



УДК 628.971

Шляхи підвищення достовірності й точності визначення геометричних параметрів тріщин у бетоні будівельних об'єктів 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

При експлуатації будівельних об'єктів у бетоні конструкційних елементів з'являються тріщини, що може знижувати фізико-механічні характеристики їхніх конструкцій. При визначенні ширини розкриття й глибини тріщини підлягають заповненню спеціальними матеріалами. У разі похибки у визначенні глибини тріщини ремонтний матеріал може недостатньо заповнювати її. Це може призводити до аварій. Наразі найбільш поширеним методом є вимірювання параметрів тріщин мікроскопом та вимірювальним щупом. Його недоліком є недостатня достовірність вимірювання глибини тріщини. Це визначається тим, що у разі наявності в тріщині внутрішньої перемички з залишків бетону може бути похибка у вимірюванні її глибини. Застосовують також ультразвуковий імпульсний метод, у якому визначають глибину тріщини за часом проходження ультразвукових коливань на ділянці якісного бетону й на його ділянці з тріщиною. Цей метод характеризується недостатньою надійністю вимірювань тому, що при наявності в тріщині залишкової внутрішньої бетонної перемички ультразвукові коливання можуть поширюватись і через неї. В цьому разі результат вимірювання буде хибним. Застосовують вдосконалений ультразвуковий імпульсний метод, у якому на додаток вимірюють і загальну амплітуду інформаційного сигналу. Використання цього параметру є недостатнім, адже для вирішення задачі є необхідним і врахування його спектральних характеристик. На стадії розробки є метод, в якому використовують поверхневі ультразвукові хвилі. Недоліками його є відносна складність для досліджень у бетоні й значна вартість апаратури. Для підвищення достовірності й точності визначення геометричних параметрів тріщин у бетоні проведені дослідження комплексним ультразвуковим імпульсним методом. При дослідженнях вимірювались величина нормованого часу поширення ультразвукових коливань, амплітуда і тривалість першого напівперіоду інформаційного сигналу. Результати досліджень дозволяють рекомендувати розроблену методологію для вирішення поставленої задачі.

Ключові слова: життєвий термін будівельних об'єктів; бетон; параметри тріщини; точність; ультразвуковий імпульсний метод.

Отримано: 29.08.2022

Відредаговано: 23.09.2022

Схвалено до друку: 28.09.2022

Вступ

На сьогодні практично в усіх країнах значна кількість споруд, будинків житлового, громадського і промислового призначення практично вичерпали свій життєвий термін або перебувають на межі його закінчення. До цієї категорії відносяться також і будівельні об'єкти, що мають історичну та архітектурну цінність. Виведення їх з експлуатації, як правило, неможливе з економічних причин або з причини порушення характерного архітектурного чи історичного вигляду міста. Наразі таке становище є актуальною проблемою не тільки

для України, а й для зарубіжних країн [1, 2]. Ситуація, що склалася, викликала необхідність розробки нових методів обстеження й дослідження надійності для визначення можливого подовження їхнього життєвого терміну.

Одними з важливих конструкційних елементів будівельних об'єктів є бетонні й залізобетонні вироби. У їхньому бетоні протягом експлуатації внаслідок негативної дії експлуатаційних, кліматичних факторів виникають порушення структури у вигляді тріщин, які можуть знижувати його фізико-механічні характеристики [3]. При

визначених параметрах тріщин проводять їх заповнення спеціальними матеріалами. Отже, від ступеня точності визначення параметрів тріщин залежить надійність подальшої експлуатації бетонного чи залізобетонного конструкційного елемента чи будівельного об'єкта в цілому.

Постановка проблеми

Тріщини в бетоні конструкційних елементів утворюються внаслідок дії динамічних, статичних навантажень, впливу кліматичних факторів тощо. В сучасній практиці ремонтно-відновлювальних робіт тріщини в бетоні вважаються нормальними, тобто не вимагають ремонту, якщо їхня ширина розкриття і глибина не перевищують визначених значень [4]. Якщо ж тріщини мають більшу ширину розкриття, то їх заповнюють спеціальними матеріалами.

