

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДИМОВИХ ТРУБ

Розглянуто проблему визначення ступеня зносу та прогнозування залишкового ресурсу промислових димових цегляних труб у режимі моніторингу. Використання даних впливу зміни параметрів у процесі експлуатації дозволило визначити напружено-деформований стан димової цегляної труби та виконати прогнозування його зміни в часі.

Ключові слова: димові труби, моніторинг, динамічні параметри.

Вступ. Надійність будівель і споруд залежить від точності оцінки їх ресурсу. Основною причиною порушення працездатності та зменшення ресурсу промислових димових цегляних труб є розвиток і накопичення різного роду дефектів у конструкціях. Димові цегляні труби відіграють важливу роль у роботі технологічного обладнання підприємств різних галузей промисловості. При цьому вони експлуатуються в агресивних середовищах промислових підприємств і піддаються значному зносу. Забезпечення надійності й довговічності таких споруд, як одне з основних завдань проектування досягається шляхом використання нормативних методів розрахунку, вживання відповідних конструктивних рішень і методів захисту. На стадії експлуатації надійність забезпечується шляхом здійснення заходів з контролю технічного стану і виконання необхідного ремонту та підсилення. Унаслідок порушення вимог до проведення заходів з контролю технічного стану й невизначеності строків експлуатації з урахуванням індивідуальних для кожної споруди умов експлуатації, відбуваються відмови різної міри наслідків.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Переважна більшість існуючих методів аналізу надійності та визначення залишкового ресурсу будівельних конструкцій заснована на використанні класичної теорії ймовірності та математичної статистики. Це пов'язано з тим, що залишковий ресурс є випадковою величиною і розв'язання задач із визначення залишкового ресурсу передбачає побудову саме ймовірнісних моделей оцінки надійності несучих конструкцій будівель та споруд і доведення того, що у визначений проміжок часу не виникне жодний з граничних станів. Такий підхід є правильним у випадку, коли існує достатня кількість стійких вибірових параметрів, що характеризують процеси зносу, старіння та руйнування конструкцій цегляних димових труб.

Але у випадку реальних умов експлуатації така інформація відсутня. Оцінка технічного стану цегляних димових труб за результатами досліджень у переважній більшості випадків не містить основної кількісної характеристики – надійності конструкції. Це пов'язано з відсутністю достовірних і повних за обсягом статистичних даних щодо початкових та фактичних параметрів конструкції. Така обмежена інформація не дозволяє використовувати для оцінювання надійності й залишкового ресурсу цегляних димових труб тільки ймовірно-статистичні методи [1, 2].

З точки зору методів прогнозування залишкового ресурсу та класичної механіки руйнування для адекватного аналізу будь-якої складної технічної системи необхідно виключити з розгляду настання граничних станів внаслідок різких нерозрахункових переважань, природних впливів, що не піддаються контролю, грубих помилок при проектуванні та експлуатації або несприятливого збігу зазначених факторів [7]. Інші випадки настання граничних станів можна розділити на дві групи: перша група граничних станів, які настали внаслідок поступового накопичення в матеріалі розсіяних пошкоджень, що призвели до зародження та розвитку тріщин; друга група складається з граничних станів, пов'язаних з надмірним зносом поверхонь конструкцій, які знаходяться в контакті з робочим або

зовнішнім середовищем. Для димових цегляних труб випадки з настанням граничного стану в результаті інтенсивного зносу матеріалу основних будівельних конструкцій є порівняно рідкісні, тому для оцінювання залишкового ресурсу необхідно зосередитися на значеннях якісних та кількісних параметрів, що характеризують настання граничних станів унаслідок поступового накопичення в матеріалі дефектів та пошкоджень.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Прогнозування індивідуального залишкового ресурсу стосуються конкретного об'єкта, що певний час експлуатується. Основою для побудови математичної моделі прогнозування залишкового ресурсу цегляних димових труб є інформація, яку можна класифікувати таким чином. По-перше, це дані щодо фактичного технічного стану димової труби, отримані в результаті планових технічних оглядів протягом усього строку експлуатації або технічних обстежень із застосуванням засобів неруйнівного контролю. По-друге, це дані щодо навантажень та інших умов взаємодії цегляної димової труби з навколишнім середовищем. По-третє, це весь обсяг апріорних даних щодо матеріалів, елементів, вузлах, навантажень тощо, а також інформація, яка лежить в основі прогнозування ресурсу та оцінювання показників надійності на стадії проектування. Ця інформація стосується загальної сукупності цього певного виду споруд, у той час як предметом індивідуального прогнозування залишкового ресурсу та оцінювання показників надійності є конкретний об'єкт зі своїми унікальними особливостями. Проблема прогнозування залишкового ресурсу окремої цегляної труби полягає в тому, що інформація стосовно такого об'єкта залишається неповною і неточною, а значна її частина носить імовірнісний характер. Має місце достатньо велика імовірність пропущення дефектів через недосконалість апаратури, людського фактора або недосяжного розташування дефекту. Не завжди можна також отримати повну інформацію щодо режимів навантаження, що не дозволяє повною мірою, маючи відому історію навантажень і використовуючи розрахункові схеми, оцінити ступінь накопичення пошкоджень у конструкції та порівняти результати розрахунку з діагностичними даними.

