

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури

**Гливи Валентина Анатолійовича**

на дисертаційну роботу **Барабанова Станіслава Сергійовича**

на тему: «**Забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з**

**урахуванням методу віброакустичного контролю»**

подану на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 26 «Цивільна безпека» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека»

Відгук складено на основі вивчення дисертаційної роботи, опублікованих здобувачем результатів наукових досліджень, а також матеріалів, які підтверджують впровадження результатів роботи.

### **1. Актуальність обраної теми досліджень**

На сьогодні в Україні значна частина будівель і споруд промислового та цивільного призначення ушкоджена внаслідок бойових дій та терористичних атак. Це висуває низку вимог до діагностування стану будівель та визначення засобів і заходів щодо їх відновлення.

В умовах надзвичайних ситуацій, які активізуються динамічними впливами від вибухів, пожежами, руйнуванням застарілого жилого фонду безумовно необхідно проводити контроль стійкості та безпеки об'єктів для оцінки їхньої придатності до подальшої експлуатації. Це стосується як самих інфраструктурних об'єктів безпосередньо, в ролі яких можуть виступати виробничі цехи, споруди, тунелі та інше, так і житлових будинків і комплексів допоміжних будівель та споруд. Безпечність експлуатації будівель та споруд в першу чергу залежить від виникнення та розвитку процесів руйнування в бетонних, залізобетонних, цегляних та інших елементах несучих конструкцій. Залежно від ступеня пошкодження втрата стійкості може бути м'якою або жорсткою. При м'якій втраті стійкості обов'язково присутні фактори ризику, які часто пов'язані з допущеними при проектуванні помилками, підтопленнями фундаментів або недотриманням правил експлуатації, які проявляються в ослабленні несучих конструкцій внаслідок внутрішніх пошкоджень. Жорстка втрата стійкості споруд відбувається вже після накопичення критичної кількості пошкоджень конструктивних елементів або раптового швидкого зростання тріщин, які активізуються руйнівними зсувами в фундаментах і несучих конструкціях будівель під час землетрусів або раптовим різким розвантаженням гранично-напружених конструкцій за межею їх критерію міцності 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 внаслідок їх слабкої прогнозованості та трагічних наслідків. Це призводить до лавиноподібних обвалень конструкцій будівель, що втратили опору в результаті руйнування одного з поверхів. Стан безпеки будівель та споруд в процесі експлуатації визначається пошкодженнями і тріщинуватістю несучих конструкцій. Накопичення внутрішніх 17 пошкоджень, зріст тріщин в несучих стінах та фундаментах будівель є однією з найбільш поширених ознак потенційного руйнування в процесі експлуатації. При цьому втрата стійкості конструктивних елементів може відбуватися і без візуально визначених пошкоджень. Тому для безпечної експлуатації будівель та споруд вирішальним є не лише візуальний огляд, а й своєчасний контроль прихованої пошкоженості та тріщинуватості в конструктивних елементах. Для моніторингу стійкості споруд і діагностики прихованої тріщинуватості найкраще застосовувати геофізичні методи неруйнівного контролю, зокрема віброакустичний, який апробований в різних умовах і дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багат шарових стін перекриттів та інших видів конструкцій. Однак для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень необхідна розробка моделей складних коливань і вдосконалення методів ідентифікації досліджуваних структур.

Наведене обумовлює тематику дисертаційних досліджень як актуального науково-прикладного завдання

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до пріоритетних напрямків науково-дослідних робіт, що пов'язані з Концепцією реформування системи управління охороною праці в Україні, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р; Загальнодержавної соціальної програми поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки; Указу Президента України Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року, виданий 30 вересня 2019 року №722/2019, а також розділу науково-дослідної роботи «Розробка метода управління геотехнічною 18 системою «порідний масив-гірничі виробки» з урахуванням факторів ризику» № ДР 0119U001349 (2024 р.), де здобувач приймав участь в науковій діяльності щодо розробки методичного забезпечення безпеки будівель і споруд.



### **3. Мета і завдання дослідження**

Мета роботи – забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням методів, програмних і технічних засобів віброакустичного контролю прихованої ушкодженості елементів будівельних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- провести аналіз стану та методів оцінки безпеки будівель і споруд в процесі їх тривалої експлуатації та з урахуванням вибухів і пожеж;
- встановити взаємозв'язок змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості та удосконалити метод визначення ушкодженості в елементах будівельних конструкцій;
- розробити моделі та алгоритми складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд;
- провести лабораторні випробування роботи генератора механічних коливань для виробки типових впливів і автоматизації процесу віброакустичного контролю будівель та споруд;
- удосконалити метод оцінки безпеки будівель і споруд при виникненні спостережуваних і прихованих систем тріщин за допомогою віброакустичного моніторингу;
- розробити і впровадити методичні рекомендації з оцінки ушкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації.

