

УДК 622.831.31:622.834

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.116.1050

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРИХОВАНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ В КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ЇХ РУЙНУВАННЯ

ЯВОРСЬКА О. О.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БАРАБАНОВ С. С.^{2*}, *маг., асп.*

¹ Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (0562) 46-90-66, email: yavorska.o.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5516-5310

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38(0567) 56-34-73, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

Анотація. Постановка проблеми. В умовах надзвичайних ситуацій, які активуються динамічними впливами від вибухів, пожежами та землетрусами, необхідно проводити контроль стійкості об'єктів для оцінення їх придатності до подальшої експлуатації. **Мета дослідження** – забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд із застосуванням методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості в будівельних конструкціях. **Методика.** Аналіз та узагальнення даних, комп'ютерне моделювання, експериментальні дослідження стійкості споруд віброакустичним методом. **Результати.** Розглянуті: втрата стійкості бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементів несних конструкцій; фактори ризику, які проявляються в поступовому ослабленні будівельних несних конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень. Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості пошкоджень у конструктивних елементах або швидкого зростання тріщин, які активізуються раптовим розвантаженням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів. Моделюванням процесу руйнування методом скінчених елементів встановлено, що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути ідентифіковані візуально, зони прихованої пошкодженості можуть активно розвиватися всередині стінових конструкцій будівель. Визначено основні параметри контролю стану будівель та споруд візуальним та віброакустичним методами. У зв'язку з тим, що об'єктом досліджень стало часткове руйнування будівель та споруд (тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів), для оцінення ризиків втрати стійкості запропоновано дві основні групи факторів ризику. Перша група пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Інтегральний ризик втрати стійкості визначається шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групі. **Наукова новизна.** Подальший розвиток отримала методика ідентифікації прихованої пошкодженості в конструктивних елементах будівель і споруд, яка відрізняється урахуванням параметрів віброакустичного контролю наслідків процесу руйнування і оцінкою ризиків втрати стійкості споруд. **Практична значимість.** Результати досліджень дозволяють удосконалити метод оцінення зміни структури середовища внаслідок виникнення спостережуваних і прихованих систем тріщин за допомогою віброакустичного моніторингу.

Ключові слова: безпека будівель і споруд; ризики втрати стійкості; віброакустичний контроль

IDENTIFICATION OF HIDDEN DAMAGE IN CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF BUILDINGS AND STRUCTURES TO REDUCE THE RISKS OF THEIR DESTRUCTION

YAVORSKA O.O.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BARABANOV S.S.^{2*}, *Master's degree, Postgrad. Student*

¹ Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (0562) 46-90-66, e-mail: yavorska.o.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5516-5310

^{2*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (056) 756-34-73, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

Abstract. Problem statement. In emergency situations, which are activated by dynamic impacts from explosions, fires and earthquakes, it is necessary to monitor the stability of objects to assess their suitability for further operation. **Purpose of the study.** ensuring the safe operation of buildings and structures using methods, software and technical means for vibroacoustic monitoring of hidden damage in building structures. **Methods.** Analysis and generalization of data, computer modeling, experimental studies of the structures stability using the vibroacoustic method. **Research results.** Considered: loss of concrete stability, reinforced concrete, bricks and other elements of load-bearing structures; risk factors manifested in the gradual weakening of load-bearing building structures due to the accumulation of internal damage. Sudden loss of stability of structures occurs after the accumulation of a critical amount of damage in structural elements or the rapid growth of cracks, which are activated by the sudden unloading of extremely stressed structures as a result of any dynamic influences. By modeling the destruction process using the finite element method, it has been established that long before cracks on the surfaces of structures can be visually identified, zones of hidden damage can actively spread inside the wall structures of buildings. The main parameters for monitoring the condition of buildings and structures using visual and vibroacoustic methods have been determined. Due to the fact that the object of research is the partial destruction of buildings and structures (that is, not the root cause, but the consequences of the influence of a complex of negative main factors), two main groups of risk factors for assess the risks of stability loss have been proposed. The first group is associated with the detection of external structural damage identified by visual inspection methods. The second group is associated with the detection of hidden damage, the parameters of which are determined by the vibroacoustic method. The integral risk of stability loss is determined by comparing and selecting the maximum risk in the group. **Scientific novelty.** The methodology for identifying hidden damage in structural elements of buildings and structures has been further developed, which is distinguished by taking into account the parameters of vibroacoustic control of the destruction consequences and assessing the risks of the structures stability loss. **Practical significance.** The research results make it possible to improve the method for assessing changes in the structure of the medium as a result of the occurrence of observed and hidden systems of cracks using vibroacoustic monitoring.

Keywords: *safety of buildings and structures; risks of stability loss; vibroacoustic control*

Постановка проблеми. Сьогодні Україна стикається з безпрецедентними викликами щодо безпеки критичної інфраструктури, будівель та споруд. В умовах надзвичайних ситуацій, які активуються динамічними впливами від вибухів, пожежами та землетрусами, необхідно проводити контроль стійкості та розрахунки ризиків об'єктів для оцінення їх придатності до подальшої експлуатації.

