УДК 622.834.5:614.8.01
DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.31.1126

УДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРОАКУСТИЧНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЮ ПОШКОДЖЕНОСТІ ГЕОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

БЄЛІКОВ А. С.[1], *докт. техн. наук, проф.,*
СЛАЩОВ І. М.[2*], *докт. техн. наук, с. н. с.,*
КОРОТАЄВ В. М.[3], *канд. юрид. наук,*
БАРАБАНОВ С. С.[4] *канд. техн. наук, ас.,*
ДЕМЧЕНКО В. В.[5] *магістр, асп.*

[1] Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682
[2*] Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2432-9092
[3] Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ України, Тупик Будівельний, 1, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 732-16-93, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389
[4] Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X
[5] Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: demchenko.pdaba@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-1596-1010

Анотація. ***Постановка проблеми.*** Методика віброакустичного контролю вимагає подальшого вдосконалення, особливо в частині встановлення зв'язків між вимірюваними діагностичними параметрами та характерними дефектами структури середовища. Необхідна інтеграція даних і розробка показників ризику втрати стійкості геотехнічної системи для автоматичного розпізнавання дефектів, з урахуванням застосування саме віброакустичного методу. ***Мета дослідження.*** Удосконалення метода віброакустичного контролю руйнування споруд і пошуку локалізації тріщин в гірничих виробках, підземних і заглиблених спорудах різного призначення. ***Методика.*** Аналіз та узагальнення експериментальних даних віброакустичної діагностики, аналітичні методи класичної теорії хвиль. ***Результати.*** Розглянуті: передумови застосування та основні параметри віброакустичного методу контролю геотехнічних споруд; особливості використання методики віброакустичного контролю для оцінки пошкодженості елементів геотехнічної системи; методи інтерпретації результатів віброакустичної діагностики; оцінка ризиків втрати стійкості геотехнічних споруд віброакустичним методом. Для визначення тріщин і пошкоджень в гірничих виробках, підземних і заглиблених спорудах різного призначення встановлені і систематизовані зв'язки основних параметрів віброакустичної діагностики (амплітуди, тривалості та частоти максимуму спектральної щільності сигналу) з характерними дефектами та пошкодженнями елементів геотехнічної системи. Удосконалено і розширено метод оцінки зміни структури середовища та втрати стійкості аварійно небезпечних об’єктів внаслідок виникнення систем тріщин в процесі їх експлуатації. Визначено поточні і комплексні показники ризику втрати стійкості геотехнічної системи за результатами виявлення зовнішніх та прихованих структурних пошкоджень методами візуальної і віброакустичної діагностики. Це дозволяє контролювати структурні порушення та ряд інших критично значущих параметрів, які впливають на безпеку експлуатації споруд, оцінити ризики втрати стійкості геотехнічної системи та своєчасно провести ремонтні роботи. ***Наукова новизна.*** Подальший розвиток отримав метод віброакустичного контролю руйнування споруд, що відрізняється урахуванням зв'язків між діагностичними параметрами та характерними дефектами структури середовища, а також показників ризиків втрати стійкості геотехнічної системи. ***Практична значимість.*** Розроблено і впроваджено рекомендації щодо застосування віброакустичного методу для пошуку тріщин у виробках та спорудах.

Ключові слова: *геотехнічні споруди; віброакустична діагностика; методи пошуку локалізації тріщин; ризики втрати стійкості*

IMPROVING THE VIBROACOUSTIC METHOD FOR CONTROL OF DAMAGE TO GEOTECHNICAL STRUCTURES

BIELIKOV A.S.[1], *Dr. Sc. (Tech.), Prof.,*
SLASHCHOV I.M.[2*], *Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.,*
KOROTAIEV V.M.[3], *Ph.D. (Juridical),*
BARABANOV S.S.[4], *Ph.D. (Tech), Ass.,*
DEMCHENKO V.V.[5], *Master of Sc., Doct. Stud.*