Оскільки прогнозування залишкового ресурсу стосується конкретного, індивідуального об'єкта і полягає в побудові ймовірнісної моделі, яка містить елементи ймовірнісного характеру, то виникає проблема трактування ймовірнісних висновків стосовно конкретної димової цегляної труби та індивідуальних умов експлуатації. Для таких складних інженерних споруд необхідно застосовувати поняття індивідуальної або байесовської ймовірності на основі динамічного аналізу в режимі сейсмоакустичного моніторингу. Такий підхід дозволяє отримувати й аналізувати дані щодо фактичного технічного стану в режимі реального часу.

Постановка завдання. Цегляна кладка стовбура димової промислової труби складається з об'ємів речовин з різним набором властивостей, що передуються між собою. Неоднорідність структури цегляної кладки та її періодичність дозволяють віднести її до класу композиційних матеріалів.

Основний матеріал і результати. Механічні мікро- та макроскопічні процеси в неоднорідних матеріалах достатньо детально вивчалися в рамках детермінованих і статистичних моделей механіки композитів. Перевага статистичних моделей полягає в тому, що вони природним чином урахують такий важливий фактор структурного матеріалу, як випадковість взаємного розташування елементів та статистичний розкид їх властивостей. У статистичній механіці композитів залишається відкритим питання щодо більш повного порівняно з одноточечними наближеннями врахування багаточасткової взаємодії компонентів. Зазвичай приймається припущення, що на поверхні контакту цегли та розчину виконуються умови безперервності переміщень і деформацій та всередині неоднорідності поведінку матеріалу можна описувати рівняннями механіки [6]. Визначення інших статистичних характеристик полів деформування для випадків неізотропного і комбінованого навантаження, а також побудова розв'язків нелінійних крайових задач для процесів накопичення пластичних деформацій та пошкоджень у компонентах композитів з урахуванням неоднорідності полів деформування набуває особливого значення в задачах прогнозування міцнісних властивостей цегляної кладки.

Нелінійний характер залежності між напруженнями й деформаціями композиційних матеріалів може бути наслідком не тільки пластичного деформування і мати місце навіть у випадку лінійно пружних компонентів. Це обумовлено тим, що повному руйнуванню композиційного матеріалу в цілому передує складний процес руйнування окремих елементів структури. Усебічне вивчення цього процесу дає можливість аналізувати умови утворення макроскопічної тріщини та прогнозувати поведінку композиційного матеріалу під навантаженням протягом тривалого проміжку часу. Виявлення непружних властивостей композиційних матеріалів, викликаний повним або частковим руйнуванням окремих елементів структури, знаходить своє відображення на діаграмі деформування в появі різких стрибків іа розривів.

Кожний акт структурного руйнування супроводжується перерозподілом напружень в елементах композиційного матеріалу, що призводить або до продовження руйнування, або до припинення руйнування при цьому рівні зовнішнього навантаження.

Структурна відмова матеріалу полягає в зменшенні несучої здатності елемента або безпосередньо всієї структури. Структурна відмова починається в момент, коли напруження в матеріалі близькі до граничних та викликають надмірні деформації, коли матеріал у процесі повного циклу не відновлюється, тобто проявляється явище гістерезису. Будь-який перерозподіл енергії в матеріалі супроводжується виникненням сигналів емісії.

На сьогоднішній день створені різні моделі накопичення пошкоджень як напівемпіричні, так і структурні. З існуючих моделей, що описують процес накопичення ушкоджень в умовах пружних деформацій, слід виокремити мікромеханічну модель руйнування [7]. Вона має ряд суттєвих переваг: по-перше, поняття «ушкодження» в цій моделі має конкретний фізичний зміст – концентрація мікротріщин у структурі матеріалу, по-друге, визначення параметрів моделі можливе на основі реєстрації акустично-емісійних сигналів [5].

Основою такої моделі є зв'язок інформативних параметрів акустичної емісії ξ з параметрами C пошкоджуваності матеріалу

$$\xi(t) = k_{AE} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t \frac{dt'}{\Theta(U_0, \omega(t'))} \right] \right\} d\omega,$$

де ξ – інформативний параметр акустичної емісії (кількість імпульсів, сумарна акустична емісія, сумарна амплітуда сигналів акустичної емісії); t – поточний час; k_{AE} – акустично-емісійний коефіцієнт (об'єм матеріалу, що реєструється сигналами акустичної емісії); C_0 – початкова концентрація структурних елементів матеріалу; ω – параметр стану міцності структурного елемента матеріалу об'єкта; $\Psi(\omega)$ – функція щільності розподілу параметра ω за структурними елементами об'єму матеріалу V , що контролюється (рис. 1); ω_0 , $\Delta\omega$ – нижня межа та діапазон розсіювання значень параметра ω .