Моніторинг стану конструкцій надає корисну інформацію про цілісність та працездатність конструкції. Критичним аспектом будь-якої методології оцінки стійкості будівель та споруд стала діагностика, яка включає виявлення пошкоджень, локалізацію, класифікацію типу пошкодження або кількісну оцінку. Для цих цілей застосовуються моделі та експериментальні методи [1–5].

Для превентивного оцінення стійкості та можливості подальшої експлуатації будівель і споруд необхідно застосовувати методи неруйнівного контролю.

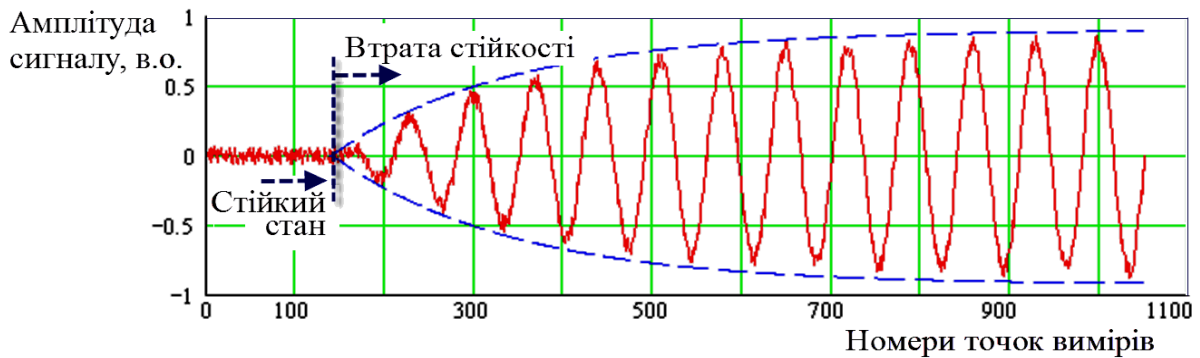
Для локалізації прихованих тріщин у товстих бетонних та інших монолітних конструкціях застосовуються методи віброакустичної діагностики [6–8].

Мета дослідження – забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд із

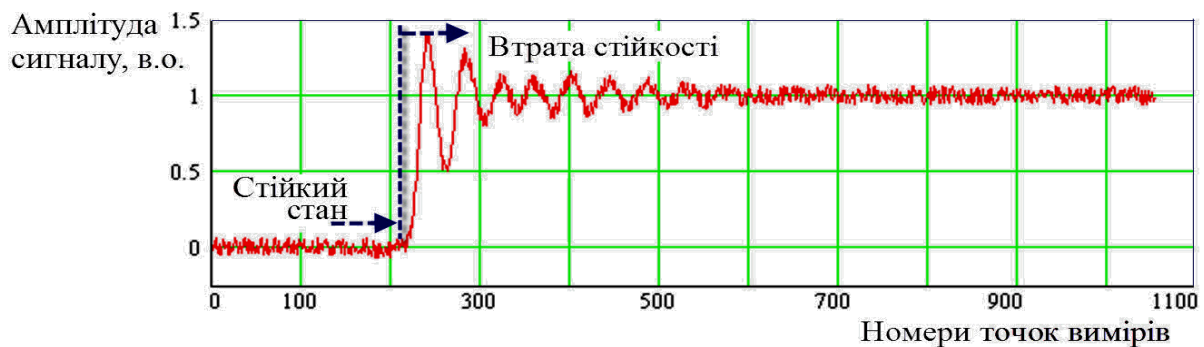
застосуванням методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої пошкодженості в будівельних конструкціях.

Результати досліджень. Безпека експлуатації будівель та споруд в першу чергу залежить від виникнення та розвитку процесів руйнування в бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементах несних конструкцій. Залежно від ступеня пошкодження втрата стійкості може бути м'якою або жорсткою [9]. За «м'якою» втрати стійкості обов'язково присутні фактори ризику, які часто пов'язані з допущеними під час проектування помилками, підтопленнями фундаментів або недотриманням правил експлуатації, що проявляються в поступовому ослабленні несних конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень.

У разі поступового ослаблення несних конструкцій через накопичення внутрішніх пошкоджень встановлюється коливальний періодичний режим, який супроводжується зростанням пошкодженості (кількості та величини тріщин) та на початковому етапі мало чим відрізняється від стану рівноваги (рис. 1, а).



a



б

Рис. 1. Зміна динамічної поведінки елементів будівель і споруд у процесі втрати стійкості: а – поступове ослабленні несних конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень; б – раптове розвантаження гранично-напружених конструкцій

Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості пошкоджень конструктивних елементів або раптового швидкого зростання тріщин, які активізуються зсувами основ будівель під час землетрусів або раповим розвантаженням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів.