[1] Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682
[2*] Department of Mining at Great Depths, The M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Simferopolska Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2432-9092
[3] Dnipropetrovsk Scientific Research Forensic Center of the MIA (Ministry of Internal Affairs) of Ukraine, 1, Budivelniy Dead End, Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 732-16-93, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389
[4] Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X
[5] Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, email: demchenko.pdaba@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-1596-1010

Abstract. ***Problem statement.*** The vibroacoustic monitoring method requires further improvement, especially in establishing clear links between the measured diagnostic parameters and characteristic defects of the environment structure. It is necessary to integrate data and develop risk indicators of the geotechnical system stability loss for automatic recognition of defects, taking into account the use of the vibroacoustic method. ***Purpose of the study.*** Improvement of the vibroacoustic method for structures destruction control and search of the cracks localization in mine workings, underground and deep structures of various purposes. ***Methods.*** Analysis and generalization of experimental data of vibroacoustic diagnostics, analytical methods of classical wave theory. ***Research results.*** The following are considered: prerequisites and main parameters of the vibroacoustic method of monitoring geotechnical structures; features of using the vibroacoustic monitoring technique to assess the damage of elements of a geotechnical system; methods for interpreting the results of vibroacoustic diagnostics; assessment of the stability loss risks of geotechnical structures using the vibroacoustic method. To determine cracks and damage in mine workings, underground and deep structures of various purposes, the relationships between the main parameters of vibroacoustic diagnostics (amplitude, duration and frequency of the signal maximum spectral density) with characteristic defects and damage to elements of the geotechnical system have been established and systematized. The method for assessing changes in the structure of the environment and the loss of hazardous objects stability as a result of the occurrence of crack systems during their operation has been improved and expanded. Current and complex indicators of the geotechnical system loss stability risk have been determined based on the results of the external and hidden structural damage detection using visual and vibroacoustic diagnostics. This allows monitoring structural damage and a number of other critical parameters that affect the safety of the structures operation, assessing of the geotechnical system stability loss risks and carrying out repair work in a timely manner. ***Scientific novelty***. The method of the structures destruction vibroacoustic control was further developed, which is distinguished by taking into account the relationships between diagnostic parameters and characteristic defects in the structure of the environment, as well as indicators of the geotechnical system stability loss risks. ***Practical significance.*** Recommendations for using the vibroacoustic method for cracks searching in workings and structures have been developed and implemented.

Keywords: *geotechnical structures; vibroacoustic diagnostics; methods of searching for crack localization; risks of loss of stability*

Постановка проблеми. В умовах суттєвого збільшення кількості та інтенсивності надзвичайних ситуацій у геотехнічних спорудах, спричинених динамічними впливами від вибухів, пожежами, землетрусами, а також технологічними аваріями необхідність проведення контролю стійкості стає першочерговим завданням. Це важливо для забезпечення не тільки безпеки людей, але й запобігання економічним втратам, спричиненим руйнуванням об'єктів та інфраструктури. Контроль стійкості дозволяє виявляти потенційні зони ризику,

оцінювати поточний стан об'єктів та прогнозувати їхню поведінку в умовах довготривалих експлуатаційних навантажень.

Ця проблема особливо актуальна для таких об'єктів, як гірничі виробки, інфраструктурні вузли (наприклад, мости та дороги), виробничі цехи, тунелі, поглиблені споруди, житлові будинки та допоміжні споруди. Вплив на стійкість споруд різних факторів потребує комплексного підходу, що включає, насамперед, сучасні технології неруйнівного моніторингу, аналітичні моделі та методи аналізу результатів.

Для пошуку локалізації тріщин в спорудах різного призначення використовуються методи віброакустичної діагностики [1−5]. Роль віброакустичного методу неруйнівного контролю геотехнічних об'єктів має кілька незаперечних переваг. Насамперед, метод не вимагає руйнування або пошкодження досліджуваних конструкцій, що дозволяє проводити діагностику без зупинки експлуатації об'єктів або додаткових витрат на їх відновлення. Також віброакустичний метод має високу чутливість до дефектів, що дозволяє виявляти мікротріщини, зони ослабленого зчеплення, внутрішні порожнечі та інші приховані дефекти, які не помітні під час візуального або стандартного технічного огляду. Ці переваги роблять віброакустичний метод одним із ключових інструментів для забезпечення надійності та безпеки геотехнічних об'єктів, особливо в умовах зростаючих вимог до довговічності та експлуатаційної придатності інфраструктури.