*Об'єкт дослідження* – процеси руйнування і віброакустичного контролю пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд.

*Предмет дослідження* – закономірності змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості у будівельних конструкціях в процесі експлуатації та під впливом вибухів і пожеж.

### **4. Огляд змісту роботи**

Дисертаційна робота викладена на 155 сторінках друкованого тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 5 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 131 сторінку друкованого тексту. Робота ілюстрована 9 таблицями, 34 рисунками. Список використаних джерел містить 121 найменувань, з них 65 кирилицею та 56 латиницею.



У **вступі** наведено актуальність теми, мету дослідження, наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача та апробацію результатів досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз стану безпеки будівель і споруд при тривалій експлуатації з урахуванням руйнівних впливів вибухів та пожеж. Встановлено, що в умовах застарілого жилого фонду будівель і великої кількості надзвичайних ситуацій, які активізуються динамічними впливами від вибухів і пожеж, безумовно необхідно проводити контроль стійкості та безпеки об'єктів для оцінки їхньої придатності до подальшої експлуатації. Це відноситься як до самих інфраструктурних об'єктів безпосередньо, в ролі яких можуть виступати виробничі цехи, споруди, тунелі та інше, так і до житлових будинків. Аналіз показав, що накопичення внутрішніх пошкоджень в несучих стінах та фундаментах будівель є однією з найбільш поширених ознак потенційного руйнування в процесі експлуатації. Для моніторингу і діагностики пошкоджень добре зарекомендував себе віброакустичний метод контролю, який був апробований в різних умовах і дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багат шарових стін перекриттів та інших видів конструкцій. Однак для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів, кількісної оцінки накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень необхідна розробка автоматизованого збуджувача складних коливань і вдосконалення методу ідентифікації прихованих пошкоджень віброакустичним методом. На основі проведеного аналізу було сформульовано мету та задачі дослідження

У **другому розділі** проведено ідентифікацію структурних порушень в матеріалах будівель і споруд віброакустичним методом. На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль в дерев'яних, бетонних і металевих матеріалах проведена їх оцінка як коливальної системи при ударному впливі. Встановлені закономірності змін віброакустичних параметрів при розвитку тріщинуватості у будівельних конструкціях. Визначення відкритих тріщин здійснюється по стоячих хвилях, резонаторами для яких є поверхня та береги тріщин. Закриті тріщини переводять однорідну нормальну хвилю в неоднорідну, що експоненційно загасає. Встановлено, що при пошкодженні конструктивних елементів будівель і споруд виникають впорядковані та хаотичні системи тріщин, розміри яких, у випадках часткового (прихованого) внутрішнього руйнування, значно нижче області контролю. Це середовище можливо вважати квазіоднорідним, в якому системи тріщин виявляють свої властивості лише інтегрально. Тому запропоновано визначати інтегральні показники



пошкодження елементів конструкцій, які зв'язані з зонами акустичної чутності резонансних хвиль. Ці хвилі фіксуються приймачем з фільтрами, які пропускають низькі частоти для різних матеріалів. На базі цих показників вже можливо ідентифікувати ризики втрати стійкості об'єкта контролю. Проведено апробацію методу віброакустичного контролю пошкоджень конструктивних елементів споруд на прикладі досліджень бетонних тубінгів. Визначено ділянки з підвищеними напруженнями, зони прихованих тріщин та пошкоджень у бетоні. Зазначено, що для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень потрібна автоматизація віброакустичного методу, розробка моделей складних коливань та підвищення достовірності оцінок руйнувань.

У **третьому розділі** розроблено моделі та алгоритми складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. Моделі складних коливань дозволяють реалізувати закони керування, неможливі для класичних вібраційних систем але необхідні для систем автоматизованого віброакустичного контролю будівель та споруд. Для керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю та двигуном прямої дії обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності за алгоритмом J. Crenshaw. Показано, що зниження стійкості будівель та споруд внаслідок випадкових динамічних впливів призводить до необхідності врахування особливостей хаотизації процесів. Для віброакустичного контролю внутрішньої пошкоженості наземних споруд (стін, фундаментів) виконано наукове обґрунтування урахування хаотичної складової процесу руйнування. Розроблено програмну модель для генератора віброакустичних коливань, що описується системами диференційних рівнянь Лоренца Е. та Чена Х. Побудовані структурні схеми генераторів, що отримані на основі диференційних рівнянь. Удосконалено методи і алгоритми автоматичного керування генератором для отримання хвиль із заданими амплітудними та частотними характеристиками, що необхідно для створення збурюючого ударного впливу з потрібними параметрами при віброакустичному контролі.