Динамічні впливи можуть бути малої потужності (розриви іржавої арматури, наслідки пожеж) або потужними (перша хвиля або афтершоки землетрусів, що повторюються, вибухові хвилі). Впливи великої потужності особливо небезпечні через їх слабку прогнозованість та трагічні наслідки. Це спричиняє лавиноподібні обвалення конструкцій будівель, що втратили опору в результаті руйнування одного з поверхів.

У разі раптового розвантаження (за межею міцності) гранично-напружених конструкцій будівель і споруд втрата стійкості відбувається стрибком, коли

система переходить із стаціонарного режиму рівноваги в інший, як правило, коливальний періодичний режим, що встановився, але на іншому енергетичному рівні (рис. 1, б).

Слід зазначити, що за всіх типів втрата стійкості конструктивних елементів може відбуватися і без суттєвих візуально визначених пошкоджень. Тому для безпечної експлуатації будівель та споруд вирішальним стає не лише візуальне обстеження, а й своєчасний контроль прихованої пошкоженості та тріщинуватості в конструктивних елементах.

Утворення тріщин в елементах будівель і споруд відбувається внаслідок крихкого руйнування на мікро- або макрорівні. Тріщини відриву розвиваються у напрямі, перпендикулярному розтягуванню матеріалу. В результаті розвитку мікротріщин утворюються тріщини сколювання, які орієнтуються в напрямку максимального дотичного напруження під кутом до осі стиснення або розтягування.

Пошкодженість елементів конструкцій відбувається шляхом зростання мережі мікротріщин з формуванням областей непружних деформацій і магістральних тріщин.

Моделювання процесу руйнування методом скінченних елементів переконливо показало (рис. 2), що задовго до того, як

тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути ідентифіковані візуально, зони прихованої пошкодженості можуть активно розвиватися всередині стінових конструкцій будівель і споруд (для розрахунків використано обчислювальний комплекс «GEO-RS» [4]).

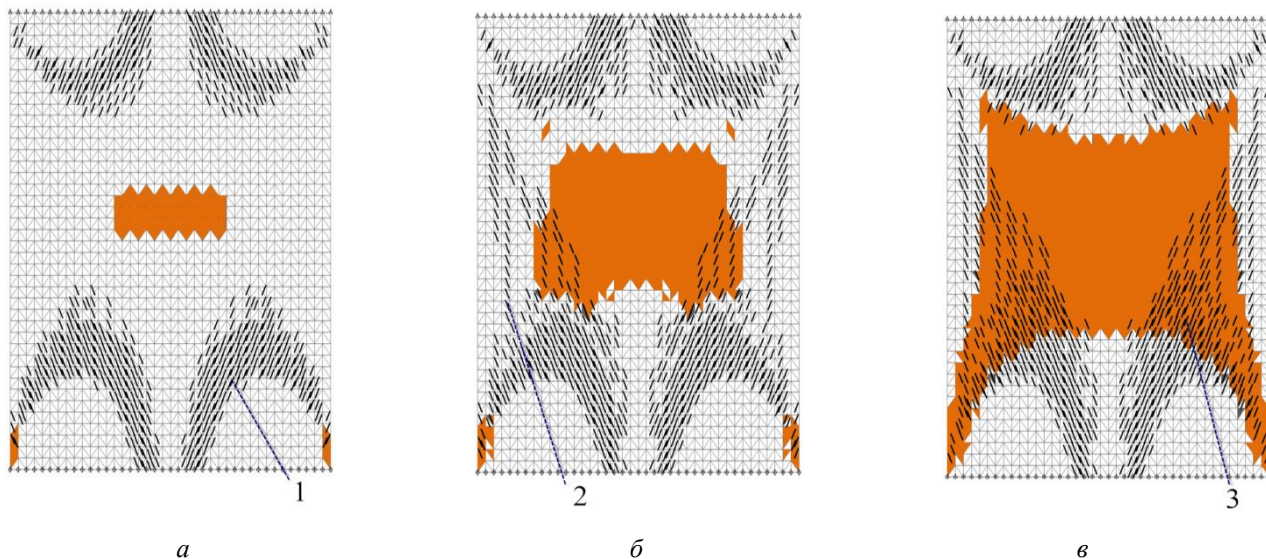


Рис. 2. Процес утворення тріщин у стінових конструкціях будівель і споруд при зростанні навантаження (а–в) за даними математичного моделювання напружено-деформованого стану: 1 – зони формування орієнтованих мікротріщин; 2 – об'єднання мікротріщин у спрямовані магістральні тріщини; 3 – об'єднання мікротріщин у пошкодженій зоні (поява можливості поверхневого сколу в нижній частині споруди)

Для превентивного оцінення стійкості будівель та споруд запропоновано віброакустичний метод контролю тріщинуватості та пошкодженості їх конструктивних елементів.

Основна особливість неруйнівного контролю полягає в тому, що він не повинен змінювати (погіршувати) вихідні механічні властивості об'єкта, тому силу удару підбирають мінімальною, для якої ударну хвилю можна вважати пружною. Однак цієї

енергії цілком достатньо для порушення коливальних у блокових структурах та будівельних конструкціях.