На додаток до визначення ширини розкриття тріщини необхідно вимірювати й її глибину. На практиці встановлення глибини тріщини в бетоні є достатньо складним завданням. У результаті такої невизначеності матеріал, який використовують для ремонту, може недостатньо заповнювати тріщину. У результаті неякісного ремонту тріщин можуть виникати негативні економічні та (чи) технічні наслідки. Тобто від точності визначення глибин тріщини залежить якість її заповнення спеціальними матеріалами, а отже й надійність подальшої експлуатації будівельного об'єкта. На сьогодні розроблено ряд методик і приладів для вирішення цього завдання, але вони характеризуються недостатньою точністю результатів і надійністю.

Виходячи з цього, підвищення точності й надійності визначення параметрів тріщин у бетоні є важливим завданням у проблемі продовження життєвого терміну будівельних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наразі найбільш поширеним є метод вимірювання ширини розкриття тріщини за допомогою

мікроскопів, а її глибини – спеціальними голками чи дротяними щупами [5]. Цей метод характеризується простотою вимірювань, але низькою достовірністю вимірювань глибини тріщини. Це визначається її кривизною, а також тим, що особливо при малій ширині розкриття, в тріщині залишаються внутрішні перемички із залишків бетону, які також можуть вносити значну похибку вимірювань. На додаток внутрішня поверхня тріщини характеризується значними нерівностями, що також утруднює одержання надійних результатів вимірювання.

Для вирішення задачі застосовують і неруйнівні ультразвукові методи. За першою методикою глибину тріщини визначають за зміною часу проходження ультразвукових імпульсів (рис. 1), за формулою [5]:

$$h = \frac{V}{2} \sqrt{t_2 - t_1}; V = \frac{a}{t_2},$$

де h – глибина тріщини (рис. 1); V – швидкість поширення ультразвукових коливань на ділянці без тріщин, м/с; t_1, t_2 – відповідно час проходження ультразвукових коливань на ділянці бетону без тріщини і з тріщиною, с; a – база виміру (відстань між випромінювальним і приймальним ультразвуковими перетворювачами) для обох ділянок, м.

Основним недоліком цього методу є те, що особливо при малій ширині розкриття тріщин, у якій залишилися внутрішні перемички з залишків бетону, ультразвукові коливання будуть поширюватися й по бетону перемичок. При цьому час їх поширення буде значно меншим (рис. 1, поз. 3). У результаті цього в результаті вимірювань може бути внесено значну похибку.

Опубліковані також результати досліджень на бетонних плитах, у яких були зроблені моделі тріщин. В експерименті застосовувалися поверхневі хвилі. Глибина кожної тріщини визначалася за допомогою лазерного фазового методу інтерферометрії. Як зазначено в публікації, вияв-

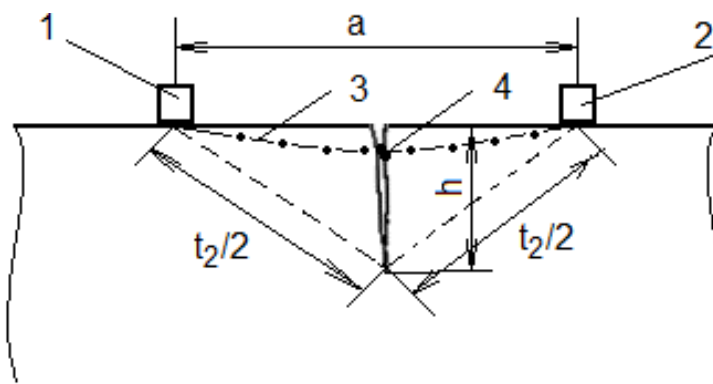


Рис. 1. Метод визначення параметрів тріщин у бетоні експлуатованих будівельних об'єктів за швидкістю поширення ультразвукових коливань. Функціональна схема вимірювання параметрів: 1, 2 – відповідно випромінювальний та приймальний ультразвукові перетворювачі; a – відстань між випромінювальним і приймальним ультразвуковими перетворювачами; $t_2/2 + t_2/2 = t_2$ – час проходження ультразвукових коливань на ділянці з тріщиною; h – глибина тріщини; 3 – шлях проходження ультразвукових коливань у бетоні за наявності в тріщині залишкових бетонних перемичок; 4 – залишкова внутрішня бетонна перемичка

лено певний рівень зв'язку між розповсюдженням пружної хвилі в бетоні та глибиною тріщини, й виявлене співвідношення, *мабуть*, не залежить від типу бетону та характеру тріщини [6]. Тобто з опублікованих матеріалів результати, одержані авторами, є недостатньо ясними. На додаток, важливим недоліком напрямку досліджень із використанням поверхневої хвилі є певна складність їх генерування й приймання в бетоні та достатньо складна приладова база для її реалізації.