У **четвертому розділі** розроблено методи підвищення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням програмних і технічних засобів віброакустичного контролю. Обґрунтовано, що втрата стійкості несучих конструкцій може відбуватися за двома основними сценаріями: поступовому ослабленні несучих конструкцій внаслідок накопичення внутрішніх пошкоджень або швидкому накопиченню критичної кількості тріщин, які



активізуються раптовим руйнуванням гранично-напружених конструкцій внаслідок будь-яких динамічних впливів. Моделювання процесу руйнування методом скінченних елементів показало, що задовго до того, як тріщини на поверхнях конструкцій можуть бути визначені візуально, зони прихованої пошкодженості активно розвиваються всередині стінових конструкцій будівель і споруд. У зв'язку з тим, що об'єктом 5 досліджень є часткове руйнування будівель та споруд, тобто не першопричина, а вже наслідки впливу комплексу негативних базових факторів, то для оцінки пошкодженості об'єктів контролю вперше запропоновано використовувати показник, що відображає інтегральний ризик втрати стійкості конструктивних елементів споруд за двома основними групами факторів ризику. Перша група пов'язана з виявленням зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю. Друга група пов'язана з виявленням прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом. Інтегральний ризик втрати стійкості визначається або шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групі, або підсумовуванням ризиків за цими двома факторами. Для автоматизації систем віброакустичної діагностики будівель і споруд вперше розроблено генератор механічних коливань із заданим частотним спектром на основі програмованого логічного контролера і сервопривода. Лабораторні випробування роботи генератора пройшли успішно, були згенеровані прямокутний меандр, несиметрична пила, трикутний сигнал та періодичні гармонічні коливання. Встановлено, що генератор забезпечує виконання заданих характеристик, а механізм сервоприводу виконує запрограмоване завдання. В результаті проведених досліджень розроблені «Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації», які встановлюють методи ідентифікації пошкоджень та тріщинуватості в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, що викликані тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж. Методичні рекомендації впроваджені в Головному Управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій України у Дніпропетровській області та в навчальному процесі кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, де використовуються для ризик-орієнтованого управління і підвищення якості підготовки фахівців за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».



## 5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендації.

Достовірність теоретичних та експериментальних результатів визначається сучасними методами досліджень, а також аналізом і коректним використанням методів обробки експериментальних даних, базуються на використанні експерименту як методу дослідження, системного аналізу, коректністю постановки задач дослідження, математичною строгістю поставлених задач, коректним застосуванням методів обчислювальної математики, а також критичним порівнянням та збігом отриманих результатів з відомими в науковій літературі даними інших дослідників. Достовірність отриманих результатів підтверджуються прийнятною збіжністю експериментальних та теоретичних даних.

## 6. Наукова новизна отриманих результатів

- *подальший розвиток* отримав метод оцінки пошкоджень і тріщинуватості конструктивних елементів будівель і споруд з урахуванням параметрів віброакустичного контролю руйнування споруд, що дозволяє знизити аварійність об'єктів і своєчасно вжити заходи безпеки;
- *встановлено* закономірності та взаємозв'язок основних віброакустичних параметрів з проявами дефектів та пошкоджень в конструкціях будівель і споруд в залежності від виду матеріалів;
- *розроблено* нові моделі та алгоритми автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання коливань із заданими амплітудними та частотними характеристиками, що необхідно для створення збурюючого ударного впливу з потрібними параметрами при віброакустичному контролі;
- *вперше* обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності в обчислювальній схемі за алгоритмом J. Crenshaw, що дозволяє керувати виконавчими органами з обмеженою обчислювальною продуктивністю при віброакустичному моніторингу структури, тріщин та порушень однорідності;
- *вперше* для віброакустичного контролю внутрішньої пошкоженості будівель і споруд виконано наукове обґрунтування урахування хаотичної складової процесу руйнування, розроблено програмну модель та структурну схему збуджувача віброакустичних коливань, що описується системами диференційних рівнянь Лоренца Е. та Чена Х.;
- *вперше* для виробки типових впливів в системі віброакустичної діагностики розроблено програмний модуль та генератор механічних коливань із заданим частотним спектром на основі програмованого



контролера та сервопривода з використанням елементів людино-машинного інтерфейсу, що створює умови для автоматизації процесу контролю будівель і споруд;

– *вперше* для оцінки рівня пошкодженості будівель і споруд внаслідок впливу комплексу негативних факторів при їх експлуатації запропоновано показники, що відображають інтегральний ризик втрати стійкості споруд за двома основними групами небезпечних факторів. Перша група пов'язана з ризиками впливу зовнішніх структурних пошкоджень, які ідентифікуються методами візуального контролю, друга група – з ризиками впливу прихованих пошкоджень, параметри яких визначаються віброакустичним методом, що у сукупності дозволяє дати оперативну та інтегральну оцінку безпеки конструктивних елементів будівель та споруд.