На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль (табл. 1), часу зіткнення та реальних розмірів дерев'яних, бетонних та металевих конструкцій цілісний об'єкт контролю можна віднести до системи з розподіленими параметрами, частково або повністю зруйнований – до систем із зосередженими параметрами [8].

Таблиця 1

Швидкості пружних хвиль у матеріалах будівель та споруд

Матеріал	Щільність $\rho \times 10^{-3}$, т/м ³	Швидкості хвиль v , м/с		Коефіцієнт Пуассона, μ	Модуль Юнга $E \times 10^{-10}$, Па
		поздовжніх	поперечних		
Бетон	2,3–2,5	3 800–4 400	2 100–2 400	0,25–0,33	2,5–3,8
Гіпс	2,2–2,4	4 700–5 100	2 200–2 600	0,30–0,40	3,3–5,7
Дерево	0,4–1,1	3 000–5 000	1 000–3 200	0,20–0,40	0,1–3,0
Залізо	7,8	5 850	3 230	0,28	21
Алюміній	2,7	6 260	3 080	0,34	6,8
Граніт	2,7–2,8	5 200–5 500	3 000–3 300	0,20–0,30	5,6–7,5
Мармур	2,6–2,8	5 300–5 500	2 800–3 200	0,24–0,33	5,5–7,5
Вапняк	2,6–2,7	3 100–4 700	2 000–3 100	0,11–0,22	3,5–6,3
Пісковик	2,2–2,7	2 200–4 600	1 800–2 400	0,15–0,30	1,6–5,0

Передній фронт акустичного сигналу завжди поширюється зі швидкістю поздовжніх хвиль, тобто з максимальною швидкістю. Розсіювальні властивості матеріалів залежно від довжини хвилі пояснюються шаруватістю та тріщинуватістю середовища, кристалічною будовою та температурним рухом частинок, мінливістю фізичних властивостей та речовинного складу, наявністю включень та порожнин, структурних блоків та плоскопаралельних структур.

Таким чином, утворюються класичні акустичні хвилеводи – ділянки середовища, обмежені в одному або двох напрямках порожнинами, тріщинами або іншими середовищами, внаслідок чого усувається або зменшується розбіжність хвиль у сторони, тому поширення їх уздовж шарів відбувається з меншим ослабленням, ніж у необмеженому однорідному або неоднорідному середовищі (рис. 3).

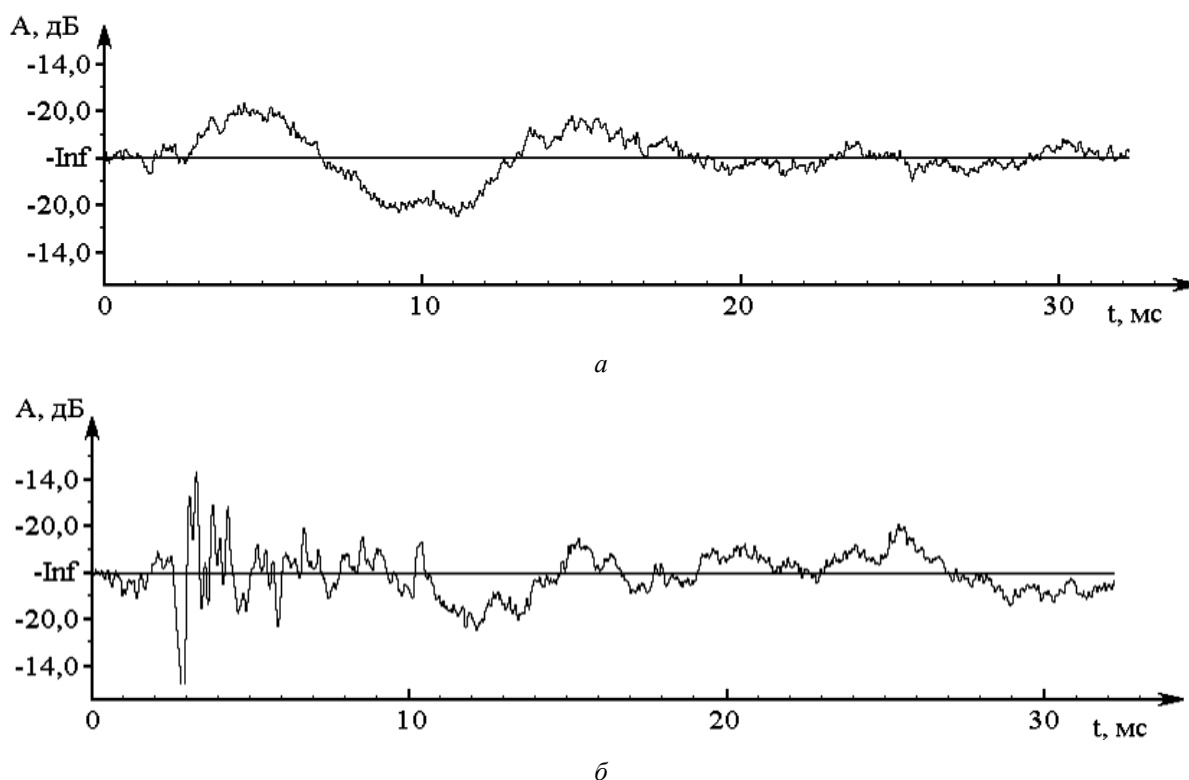


Рис. 3. Відмінність віброакустичних коливань в цілику (а) і в тріщинуватому середовищі (б) на прикладі гіпсової плити