Наведені також результати досліджень із визначення параметрів тріщин у бетоні транспортних тунелів метрополітену. На відміну від методу визначення глибини тріщин за різницею часу проходження ультразвукової хвилі [5], додатково вимірювалася амплітуда обвідної інформаційного сигналу [7]. Ця методика є більш інформативною, тому що враховує енергетичні параметри інформаційного сигналу, які змінюються при зміні об'єму бетону. Але вимірювання загальної амплітуди є недостатнім, адже особливості задачі обумовлюють і врахування спектральних характеристик, що дозволяє отримати інформацію про порушення структури бетону в місці тріщиноутворення.

Виклад основного матеріалу

Грунтуючись на проведеному аналізі методів неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик бетону [8], аналізі опублікованих результатів, були проведені дослідження з визначення геометричних параметрів тріщин у бетоні з використанням неруйнівного ультразвукового імпульсного методу. На етапі постановки задачі як контрольовані характеристики були визначені: нормований час поширення (τ_H) пружної хвилі [8]; амплітуда (A) першого напівперіоду

інформаційного сигналу [9]; тривалість (Δt) першого напівперіоду інформаційного сигналу. Вибір таких характеристик пружної хвилі обумовлений тим, що нормований час поширення пружних хвиль (τ_H) відображає міцність бетону й, як похідну, – щільність його структури. Амплітуда (A) й тривалість першого напівперіоду (Δt) є відповідно енергетичною й спектральною характеристиками інформаційного сигналу, які утримують інформацію про дефекти, структурні неоднорідності бетону [9, 10].

Методологічно дослідження проводились на бетонних зразках 2 типів. Перший тип зразків являв собою бетонний паралелепіпед розмірами 150x150x900 мм. У таких зразках на етапі виготовлення моделювалися 3 тріщини глибиною 35, 70, 110 мм. Другий тип зразків мав розміри 150x150x300 мм. У цих зразках моделі тріщин створювалися розколюванням (повним та неповним) із наступним механічним стягуванням. Дослідження виконувалося з використанням спеціалізованої контрольно-виміральної системи (рис. 2, 3). Контрольно-вимірвальна система включала генератор зондувальних імпульсів (1) із регульованою напругою на виході, підсилювач (2), осцилографічний індикатор (3), цифровий реєстратор часу поширення ультразвукової хвилі (4), магнітограф (5) (рис. 2).

Виходячи з постановки задачі, для введення зондувальних і прийому інформаційних сигналів застосовувалися перетворювачі з п'єзокераміки ЦТС-19 циліндричного типу з насадками типу "конічний концентратор".

Наступним важливим етапом підготовки апаратури було визначення частоти зондувального сигналу через розрахунок оптимальної довжи-