Однак методика віброакустичного контролю вимагає подальшого вдосконалення, особливо в частині встановлення чітких зв'язків між вимірюваними діагностичними параметрами та характерними дефектами структури середовища. Це зв’язано з кількома основними чинниками, які вимагають подальшого вдосконалення методу.

Насамперед слід розширювати можливості методу з урахуванням унікальності акустичних властивостей різних матеріалів (гірських порід, бетонів). По-друге, для підвищення точності визначення тріщин та інших структурних пошкоджень (особливо на критично важливих об'єктах) необхідна інтеграція віброакустичного методу з іншими методами діагностики (наприклад, з візуальним та ультразвуковим контролем). Комбінування з іншими діагностичними підходами потребує розробки алгоритмів інтеграції даних та інтерпретації результатів комплексного моніторингу. По-третє, для ідентифікації характерних дефектів потрібно розширення бази даних акустичних сигналів [6; 7], що відповідають певним видам дефектів (тріщинам, зонам ослаблення або порожнечам). Ідентифікація пошкодженості споруд та розробка комплексних показників ризику втрати стійкості геотехнічної системи дозволяє розвивати методи автоматичного розпізнавання дефектів на основі аналізу вхідних сигналів.

Мета дослідження – удосконалення метода віброакустичного контролю руйнування споруд і пошуку локалізації тріщин в гірничих виробках, підземних і заглиблених спорудах різного призначення.

Результати досліджень.

1. Передумови застосування та основні параметри віброакустичного методу контролю геотехнічних споруд.

Віброакустичний метод засновано на реєстрації коливань об'єктів, що виникають під дією удару. Коливання фіксують сейсмоприймачами. До виконання віброакустичних досліджень проводиться візуальний огляд об’єкту контролю.

Віброакустична діагностика може бути включена в технологічний процес для запобігання раптовим обвалам та своєчасного виявлення тріщин або порожнин.

На ділянках з просіданнями підошви або фундаменту, віброакустичний метод використовується, у тому числі, для відносної оцінки розподілу напружень.

Основні параметри віброакустики:

- тривалість коливального процесу;
- максимальна амплітуда коливань;

- спектральний склад отриманих коливань.

Відгук компонента системи «кріплення – порода» на ударне збудження залежить від резонансу та згасання пружних коливань у породі або конструкції. Наявність порожнин і тріщин викликає збільшення амплітуди та тривалості коливань, а також появі резонансних піків у спектрі.

Слід відзначити, що глибина дослідження прямо пропорційна потужності ударного впливу та відстані між точкою збудження та точкою прийому. При цьому база контролю вибирається не меншою за товщину досліджуваного об’єкта.

Дефекти матеріалу в елементах геотехнічної системи проявляються рядом характерних змін параметрів пружних коливань. Серед них – зниження амплітуди та тривалості коливань, що вказує на порушення цілісності матеріалу. Одночасно спостерігається зсув піку спектральної щільності в область нижчих частот, що свідчить про перерозподіл пружних властивостей матеріалу.

Ослаблення зв'язку між бетонними або залізобетонними блоками призводить до суттєвого зниження амплітуди коливань, що ускладнює передачу енергії удару від одного елемента до іншого. Це може бути результатом тріщин, розривів чи погіршення якості контакту сполучних шарів. Крім того, збільшення напружень впливає на динамічні характеристики коливань. Це пояснюється зміною внутрішніх механічних властивостей матеріалу під дією навантажень, що може бути корисним індикатором для оцінки стану конструкції та виявлення зон потенційної руйнації.

2. Особливості використання методики віброакустичного контролю для оцінки пошкодженості геотехнічної системи.