Вид хвиль, що розповсюджуються в таких акустичних хвилеводах без зміни своєї структури, – нормальні хвилі (моди). Закриття тріщин, відшарувань у матеріалі однозначно переводить однорідну нормальну хвилю в неоднорідну, що експоненційно загасає, і навпаки.

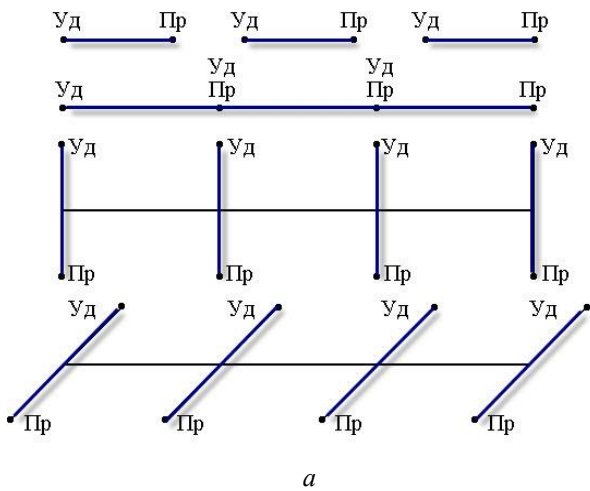
Для встановлення розміру зони тріщинуватості необхідно аналізувати осцилограми, одержані під час прозвучування на різних відстанях по довжині елемента конструкції. База прозвучування повинна залишатися постійною, оскільки зі збільшенням відстані максимум спектральної щільності внаслідок

різного поглинання на високих та низьких частотах зміщується переважно у бік низьких частот.

Для ідентифікації пошкодженості будівель і споруд апробовано методи віброакустичного профілювання та зондування. На рисунку 4 показано методи поздовжнього та взаємоперпендикулярного профілювання на одній або різних рівновеликих базах.

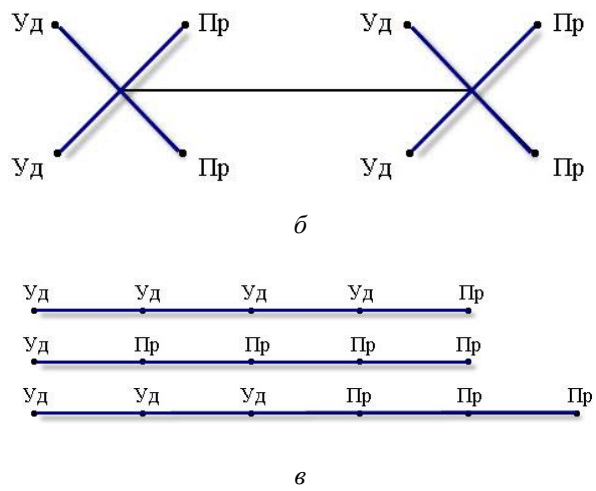
Поздовжнє акустичне профілювання може виконуватися вздовж криволінійного профілю, наприклад, уздовж криволінійної несної конструкції. Детальність контролю (крок, база) визначаються поставленим

завданням, конкретними умовами та його



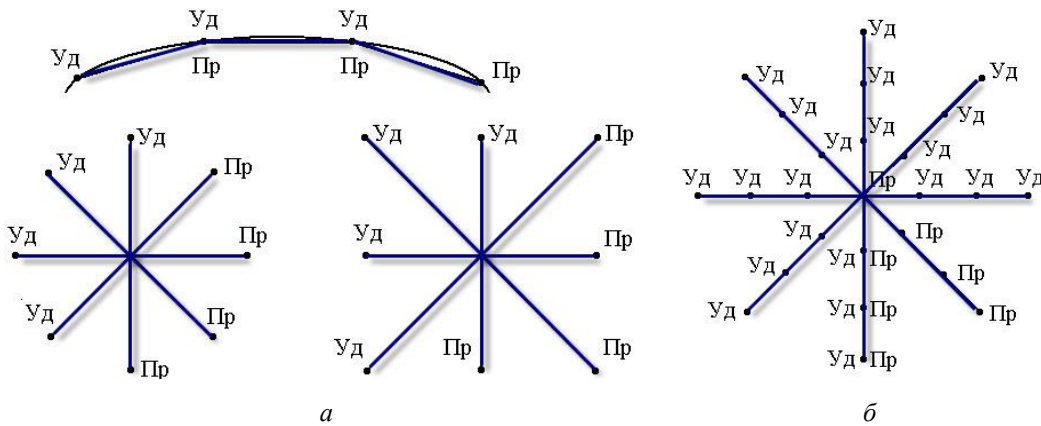
а

мінливістю.