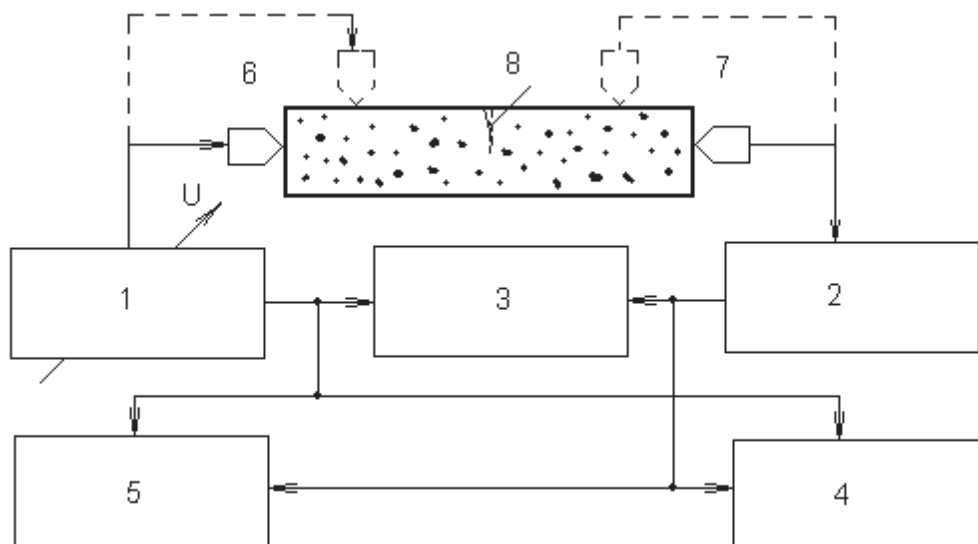


Рис. 2. Контрольно-вимірвальна система для дослідження параметрів тріщин у бетоні. Схема функціональна: 1 – генератор зондувальних імпульсів; 2 – підсилювач; 3 – осцилографічний індикатор; 4 – цифровий реєстратор; 5 – магнітограф; 6, 7 – випромінювальний та приймальний п'єзокерамічні перетворювачі; 8 – тріщина в бетоні

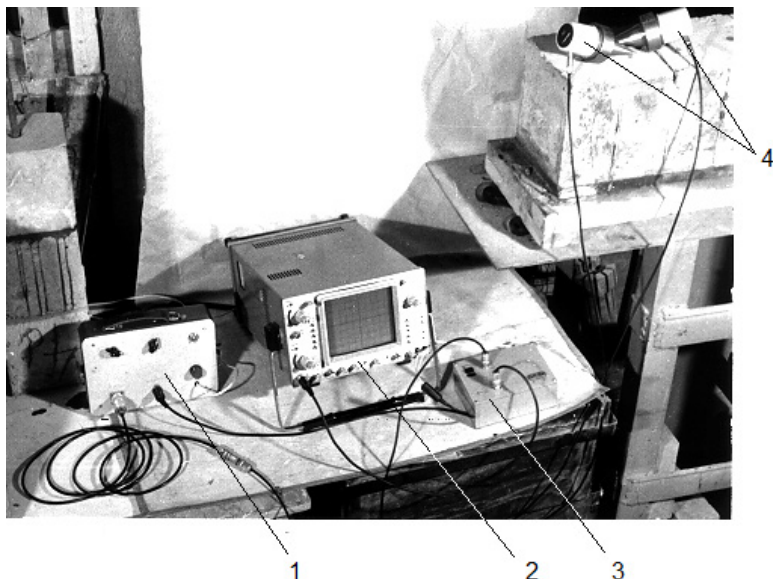


Рис. 3. Контрольно-вимірювальна система для дослідження параметрів тріщин у бетоні. Загальний вигляд: 1 – генератор зондувальних імпульсів; 2 – осцилографічний індикатор; 3 – підсилювач; 4 – випромінювальний та приймальний п'єзокерамічні перетворювачі

ни хвилі (λ) випромінюваного сигналу [11] з урахуванням характеристик середовища, в якому він поширюється.

Графічну інтерпретацію результатів вимірювання характеристик інформаційного ультразвукового сигналу на зразках першого типу наведено на рис. 4.

Результати виконаних досліджень дозволяють зробити висновок, що для дослідження геометрії тріщин у бетоні необхідно використовувати комплекс характеристик, тобто інформацію як з інтенсивності інформаційного сигналу, так і його спектральних характеристик. Так, нормований час поширення ультразвукових коливань може використовуватись для визначення глибини тріщин, що виходять на поверхню, без внутрішніх перемичок

(при визначених параметрах зондувального сигналу).

Однак у зв'язку зі складною структурною будовою тіла бетону доповнення цього параметра величиною загасання й спектральною характеристикою дозволяє підвищити вірогідність даних у результаті врахування ефектів розсіювання енергії й частково – акустичної релаксації, які змінюються відповідно до порушень структури бетону, тобто залежно від геометричних параметрів і внутрішньої структури тріщини.