Методи віброакустичного профілювання та зондування, як правило, використовуються для ідентифікації пошкодженості гірського масиву, підземних виробок, заглиблених та інших геотехнічних споруд. На рисунку 1, *а* показано схеми поздовжнього та взаємноперпендикулярного профілювання на одній або різних рівновеликих базах. Поздовжнє акустичне профілювання може виконуватися вздовж криволінійного профілю, наприклад, уздовж криволінійного елемента споруди. Детальність контролю (крок, база) визначаються поставленим завданням.

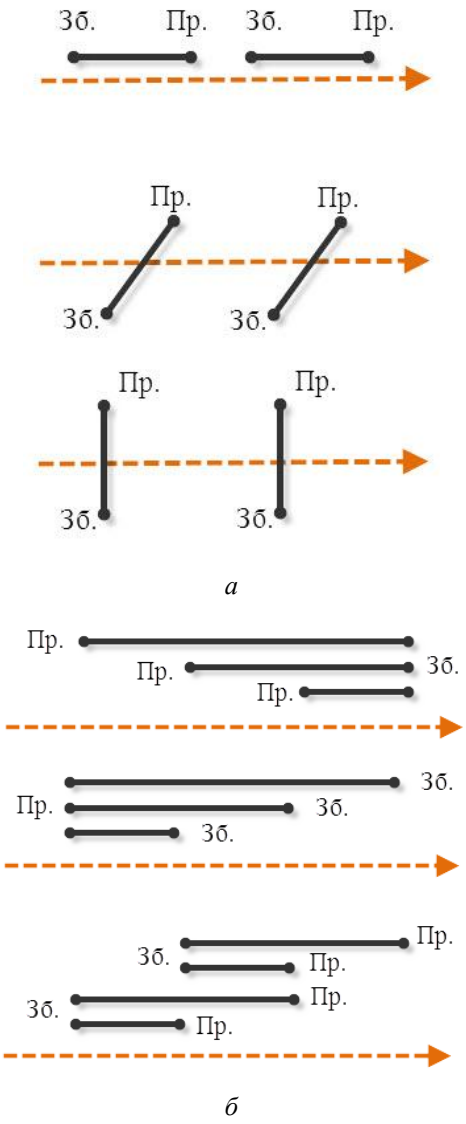

Рис. 1. Схеми віброакустичної діагностики геотехнічної системи: а – профілюванням; б –зондуванням у глибину

На рисунку 1, *б* показані схеми віброакустичної діагностики – профілюванням і зондуванням у глибину зі зміщенням збурювача (на схемі – «Зб.»), приймача (на схемі – «Пр.»).

Вимірювання виконуються після вибору та розмітки початкової точки. На ділянці, що обстежується, відзначають профілі з встановленим лінійним кроком (наприклад, 1 м), інші профілі прокладаються

паралельно з таким же кроком у вертикальній площині. Для виявлення прихованих дефектів в окремих складових геотехнічної системи або ділянок з нещільним механічним зв'язком дослідження проводять у вузлах сформованої сітки. База контролю послідовно зсувається на один крок до охоплення всієї зони обстеження. Для оцінки якості механічного зв'язку між елементами кріплення або визначення глибини тріщини, базу контролю обирають симетричною щодо тріщини чи межі розділу елементів.

При обстеженні ділянок бетонних блоків або тюбінгів, які мають регулярну структуру, діагностика може виконуватися для кожного елемента окремо. Це дозволяє більш точно діагностувати стан кожного елемента та сприяє покращенню точності оцінки всієї геотехнічної системи. При цьому крок контролю визначається кроком установки кріплення. При оцінці якості кріплення або стійкості оголення профілі проводять так, щоб вони перетинали тріщинуваті ділянки та інші прояви деформування.

Первинна реєстрація показників щодо кожного профілю здійснюється на схемі перерізу. Крім встановлення середнього значення, на схемі відображаються візуально виявлені структурні дефекти. Приклад приведено на рисунку 2.