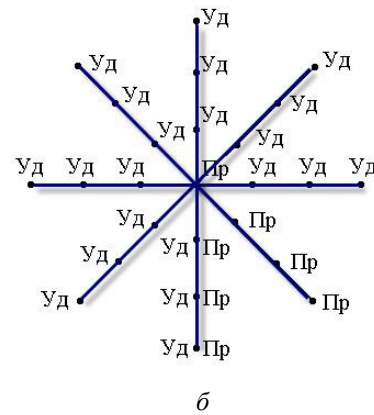


б

Рис. 4. Методи вібраакустичного контролю пошкодження будівель та споруд: векторне (а), квадрупольне (б) та кругове (в) профілювання



а



б

Рис. 5. Методи вібраакустичного зондування конструктивних елементів будівель та споруд: лінійне (а) та кругове (б)

Для оцінення тріщинуватості ефективний метод акустичного каротажу. Визначення просторового розташування тріщин найперспективніше за допомогою відбитих хвиль. Тріщинуваті зони чітко виділяються з порушенням кореляції фазових ліній. Швидкості поздовжніх хвиль в інтервалі тріщинуватості практично не змінюються.

На рисунку 5 показано методи вертикального акустичного зондування з трьома можливими варіантами. Вертикальне акустичне зондування відрізняється методикою його проведення та інтерпретацією результатів вимірів. Наприклад, заміна місць удару та прийому акустичних коливань може повністю змінити результати показань приладу на протилежні. Глибина контролю залежить від

величини бази, оцінення переважно здійснюється у зоні приймача.

Тріщинуваті або зруйновані ділянки будівель і споруд характеризуються безліччю взаємопов'язаних параметрів, що випадково змінюються, тому для їх вивчення необхідний статистико-ймовірнісний підхід. Це дає можливість отримувати інтегральні параметри середовища на основі аналізу системи статистичних оцінок з певною довірчою ймовірністю та точністю. Тому, за винятком великих тріщин, метод ультразвукового прозвучування визначатиме деяку усереднену тріщинуватість з урахуванням пористості та структурних неоднорідностей.

Визначимо основні завдання методики контролю стану будівель та споруд. Основні завдання попередніх спостережень

полягають в оціненні зовнішніх пошкоджень елементів конструкцій, визначенні меж найбільш небезпечних зон, визначенні можливості використання методів неруйнівного контролю, уточненні особливих вимог щодо техніки безпеки.

Для отримання оперативної інформації про стан будівель та споруд необхідно

здійснювати комплекс заходів щодо контролю параметрів, які адекватно визначають стійкість об'єктів. До цих параметрів належать деформації конструкцій, тріщини та відколи в елементах будівель та споруд (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри контролю стану будівель та споруд візуальним та віброакустичним методами

Методи контролю	Процеси, що контролюються	Параметр контролю та ідентифікації
Спостереження за станом будівель і споруд	Зовнішні пошкодження	- зміщення і деформації елементів конструкцій у місці пошкодження; - межі найбільш небезпечних зон, що візуально спостерігаються
Спостереження за руйнуваннями	Магістральні тріщини та вивали матеріалів	- розкриття і протяжність тріщин; - об'єми, розташування та ступінь небезпеки вивалів будівельних матеріалів
Нівелювання	Зміщення елементів конструкцій	- взаємні зсуви та зміщення елементів конструкцій
Віброакустичний контроль конструктивних елементів	Приховані пошкодження, межі відшарувань	- розташування та ступінь небезпеки прихованих пошкоджень; - глибина, поздовжній та поперечний розміри відшарувань

За необхідності визначення прихованої порушеності елементів конструкцій або недостатнього об'єму даних виконується віброакустичний контроль.

Ця методика ефективна, оскільки структурні порушення і руйнування, що відбуваються в будівлях і спорудах, можуть бути зафіксовані значно раніше, ніж проявляються візуально.

За допомогою віброакустичного методу реєструються частота, амплітуда та час коливань. Оцінення результатів проводиться у разі найбільшої з амплітуд коливань у частотних смугах, що відображається індикатором спектра.

Приклад віброакустичного профілювання показано на рисунку 6, де визначені ділянки із зонами прихованих тріщин та пошкоджень у бетоні.

