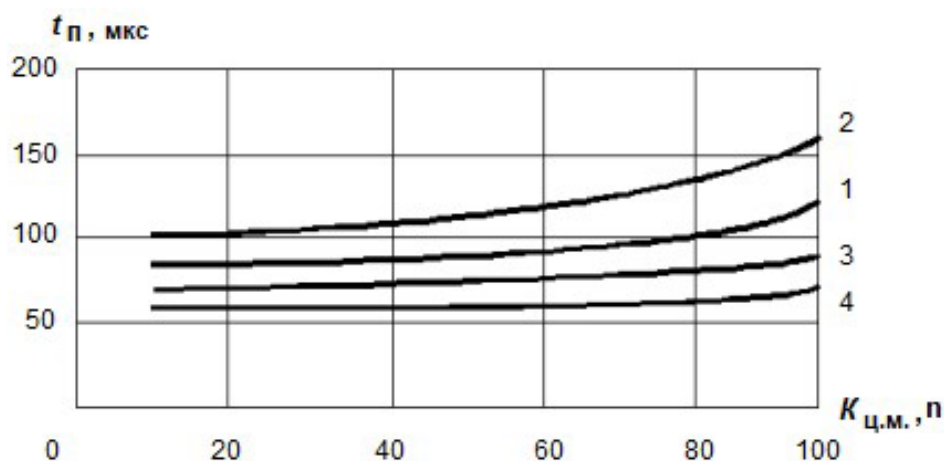


Рис. 2. Зміна приведенного часу розповсюдження ультразвукових коливань (t_n) у зразках кислотостійких бетонів залежно від зміни міцності бетону при дослідженні на морозостійкість: 1, 2, 3, 4 – номер складу бетону контрольних зразків; $K_{ц.м.}$, n – кількість циклів “заморожування – відтавання”; t_n – час проходження ультразвукових коливань у бетоні зразків

Результати зміни міцності бетону й параметра (t_n) при впливі циклів “заморожування – відтавання” наведені в табл. 1. Залежність приведенного часу поширення ультразвукових коливань (t_n) від міцності зразків бетону протягом циклу випробувань ($K_{ц.м.і}$) у графічному вигляді наведено на рис. 2.

Аналіз наведених експериментальних результатів дослідження свідчить, що зниження міцності кислотостійких бетонів ($R_{ст.і}$), яке викликається активізацією порушень їх структури при кліматичному впливі, адекватно відображається на вимірюваному параметрі ультразвукових коливань (t_n).

Висновки

Результати проведених досліджень дають змогу рекомендувати ультразвуковий імпульсний метод для контролю зниження міцності ($R_{ст}$) кислотостійких бетонів у виробі. При цьому з'являється можливість визначення моменту зниження цієї характеристики до допустимої величини, обстеження експлуатованих об'єктів із кислотостійких бетонів для виділення в них аварійних чи передаварійних ділянок. Розроблена методологія дослідження морозостійкості може бути поширена й на інші будівельні матеріали.

Justification of the methods for operational research of the operational reliability of acid-resistant concrete under the influence of climate cycles “freezing – thawing” by the ultrasonic pulse method

Ya. Serikov

O.M. Beketov National University of Urban Economics in Kharkiv, Marshala Bazhanova Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine
s0509088828@gmail.com

Abstract

An important task of the construction industry is to establish the operational reliability of construction objects under the influence of cyclic climatic loads from freezing and thawing on the concrete. This is especially relevant if such loads are accompanied by moistening followed by the concrete freezing. Such loads cause a violation of the structure of concrete and lead to a decrease in its strength. It is especially important to solve this problem for acid-resistant concrete, which is used in the construction of platforms for unloading or using material and liquids characterized by their aggressive action – acids, alkalis, etc. According to regulatory documents and official methods, the class of concrete in terms of its frost resistance is determined at the stage of its design using destructive methods. For this purpose, a series of concrete samples are prepared, the strength of which is determined by compressive load during a series of “moistening – freezing – thawing” cycles. Samples are frozen in a special freezer. The peculiarity of the operation with acid-resistant concrete is that its saturation in real conditions occurs not only with water, but also with a solution of an aggressive environment. This can intensify the decrease in the concrete strength, and therefore the decrease in its operational reliability. Published research results aimed at improving the determination of frost resistance of the concrete involve the use of, for example, strain gauges embedded in concrete, the acoustic emission method, etc. The main disadvantage of such methods is the significant complexity of implementation, or the impossibility to test the concrete in production conditions. The results of the experiments presented in the paper indicate a real possibility of determining the strength of acid-resistant concrete during operation using the improved ultrasonic pulse method.

Keywords: acid-resistant concrete; frost resistance; operation; trial; ultrasonic pulse method.