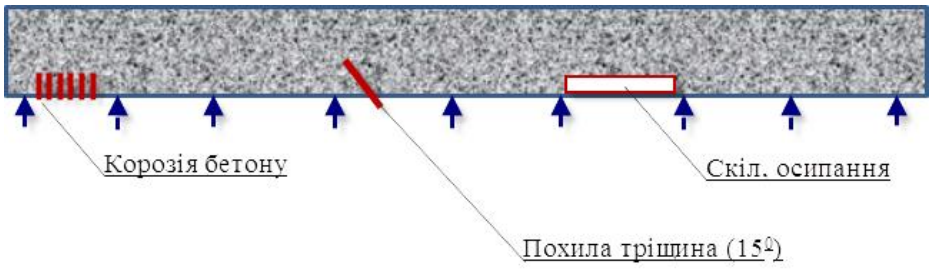

Рис. 2. Приклад реєстрації результатів віброакустичної діагностики

Віброакустичним методом визначають амплітуди коливань, які характеризують стан об’єкту. виміри повторюють з періодичністю 2−4 рази на рік, залежно від інтенсивності зростання сколів, осипань, внутрішніх дефектів і тріщин. За отриманими даними виконують діаграми зміни напружень та зростанн пошкодженості.

Якщо є така потреба, може бути здійснена оцінка якості закладення армування. Такий контроль виконується за варіантами: завдання удару і прийом коливань на розстрілах армування; нанесення удару по армуванню, а прийом коливань з поверхні кріплення; нанесення удару по поверхні кріплення та прийом коливань на армуванні. Вибір варіанта залежить від інформативності апаратури, що застосовується, маси армованих елементів, варіанта їх кріплення. Найбільш продуктивний перший варіант, але при відпрацюванні первинної методики випробовуються всі три варіанти.

Переваги віброакустичного методу для оцінки якості встановленого кріплення базуються на високій оперативності, об'єктивності та неруйнівному характері контролю. Зокрема, оцінка якості набризкбетонного кріплення здійснюється методом поздовжнього профілювання по контуру взаємно перпендикулярним профілями. Ефективність значно покращується, якщо перед нанесенням бетону здійснити контроль якості оборки віброакустичним методом.

Оцінка пошкодженості незакріплених ділянок гірничих виробок, тунелів та інших заглиблених споруд виконується з метою оперативного виявлення заколів та тріщин з подальшою оборкою. Вибір точок діагностики здійснюється за місцем проведення робіт. Результати діагностики не документуються. Виняток становлять ділянки явних структурних порушень, які

при подальшій експлуатації можуть мати негативний вплив на стійкість гірничих виробок і споруд.

3. Інтерпретація результатів віброакустичної діагностики.

Функціональний зв'язок інформативних параметрів віброакустичної діагностики і типових дефектів та пошкоджень гірничих виробок і підземних споруд представлена в таблиці 1.

Базові значення інформативних параметрів, з якими необхідно порівнювати отримані результати, залежать від типу використовуваних засобів та виду кріплення гірничих виробок і підземних споруд.

Таблиця 1

Зв'язок основних параметрів віброакустичної діагностики і характерних дефектів та пошкоджень елементів геотехнічної системи

Параметр, вид дефекту	Амплітуда	Тривалість	Частота максимуму спектральної щільності
Приховані порожнини та тріщини	зростає	зростає	знижується
Ділянки заколоутворення	зростає	зростає	може бути кілька максимумів
Нещільний контакт або наявність порожнеч	зростає	зростає	дещо знижується
Низька якість матеріалу	знижується	знижується	знижується
Високий рівень напружень без руйнування	знижується	знижується	дещо зростає
Збільшення напружень	зменшується	незначно зменшується	в діапазоні частот (0,06–0,6) кГц
Зменшення напружень	збільшується	зростає	

Параметри попередньо визначаються на непорушених ділянках. На кожній ділянці беруть не менше десяти точок. Базові значення параметрів розраховують шляхом знаходження середнього арифметичного по всій сукупності вимірів. Якщо неможливо попередньо провести таріровку на еталонних ділянках усі отримані дані усереднюють і аномальними вважають значення, що відрізняються від середнього більш ніж на 30 %. При використанні віброакустичного методу реєструється амплітуда, частота та час коливань. Оцінка результатів проводиться у разі найбільшої з амплітуд коливань у частотних смугах, що відображається індикатором спектра.