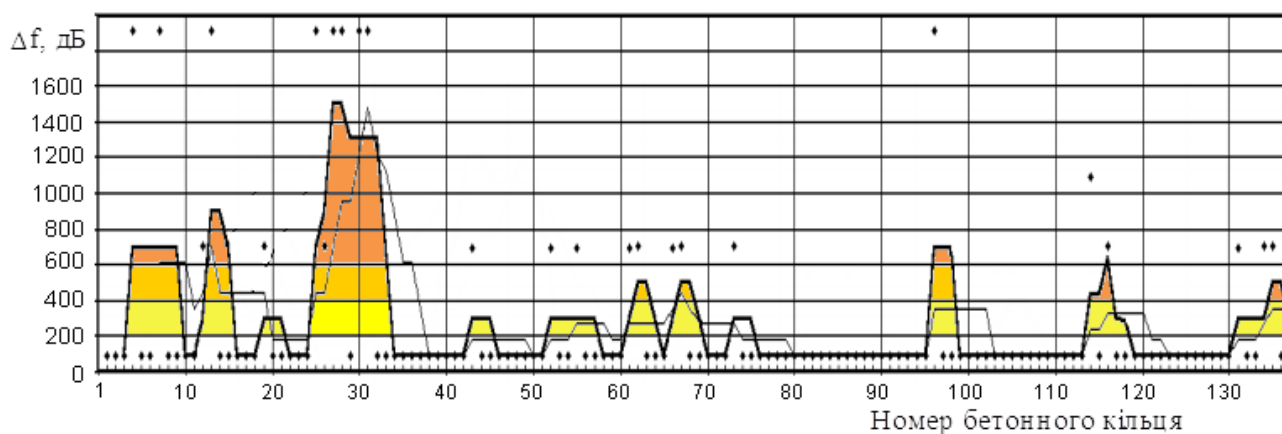


Рис. 6. Приклад зміни частот спектральної щільності акустичних відгуків бетонних конструкцій

Оскільки розбиті тріщинами являють собою плоскопаралельну конструктивні елементи споруд найчастіше структуру, в замкнутій системі (при $\lambda < 2a/n$,

де λ – довжина хвилі, м; n – номер моди; a – ширина хвилеводу, м) виникають резонансні коливання внаслідок багаторазового відбиття звукових хвиль від берегів тріщин. Тому можна визначити глибини меж зон тріщиноутворення за критичними частотами перших резонансних мод однорідних хвиль, які виникають за ударного впливу:

$$a = \frac{v_s \cdot n}{2f_r}, \quad (1)$$

де a – глибина відшарування, м; v_s – швидкість зсувних хвиль, м/с; f_r – резонансна частота, Гц.

Таким чином, під час моніторингу віброакустичним методом устанавлюються межі зон підвищеної тріщинуватості в конструктивних елементах будівель та споруд, які служать, у тому числі, і для уточнення результатів візуальних спостережень та зовнішніх оглядів.

Стан будівель та споруд у процесі експлуатації змінюється. Наслідки часткових руйнувань, як зазначено вище, можуть бути зафіксовані за допомогою візуальних спостережень та віброакустичного моніторингу. До найважливіших показників, за якими можна оцінити безпеку контрольованого об'єкта, належать ризики, що визначаються як ймовірність виникнення аварій та передбачуваних наслідків. Ризики пов'язані з небажаними подіями, зокрема, з втратою стійкості об'єкта контролю або раптових обвалів несних конструкцій за фіксований період часу.

Використання ризиків для оцінення ступеня небезпеки – загальноприйнятий метод, який покладено в основу оцінення поточного та прогнозованих станів небезпеки контрольованої системи. Для наших умов розрахунків цих показників виконується за абсолютними значеннями фіксованих параметрів моніторингу (див. табл. 2) та за швидкістю їх зміни за проміжок часу, що допомагає запобігти несприятливим подіям на основі існуючих даних.

Для визначення комплексних показників оцінки безпеки використано модель інтегрованого ризику. У зв'язку з

тим, що об'єктом досліджень стало часткове руйнування будівель та споруд (тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів), для оцінення ризиків втрати стійкості прийнято дві основні групи факторів ризику.

Перша група чинників пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Через те, що критичними можуть бути пошкодження, що визначаються параметрами з обох груп, максимальний ризик ідентифікується шляхом порівняння і вибору максимального значення ризику в групі:

$$R(F)^v = k_1^v R(F_1)^v + k_2^v R(F_2)^v + \dots + k_i^v R(F_i)^v$$

∨

$$R(F)^a = k_1^a R(F_1)^a + k_2^a R(F_2)^a + \dots + k_j^a R(F_j)^a, \quad (2)$$

де $R(F_i)$, $R(F_j)$ – ризики виникнення аварійної ситуації від факторів, що визначаються візуальним і віброакустичним методами, відповідно; i, j – кількість параметрів; k_1^v , k_1^a – нормалізовані коефіцієнти від 0 до 1 (в сумі дорівнюють одиниці) впливу на ризик окремих чинників групи.

Показники ризиків дозволяють дати оперативну оцінку безпеки конструктивних елементів будівель та споруд.

Висновки

Для превентивного оцінення стійкості та можливості подальшої експлуатації будівель і споруд:

1. Втрата стійкості бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементів несних конструкцій може бути м'якою або жорсткою. За м'якої втрати стійкості обов'язково присутні фактори ризику, які проявляються в поступовому ослабленні несних конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень.

Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості конструктивних елементів або швидкого зростання тріщин,

які активізуються раптовим розвантаженням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів через розриви іржавої арматури, пожежі, хвилі або афтершоки землетрусів, вибухових хвиль.