Одержані результати створюють передумови необхідності проведення подальших порівняльних досліджень із визначення числових значень точності й вірогідності вимірювань параметрів тріщин пропонуваним методом.

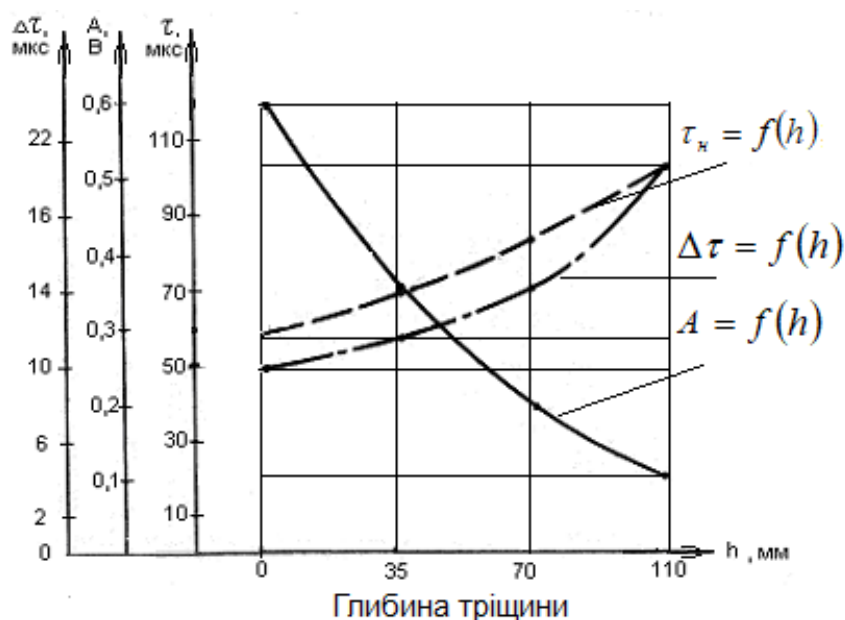


Рис. 4. Графік залежності характеристик ультразвукового інформаційного сигналу від глибини тріщини в бетонному зразку першого типу: $\tau_h = f(h)$; $A = f(h)$; $\Delta\tau = f(h)$

Висновки

Результати виконаних досліджень дозволяють зробити висновок, що вирішення завдання вимірювання параметрів тріщин у бетоні, особливо їхньої глибини, можливе при вимірюванні комплексу

характеристик ультразвукового інформаційного сигналу. Тобто необхідна достовірність вимірювання забезпечується комплексною інформацією про параметри інтенсивності й спектральні характеристики інформаційного сигналу.

Ways to increase the reliability and accuracy of determining the geometric parameters of cracks in the concrete of buildings using 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

During the exploitation of buildings, cracks appear in the concrete of structural elements, which can reduce the physical and mechanical characteristics of their structures. With a certain exposure width and depth, cracks are subject to filling with special materials. In case of error in determining the crack depth, the repair material may not fill it sufficiently. This might lead to accidents. Nowadays, the most common method is to measure the parameters of cracks with a microscope and a measuring probe. Its disadvantage underlies in insufficient reliability of the crack depth measurement. This is because if there is an internal lintel of concrete residues in the crack, there may be an error in measuring its depth. The ultrasonic pulse method is also used, when the depth of the crack is determined by the time of travel of ultrasonic vibrations on the section of high-quality concrete and on the section with a crack. This method is not very reliable because the ultrasonic vibrations can also propagate through the internal lintel of the concrete residues in the crack. In this case, the measurement result will be false. An improved ultrasonic pulse method is used when the combined amplitude of the information signal is also measured. The use of this parameter is insufficient because solving the problem requires taking into account spectral characteristics of the parameter. At the stage of development, there is a method that uses surface ultrasonic waves. Its disadvantages are relative complexity of research in concrete and high cost of equipment. To increase the reliability and accuracy of determining the geometric parameters of cracks in concrete, studies were carried out using a complex ultrasonic pulse method. During the research, the value of the normalized propagation time of ultrasonic vibrations, the amplitude, and duration of the first half-period of the information signal were measured. The results of the research allow us to recommend the developed method for solving the problem.