На основі матеріалів з окремих розрізів будується розгортка поверхні досліджуваної ділянки. З урахуванням результатів візуальних та інструментальних спостережень виконується інтерпретація сукупності даних. Після виділення точок з аномальними значеннями параметрів, їх об'єднують в аномальну ділянку з певною ознакою та наносять на план, як показано на рисунку 3. Рисунок супроводжується короткою текстовою частиною про особливості гірничої виробки або заглибленої споруди, прояви аномалій та умови у випадку коли вони не можуть бути відображені графічно. За результатами віброакустичної діагностики складається узагальнююча текстова частина, яка включається до складу висновку комісії, що проводить комплексне обстеження. Узагальнюючі результати подають за спеціальною формою.

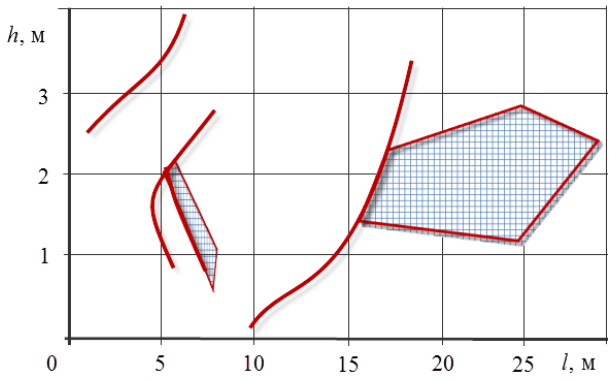

Рис. 3. Схема подання результатів віброакустичної діагностики із зазначенням тріщин, заколів які візуально спостерігаються та ділянок прихованих систем тріщинуватості

4. Оцінка ризиків втрати стійкості геотехнічних споруд віброакустичним методом.

Ризики раптових обвалів гірських порід, несучих конструкцій або загальної втрати стійкості геотехнічної системи за фіксований період часу є наслідками впливу комплексу негативних природних та техногенних факторів [3−5; 8]. Критичними для втрати стійкості будь-якого елемента геотехнічної системи є пошкодження, що можуть бути визначені за зовнішніми признаками або за параметрами контролю внутрішнього стану об'єкта контролю [5; 7−11]. Тому для оцінки оперативного (в даний момент часу) рівня безпеки при експлуатації геотехнічних споруд запропоновані дві групи показників ризику:

− перша група визначається за результатами візуальних спостережень середовища або споруди:

$$\begin{cases} R(F)^{v} = k_1^{v} R(F_1)^{v} + k_2^{v} R(F_2)^{v} + ... + k_i^{v} R(F_i)^{v}; \\ i \in [1; n^{v}]; \\ k_1^{v} + k_2^{v} + ... + k_i^{v} = 1; \\ k_i^{v} \in [0; 1]; \\ R(F_i)^{v} \in [0; 1]. \end{cases} ; \quad (1)$$

− друга група визначається за результатами віброакустичної діагностики:

$$\begin{cases} R(F)^{a} = k_1^{a} R(F_1)^{a} + k_2^{a} R(F_2)^{a} + ... + k_j^{a} R(F_j)^{a}; \\ j \in [1; n^{a}]; \\ k_1^{a} + k_2^{a} + ... + k_j^{a} = 1; \\ k_j^{a} \in [0; 1]; \\ R(F_j)^{a} \in [0; 1]. \end{cases} , \quad (2)$$

де $R(F)^{v}$, $R(F)^{a}$ – показники ризиків виникнення аварійної ситуації від факторів, що визначаються візуальним і віброакустичним методами, відповідно; i, j – індекси до кількості факторів n^{v} і n^{a}, відповідно; $k_1{}^{v}$, $k_1{}^{a}$ – коефіцієнти впливу на ризик окремих факторів в групі.