Список літератури

1. ДСТУ Б А.1.1-5-94. Система стандартизації і нормування в будівництві. Загальні фізико-технічні характеристики та експлуатаційні властивості будівельних матеріалів. Терміни та визначення.
2. ДСТУ Б В.2.6-2:2009. Вироби бетонні і залізобетонні. Загальні технічні умови.
3. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги (ГОСТ 10060.0-95).
4. Lapovska S.D., Krasnianskyi G.Iu., Klapchenko V.I., Aznaurian I.O. Evaluation of the frost resistance of concrete in real operating conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 907. Innovative Technology

- in Architecture and Design (ITAD 2020), Kharkiv, Ukraine. doi: 10.1088/1757-899X/907/1/012039
5. Gou Y., Zhang L., Liu C., Zhang H. et al. Investigation of freeze-thaw mechanism for crumb rubber concrete by the online strain sensor. *Measurement*, 2021, vol. 174. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109080
 6. Gorzelańczyk T., Schabowicz K., Szymków M. Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem emisji akustycznej. *Welding Technology Review*, 2016, vol. 88, no. 10 (in Polish). doi: <https://doi.org/10.26628/wtr.v88i10.682>
 7. Шутенко Л.М., Серіков Я.О., Золотов М.С. та ін. Дослідження будівельних матеріалів, конструкційних елементів будинків і споруд та механічних систем неруйнівними методами на основі пружних хвиль: монографія. Харків: ІОЦ ХНАМГ, 2009. 260 с.
 8. Auberg R. Application of CIF-Test in practise for reliable evaluation of frost resistance of concrete. International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete, 2002, pp. 255–267. URL: https://www.rilem.net/publication/publication/29?id_papier=2014
 9. ДСТУ Б В.2.7-226:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності.
 10. Серіков Я.О., Назаренко Л.А. Підвищення достовірності результатів вимірювання при дослідженні надійності будівельних конструкцій ультразвуковим імпульсним методом у виробничих умовах. *Український метрологічний журнал*. 2022. № 2. С. 21–27. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2022.263875>
 11. Серіков Я.О. Розроблення приладів для системи моніторингу міцнісних характеристик бетону в експлуатованих будинках і спорудах на основі ультразвукового імпульсного методу. *Метрологія та прилади*. 2019. № 2. С. 22–27. doi: 10.33955/2307-2180(2)2019.22-27

References

1. DSTU B A.1.1-5-94. System of standardization and rationing in construction. General physical and technical characteristics, operational properties of building materials. Terms and Definitions (in Ukrainian).
2. DSTU B V.2.6-2:2009. Concrete and reinforced concrete products. General technical conditions (in Ukrainian).
3. DSTU B V.2.7-47-96. Building materials. Concretes. Methods of determining frost resistance. General requirements (GOST 10060.0-95) (in Ukrainian).
4. Lapovska S.D., Krasnianskyi G.Iu., Klapchenko V.I., Aznaurian I.O. Evaluation of the frost resistance of concrete in real operating conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 907. Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020), Kharkiv, Ukraine. doi: 10.1088/1757-899X/907/1/012039
5. Gou Y., Zhang L., Liu C., Zhang H. et al. Investigation of freeze-thaw mechanism for crumb rubber concrete by the online strain sensor. *Measurement*, 2021, vol. 174. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109080
6. Gorzelańczyk T., Schabowicz K., Szymków M. Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem emisji akustycznej. *Welding Technology Review*, 2016, vol. 88, no. 10 (in Polish). doi: <https://doi.org/10.26628/wtr.v88i10.682>
7. Shutenko L.M., Serikov Ya.O., Zolotov M.S. et al. Doslidzhennya budivelnykh materialiv, konstruksiynykh elementiv budynkiv i sporud ta mekhanichnykh system neruynivnymy metodamy na osnovi pruzhnykh khvyl: monohrafiya [Research of building materials, structural elements of buildings and structures and mechanical systems by non-destructive methods based on elastic waves: monograph]. Kharkiv, 2009. 260 p. (in Ukrainian).
8. Auberg R. Application of CIF-Test in practise for reliable evaluation of frost resistance of concrete. International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete, 2002, pp. 255–267. Available at: https://www.rilem.net/publication/publication/29?id_papier=2014
9. DSTU B V.2.7-226:2009. Building materials. Concretes. Ultrasonic method of determination of strength (in Ukrainian).
10. Serikov Ya.O., Nazarenko L.A. Pidvyshchennya dostovirnosti rezultativ vymiryuvannya pry doslidzhenni nadiynosti budivelnykh konstruksiy ultrazvukovym impulsnym metodom u vyrobnych umovakh [Improving the reliability of measurement results when studying the reliability of building structures with the ultrasonic pulse method under production conditions]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2022, no. 2, pp. 21–27 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2022.263875>
11. Serikov Ya.O. Rozrobka pryladiv dlya systemy monitorynhu mitsnistnykh kharakterystyk betonu v ekspluatovanykh budynkakh i sporudakh na osnovi ultrazvukovoho impulsnoho metodu [Development of Devices for the System of Monitoring the Strength Features of Concrete in Operated Buildings and Structures Based on the Ultrasonic Pulse Method]. *Metrology and Instruments*, 2019, no. 2, pp. 22–27 (in Ukrainian). doi: 10.33955/2307-2180(2)2019.22-27