Keywords: lifespan of buildings; concrete; crack parameters; accuracy; ultrasonic pulse method.

Пути повышения достоверности и точности определения геометрических параметров трещин в бетоне строительных объектов ультразвуковым импульсным методом

Я.А. Сериков

*Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова,
ул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харьков, Украина
s0509088828@gmail.com*

Аннотация

В бетоне эксплуатируемых строительных объектов появляются трещины, которые могут снижать прочность конструкций. При некоторой ширине раскрытия и глубине трещины заполняют специальными материалами.

Погрешность определения глубины трещины вызывает ее недостаточное заполнение, что может вызвать аварию. Применяют ультразвуковой импульсный метод, в котором определяют глубину трещины по времени прохождения колебаний на качественном участке бетона и участке с трещиной. При наличии в трещине остаточной бетонной перемычки колебания могут распространяться и через нее, вызывая погрешность. Применяют ультразвуковой импульсный метод, в котором измеряют и общую амплитуду информационного сигнала. Этого параметра недостаточно, так как для точного измерения необходим учет спектральных характеристик. Разрабатывается метод на основе поверхностных ультразвуковых волн. Недостатком его является сложность исследования бетона и стоимость аппаратуры. Для решения задачи проведены исследования комплексным ультразвуковым импульсным методом, в котором измерялись нормированное время распространения ультразвуковых колебаний, амплитуда и длительность первого полупериода информационного сигнала.

Ключевые слова: жизненный срок строительных объектов; бетон; параметры трещины; точность; ультразвуковой импульсный метод.

Список літератури

1. Олійник Н.І. Концептуальні підходи до формування стратегії реновації житлового фонду. *Вісник НАДУ*, 2009. № 4. С. 71–79.
2. Серіков Я.О. Техніко-економічне обґрунтування прийняття рішень включення експлуатованих будівель і споруд у базу даних систем діагностики для оцінки їх рівня інвестиційної перспективності. *Економіка, управління, фінанси: стан, проблеми та перспективи розвитку*: матер. XII Міжнар. наук. конф. Макіївка: ДонНАБА, 2013. Ч. 1. С. 34–37.
3. Савиловский В.В., Болотских О.Н. Ремонт и реконструкция гражданских зданий. Харьков: Ватерпас, 1999. 287 с.
4. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. URL: <https://dbn.co.ua/load/pormativy/dbn/1-1-0-792>
5. Способи спостереження за тріщинами в кам'яних і бетонних конструкціях. Методи контролю тріщин в будівлях. Спостереження за тріщинами. URL: <https://theroyalfamily.ru/uk/foundations/sposoby-nablyudeniya-za-treshchinami-v-kamennyh-i-betonnyh-konstrukciyah/>
6. Popovics J.S., Ghandehari M., Subramaniam K. et al. Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete. *Aci Structural Journal*, 2000, vol. 97(2), pp. 127–135.
7. Кириленко А.М., Знайченко П.А. Определение глубины трещин в железобетонной обделке транспортных тоннелей – ультразвуковой метод решения. Москва, Импредило, 2010. 4 с.
8. 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.

9. Серіков Я.О. Підвищення точності контролю фізико-механічних характеристик матеріалів ультразвуковим імпульсним методом внаслідок зменшення похибки вимірювання часу поширення пружних хвиль. *Метрологія та прилади*. 2018. № 5. С. 31–35.
10. Сериков Я.А. Исследование процесса развития трещин в бетоне конструктивных элементов мостовых сооружений ультразвуковым импульсным методом. *Акустические измерения и стандартизация. Геоакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии*: сб. трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т. 2. Москва: МГУ, 2007. С. 182–186.
11. Серіков Я.О., Назаренко Л.А. Дослідження частотних і амплітудно-частотних характеристик промислових ультразвукових перетворювачів для неруйнівного контролю якості матеріалів. *Український метрологічний журнал*. 2018. № 3. С. 49–54. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2018.153105>