Слід зазначити, що для автоматизованих систем контролю безпеки важливим є не тільки оперативні данні з безпеки за окремими групами ризику але й загальний стан об’єкта контролю. Цей стан може бути визначений інтегральним показником ризику. Цей показник, що характеризує ступінь втрати стійкості елементів геотехнічної системи може бути визначений або шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групах, що обчислюються за співвідношеннями (1) і (2), або підсумовуванням ризиків за цими двома групами факторів:

$$R(F)^{\text{int}} = \begin{cases} \max\left\{ \sum_{i=1}^{n^{v}} k_i^{v} R(F_i)^{v}; \sum_{j=1}^{n^{a}} k_j^{a} R(F_j)^{a} \right\}; \\ \begin{cases} kv * \sum_{i=1}^{n^{v}} k_i^{v} R(F_i)^{v} + ka * \sum_{j=1}^{n^{a}} k_j^{a} R(F_j)^{a} \\ kv \in [0; 1]; \\ ka \in [0; 1] \\ kv + ka = 1.. \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

де $R(F)^{int}$ – показник інтегрального ризику втрати стійкості геотехнічної системи; kv, ka – коефіцієнти впливу на інтегрований ризик груп факторів, що визначаються візуальним і віброакустичним методами, відповідно.

Оперативний та інтегральний показники ризиків втрати стійкості геотехнічної системи, який, як вже було вказано, є індикаторами поточного та загального стану об’єкта контролю, визначається в процесі періодичного візуального і віброакустичного моніторингу.

В результаті проведених досліджень методологія контролю пошкодженості геотехнічних споруд удосконалена і розширена шляхом систематизації і обґрунтування зв’язків основних параметрів віброакустичної діагностики з характерними дефектами та пошкодженнями елементів геотехнічної системи, а також визначення поточних і комплексних показників ризику руйнування геотехнічної системи за результатами виявлення зовнішніх структурних пошкоджень методами візуального контролю та прихованих пошкоджень віброакустичним методом.

Розроблено «Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації». З використанням цих рекомендацій проводять ідентифікацію

пошкоджень та тріщин в елементах будівель і споруд, у тому числі в умовах надзвичайних ситуацій. Методичні рекомендації впроваджено в ГУ ДСНСУ у Дніпропетровській області та використовуються в навчальному процесі підготовки фахівців вищої освіти.

Висновки

1. Для визначення руйнування споруд і пошуку локалізації тріщин в гірничих виробках, підземних і заглиблених спорудах різного призначення встановлені і систематизовані зв'язки основних параметрів віброакустичної діагностики (амплітуди, тривалості та частоти максимуму спектральної щільності сигналу) з характерними дефектами та пошкодженнями елементів геотехнічної системи.

2. Удосконалено і розширено метод оцінки зміни структури середовища та втрати стійкості аварійно небезпечних об’єктів внаслідок виникнення систем тріщин в процесі їх експлуатації, який відрізняється визначенням поточних і комплексних показників ризику втрати стійкості геотехнічної системи за результатами виявлення спостережуваних зовнішніх та прихованих внутрішніх структурних пошкоджень методами візуальної і віброакустичної діагностики. Це дозволяє контролювати структурні порушення та ряд інших критично значущих параметрів, які впливають на безпеку експлуатації підземних виробок і споруд, оцінити ризики втрати стійкості геотехнічної системи та своєчасно провести ремонтні роботи.

3. Розроблено і впроваджено методичні рекомендації, які використовують для визначення пошкоджень та тріщин в елементах будівель і споруд, у тому числі в умовах надзвичайних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левіт В. В., Усаченко Б. М., Яланський А. О., Сергієнко В. М. Геофізична діагностика шахтних стволів з метою технічного обслуговування та ремонту кріплення. *Геотехнічна механіка*. ІГТМ НАНУ, 2000. № 20. С. 130−133.