2. Моделюванням процесу руйнування методом скінченних елементів встановлено, що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути ідентифіковані візуально, зони прихованої пошкодженості можуть активно розвиватися всередині стінових конструкцій будівель і споруд. Елементи конструкцій пошкоджуються зростанням мережі мікротріщин із формуванням областей непружних деформацій і магістральних тріщин.

3. Визначено основні завдання методики і параметри контролю стану будівель та споруд візуальним та віброакустичним методами. Під час моніторингу віброакустичним методом встановлюються межі зон підвищеної тріщинуватості в конструктивних елементах будівель та

споруд, які служать, у тому числі, і для уточнення результатів візуальних спостережень та зовнішніх оглядів.

4. У зв'язку з тим, що об'єктом досліджень стало часткове руйнування будівель та споруд (тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів), для оцінення ризиків втрати стійкості запропоновано дві основні групи факторів ризику. Перша група пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Інтегральний ризик втрати стійкості визначається шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групі.

Результати досліджень дозволяють удосконалити метод оцінення зміни структури середовища внаслідок виникнення спостережуваних і прихованих систем тріщин за допомогою віброакустичного моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Azimi M., Eslamlou A., Pekcan G. Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: state-of-the-art review. *Sensors*. 2020. Vol. 20 (10). Pp. 2778.
2. Wegerich S. W. Similarity based modeling of time synchronous averaged vibration signals for machinery health monitoring. In: In IEEE aerospace conference proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720). Big Sky, MT, USA, 3-6 March 2004. Vol. 6. Pp. 3654–3662.
3. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Pp. 012010.
4. Slashchov I. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. Pp. 00094.
5. Slashchova O. A., Yalanskyi O. A., Slashchov A. I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources: 3rd International Sci. and Tech. Conf.: book of abstracts*. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 2020. Pp. 126–127.
6. Singh A. K., Chen B., Tan V. B. et al. A theoretical and numerical study on the mechanics of vibro-acoustic modulation. *The J Acoust Soc America*. 2017. Vol. 141 (4). Pp. 2821–2831.
7. Karve P., Miele S., Neal K. et al. Vibro-acoustic modulation and data fusion for localizing alkali – silica reaction – induced damage in concrete. *Struct Heal Monit*. 2020. Vol. 19. Pp. 1905–1923.
8. Яланський О. А., Беліков А. С., Барабанов С. С., Слащова О. А., Іконніков М. Ю. Ідентифікація геомеханічних та геотехнічних структур віброакустичним методом для систем автоматизованого контролю стійкості наземних споруд та гірничих виробок. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2023. № 2 (53). С. 101–109.
9. Sheriff R. E., Geldart L. P. *Exploration Seismology: 2nd edition*. Cambridge University Press. Online publication date: June 2012. P. 592.

REFERENCES

1. Azimi M., Eslamlou A. and Pekcan G. Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: state-of-the-art review. *Sensors*. 2020, vol. 20 (10), p. 2778. URL: <https://doi.org/10.3390/s20102778>

2. Wegerich S.W. Similarity based modeling of time synchronous averaged vibration signals for machinery health monitoring. In: In IEEE aerospace conference proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720), Big Sky, MT, USA, 3-6 March 2004, vol. 6, pp. 3654–3662. URL: <https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368182>
3. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 970, p. 012010. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>
4. Slashchov I. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, p. 00094. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900094>
5. Slashchova O.A., Yalanskyi O.A. and Slashchov A.I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. Innovative Development of Resource-saving Technologies and Sustainable Use of Natural Ources : 3nd International Sc. and Tech. Conf. Book of Abstracts. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020, pp. 126–127. URL: <https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/1>
6. Singh A.K., Chen B., Tan V.B. et al. A theoretical and numerical study on the mechanics of vibro-acoustic modulation. The J. Acoust Soc America. 2017, vol. 141 (4), pp. 2821–2831. URL: <https://doi.org/10.1121/1.4981133>
7. Karve P., Miele S., Neal K. et al. Vibro-acoustic modulation and data fusion for localizing alkali–silica reaction–induced damage in concrete. Struct Heal Monit. 2020, vol. 19, pp. 1905–1923. URL: <https://doi.org/10.1177/1475921720905509>
8. Yalanskyi O., Byelikov A., Barabanov S., Slashchova O. and Ikonnikov M. *Identyfikatsiya heomekhanichnykh ta heotekhnichnykh struktur vibroakustychnym metodom dlya system avtomatyzovanoho kontrolyu stiykosti nazemnykh sporud ta hirnychykh vyrobok* [Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings]. *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu* [Journal of Donetsk Mining Institute]. 2023, no. 2 (53), pp. 101–109. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109> (in Ukrainian).
9. Sheriff R.E. and Geldart L.P. Exploration Seismology. 2nd edition. Cambridge University Press. Online publication date: June 2012, p. 592. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168359>

Надійшла до редакції: 10.02.2024.