References

1. Oliynyk N.I. Kontseptualni pidkhody do formuvannya stratehiyi renovatsiyi zhytlovoho fondu [Conceptual approaches to the formation of a housing renovation strategy]. *Bulletin of the National Academy of Sciences*, 2009, no. 4, pp. 71–79 (in Ukrainian).
2. Serikov Ya.O. Tekhniko-ekonomichne obhruntuvannya pryunyattya rishen vklyuchennya ekspluatovanykh budivel i sporud u bazu danykh system diahnostryky dlya otsinky yikh rivnya investytsiynoyi perspektyvnosti [Technical and economic rationale for making decisions to include operated buildings and structures in the database of diagnostic systems to assess their level

- of investment prospects]. *Economics, management, finance: state, problems and development prospects: proceedings of XII International Scientific Conference*. Makiivka, 2013, part 1, pp. 34–37 (in Ukrainian).
3. Savyovskiy V.V., Bolotskikh O.N. Remont i rekonstruktsiya grazhdanskikh zdaniy [Repair and reconstruction of civil buildings]. Kharkiv, Vaterpas Publ, 1999. 287 p. (in Russian).
 4. DBN B.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsiyi [Concrete and reinforced concrete structures] (in Ukrainian). Available at: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-792>
 5. Sposoby sposterezhennya za trishchynamy v kamnyakh i betonnykh konstruktsiyakh. Metody kontrolyu trishchyn v budivlyakh. Sposterezhennya za trishchynamy [Ways of observing cracks in stone and concrete structures. Methods of crack control in buildings. Observation of cracks] (in Ukrainian). Available at: <https://theroyalfamily.ru/uk/foundations/sposoby-nablyudeniya-za-treshchinami-v-kamennyh-i-betonnyh-konstrukciyah/>
 6. Popovics J.S., Ghandehari M., Subramaniam K. et al. Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete. *Aci Structural Journal*, 2000, vol. 97(2), pp. 127–135.
 7. Kirilenko A., Znajchenko P. Opredeleniye glubiny treshchin v zhelezobetonnoy obdelke transportnykh tonneley – ultrazvukovoy metod resheniya [Determination of crack depth in the reinforced concrete lining of transport tunnels by ultrasonic method]. Moscow, Impregilo Publ., 2010, 4 p. (in Russian).
 8. Shutenko L.M., Serikov Ya.O. et al. Diahnostyka budivelnnykh materialiv, konstruktsiynykh elementiv budynkiv i sporud ta mekhanichnykh system neruynivnymi metodamy na osnovi pruzhnykh khvyl: monografiya [Diagnosis of building materials, structural elements of buildings and constructions and mechanical systems by non-destructive methods based on elastic waves: monograph]. Kyiv, Technika Publ., 2009. 261 p. (in Ukrainian).
 9. Serikov Ya.O. Pidvyshchennya tochnosti kontrolyu fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk materialiv ultrazvukovym impulsnym metodom za rakhunok zmenshennya pokhybky vymiru chasu poshyrennya pruzhnykh khvyl [Improvement of accuracy of control of physical-mechanical characteristics of materials by ultrasonic pulse method due to reduction of measurement error of propagation time of elastic waves]. *Metrology and instruments*, 2018, no. 5, pp. 31–35 (in Ukrainian).
 10. Serikov Ya.A. Issledovaniye protsessa razvitiya treshchin v betone konstruktivnykh elementov mostovykh sooruzheniy ultrazvukovym impulsnym metodom [Investigation of the development of cracks in concrete structural elements of bridge structures by ultrasonic pulse method]. *Acoustic measurements and standardization. Geoacoustics. Ultrasound and ultrasonic technologies: proceedings of the XIX session of the Russian Acoustic Society*. Moscow, 2007, vol. 2, pp. 182–186 (in Russian).
 11. Serikov Ya.O., Nazarenko L.A. Doslidzhennya chastotnykh i amplitudno-chastotnykh kharakterystyk promyslovykh ultrazvukovykh peryvoryuvachiv dlya neruynivnoho kontrolyu yakosti materialiv [Research of frequency and amplitude-frequency characteristics of industrial ultrasonic transducers for non-destructive quality control of materials]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2018, no. 3, pp. 49–54 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2018.153105>