2. Скіпочка С. І., Сергієнко В. Н. Апаратура «ШВК-1»» для віброакустичного контролю стану масиву. *Геотехнічна механіка*. ІГТМ НАНУ, 2014. № 119. С. 79−86.

3. 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.

4. 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.

5. Яланський О. А., Бєліков А. С. та ін. 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.

6. Бєліков А. С., Яланський О. А. та ін. Розробка моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 3 (021). С. 7−18.

7. Булат А. Ф., Слащова О. А., Слащов І. М., Стаднійчук М. М. Обґрунтування методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах. *Геотехнічна механіка*. ІГТМ НАНУ, 2020. № 150. С. 176−187.

8. Півняк Г. Г., Табаченко М. М., Дичковський Р. О., Фальштинський В. С. Керування ризиками в гірничодобувній діяльності. Дніпро : НГУ, 2015. 288 с.

9. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. Forecasting the risks of the mine roadway destruction by the radiometric control method. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1156. Pp. 012033.

10. Цопа В. Ризик-орієнтоване мислення: основи, навчання та впровадження. Ч. І. *Охорона праці*. 2017. № 8. С. 35−47.

11. Слащов І. М., Слащова О. А., Осінній В. Я., Сапунова І. О., Константинова І. Б. Ідентифікація факторів ризиків втрати стійкості гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*. ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 209−222.

REFERENCES

1. Levit V.V., Usachenko B.M., Yalansky A.O. and Sergienko V.M. *Heofizychna diahnostyka shakhtnykh stvoliv z metoyu tekhnichnoho obsluhovuvannya ta remontu kriplennya* [Geophysical diagnostics of mine shafts for the purpose

of maintenance and repair of fastening]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical mechanics]. 2000, no. 20, pp. 130−133. (in Ukrainian).

2. Skipochka S.I. and Sergienko V.N. *Aparatura "SHVK-1" dlya vibroakustychnoho kontrolyu stanu masyvu* [Equipment "ShVK-1" for vibroacoustic monitoring of the massif state]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2014, no. 119, pp. 79−86. (in Ukrainian).

3. 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.

4. 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.

5. 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. (in Ukrainian).

6. Bielikov A.S., Yalanskyi O.A., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. *Rozrobka modeley skladnykh kolyvan' dlya system avtomatyzatsiyi vibroakustychnoho kontrolyu bezpeky ekspluatatsiyi budivel' i sporud* [Development of models complex oscillations for automation systems of vibroacoustic operational safety control of buildings and structures]. *Ukrayins'kyy zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 3 (021), pp. 62−72. (in Ukrainian).

7. Bulat A.F., Slashchova O.A., Slashchov I.M. and Stadniychuk M.M. *Obgruntuvannya metodiv kontrolyu heomekhanichnoyi bezpeky na hirnychykh pidpryyemstvakh* [Substantiation of methods of geomechanical safety control in the mining enterprises]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2020, no. 150, pp. 176−187. (in Ukrainian).

8. Pivnyak G.G., Tabachenko M.M., Dychkovsky R.O. and Falshtinsky V.S. *Keruvannya ryzykamy v hirnychodobuvniy diyal'nosti* [Risk management in mining activities]. Dnipro : NGU Publ., 2015, 288 p. URL: http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/146560. (in Ukrainian).

9. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. Forecasting the risks of the mine roadway destruction by the radiometric control method. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science. 2022, vol. 1156, pp. 012033.

10. Tsopa V. *Ryzyk-oriyentovane myslennya: osnovy, navchannya ta vprovadzhennya* [Risk-based thinking: basics, training and implementation]. *Okhorona pratsi* [Labor Protection]. 2017, no. 8, pp. 35−47. (in Ukrainian).

11. Slashchov I.M., Slashchova O.A., Osinniy V.YA., Sapunova I.O. and Konstantynova I.B. *Identyfikatsiya faktoriv ryzykiv vtraty stiykosti hirnychykh vyrobok* [Identification of risk factors of mine workings stability loss]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2019, no. 149, pp. 209−222. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.12.2024.