## **7. Практичне значення одержаних результатів**

*Практичне значення отриманих результатів полягає в:*

– *розробці* програмних алгоритмів і технічних засобів автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання коливань із заданими амплітудними та частотними характеристиками, що дає необхідну і достатню базу для автоматизації віброакустичного контролю тріщинуватості в елементах будівель і споруд;

– *розробці і практичній апробації* в лабораторних умовах генератора механічних коливань на основі програмованого контролера та сервопривода для виробки типових впливів і автоматизації процесу віброакустичної діагностики будівель і споруд;

– *розробці та впровадженні* «Методичних рекомендацій з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації», які встановлюють методи ідентифікації пошкоджень в конструктивних елементах будівель і споруд віброакустичним методом в умовах надзвичайних ситуацій, обумовлених тривалою експлуатацією об'єктів інфраструктури та динамічними впливами від вибухів і пожеж. Розроблені методичні рекомендації впроваджені: в Головному Управлінні Державної служби з надзвичайних ситуацій України у Дніпропетровській області (Акт впровадження від 15.03.2024 р., додаток Г2) де використовуються для вдосконалення ризик-орієнтованого управління і підтримання прийняттого рівня ризику при експлуатації будівель і споруд; в навчальний процес кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури МОН України (Довідка від 20.04.2024 р., додаток Г3) де використовуються для



підвищення якості підготовки фахівців за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».

#### **8. Повнота викладу результатів в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації**

Результати дисертаційного дослідження були опубліковані в 8 наукових роботах, у тому числі в 5 наукових статтях у фахових виданнях, 3 – в матеріалах конференцій.

#### **9. Зауваження до дисертації**

У процесі ознайомлення з матеріалами дисертації виникла низка зауважень і побажань.

1. Пошкодження будівель та споруд від вибухової хвилі та пожеж, що спричинені вибухами, мають суттєво виражений специфічний характер. Виявлення прихованих пошкоджень, оцінка стану споруди після події та прийняття рішень щодо можливості подальшої експлуатації має бути надалі відокремлено та розглядатися в подальшій роботі з урахуванням цієї специфіки відмежовано від інших напрямів.

2. Автор у третьому розділі описав використання кількох динамічних моделей та розробив алгоритми для збуджувача віброакустичних коливань, при цьому дуже детально розглянув напрямки їх застосування. На мій погляд, завдання автоматизації генератора складних віброакустичних коливань для систем контролю безпеки не потребує такого широкого розгляду.

3. Зрозуміло, що є необхідність розробки ударника коливань. У роботі розроблено методика, моделі, алгоритми, проведено математичне моделювання та інше, але недостатньо відпрацьовано механіка ударного механізму.

4. Проведено математичне моделювання непружних деформацій та тріщинуватості стін будинків, але недостатньо описана методика і модель процесу руйнування.

5. На сторінках 100-101 автор показав результати моделювання процесу утворення тріщин в стінових конструкціях будівель і споруд при зростанні навантаження. Ці результати дуже корисні, однак автору слід було б більш детально описати математичну модель, метод отримання непружних рішень та тріщинуватості в будівельних конструкціях.

6. Використання збуджуючих коливань із заданими частотними параметрами має призвести до виникнення певної картини резонансів, що дає змогу діагностувати будівлю чи споруду. Не зовсім зрозуміло, чи автор за



аналогією сподівається, що використання хаотичних збуджуючих коливань призведе до хаотизації коливань контрольованої споруди? Які переваги дає така хаотизація?

7. В роботі відсутня кінематична схема механізму передачі коливань від вихідного валу віброзбуджувача до породного масиву або до конструктивного елементу будівлі чи споруди. Не зрозуміло, яким чином забезпечується механічна стійкість і нерухомість самого агрегата віброзбуджувача.

Наведені зауваження мають дискусійний характер, не стосуються наукової новизни одержаних результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### 10. Висновок по дисертації

Дисертація Барабанова Станіслава Сергійовича «Забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням методу віброакустичного контролю» є завершеним науковим дослідженням, виконаним автором самостійно, на актуальну тему. Ознак академічної недоброчесності у матеріалах дисертаційного дослідження не виявлено.

Наведені результати можна класифікувати як нові та обґрунтовані, вони мають наукове і практичне значення для вирішення важливої задачі в галузі 26 Цивільна безпека.

За актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю, рівнем та обсягом проведених досліджень, якістю оформлення дисертаційна робота відповідає вимогам, що передбачені пп. 5-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44, а її автор Барабанов Станіслав Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 26 «Цивільна безпека» за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека».

Офіційний опонент, д.т.н., проф.,  
завідувач кафедри фізики  
Київського національного  
університету будівництва і архітектури



Валентин ГЛИВА

*Підпис проф. Гливи В.А. засвідчую:*  
*Секретар Вченої ради КНУБА*  
*Глебова Л.О. Килимничук*