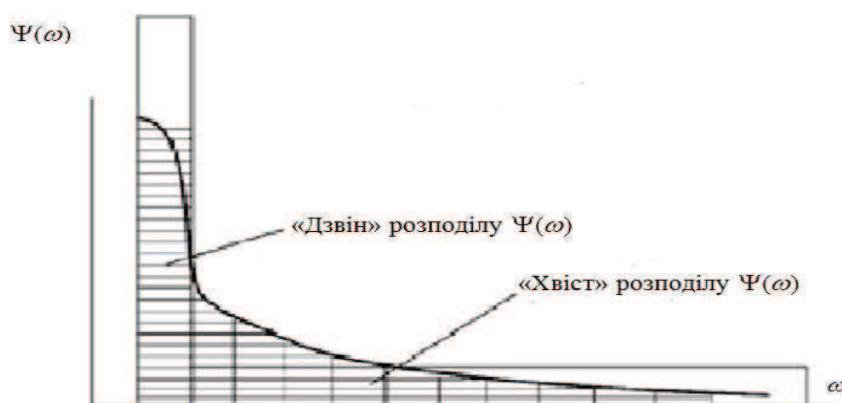


Рисунок 1 – Вид і структура функції $\Psi(\omega)$, що моделює міцнісну неоднорідність матеріалу

Математична модель акустично-емісійного коефіцієнту має вигляд:

$$k_{AE} = V \int \int \int_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t,$$

де V – об'єм матеріалу, що контролюється акустично-емісійним методом; $\Phi(\Delta t, f, u)$ – щільність ймовірності розподілу сигналів акустичної емісії по інтервалам Δt (паузам) між ними, амплітуді u та частоті f .

Інтеграл, що входить до формули математичної моделі акустико-емісійного коефіцієнта, має зміст імовірності реєстрації, тобто ймовірності потрапляння параметрів пружних хвиль, які прийшли від джерела акустичної емісії, в діапазон частот f , амплітуд u сигналів акустичної емісії та часових інтервалів Δt між ними, що реєструються апаратурою.

$$\omega(t) = \frac{\gamma\sigma(t)}{KT},$$

де γ – активаційний об'єм; σ – розтягуючі напруження на мікроелементі.

$$\Psi(\omega, \mu, \sigma_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3\omega} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_3^2}(\ln(\omega) - \mu)^2\right];$$

$$\Psi(\omega, \omega_0, \omega_1, \omega_2) = \begin{cases} \frac{0,99}{\omega_1}, & \omega \in [\omega_0, \omega_0 + \omega_1], \\ \frac{0,01}{\omega_2}, & \omega \in [\omega_0 + \omega_1, \omega_0 + \omega_1 + \omega_2]; \end{cases}$$

де $\Theta(U_0, \omega(t)) = \tau_0 \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma(t)}{KT}\right]$ – час руйнування мікроелемента (формула

С.Н. Журкова), де U_0 – енергія активації процесу руйнування.

Інформативними параметрами в мікромеханічній моделі акустичної емісії можуть бути число N_Σ імпульсів дискретної акустичної емісії, що реєструються; сумарний рахунок N акустичної емісії, сумарна амплітуда або комбінація цих параметрів. Співвідношення описів параметрів функції $\Psi(\omega)$ характеризує ступінь неоднорідності механічного стану матеріалу; параметри τ_0 та U_0 є найбільш консервативними й не залежать від стану структури, тому що визначаються характеристиками міжатомної взаємодії структурного елемента; значення параметра $\gamma \approx 10^{-26} \dots 10^{-28} \text{ м}^3$ (активаційного об'єму) є характеристикою наноструктури матеріалу, яка майже не чутлива до його хімічної природи.

Амплітудний розподіл під час акустично-емісійних вимірювань дає змогу аналізувати розподіл розмірів суцільності структури гетерогенного матеріалу, тип дефекту та ступінь його небезпеки, швидкість навантаження, напруження на структурних елементах у момент руйнування. Метрологічні аспекти акустико-емісійних досліджень пов'язані з їх чуттєвістю, що залежить від співвідношення величин енергії або амплітуди пружної хвилі й межі дискримінації реєструючої апаратури. Приймаючи гіпотезу щодо нормального розподілу сигналів по амплітуді, відповідно до центральної граничної теореми та фізичних передумов, стає очевидним зв'язок частини сигналів акустичної емісії, що реєструються, та тих, які пройшли часову, частотну й амплітудну фільтрацію, та виду амплітудного розподілу, що спостерігається. Викривлення цього виду при фіксованій межі дискримінації апаратури може бути пов'язане зі зміною енергоємності пружного випромінювання. Такий аспект може бути використаний при виявленні та спостереженні за концентратором напружень.

Дрібнодисперсне руйнування цегляної кладки димової труби відбувається у вигляді окремих елементарних актів – утворення мікротріщин. Процес утворення мікротріщин не відбувається в одній конкретній матеріальній точці, він розподіляється на деякий об’єм, що є елементом структури гетерогенності. Потенціальна енергія E_i пружної деформації структурного елемента, яка вивільняється під час процесу утворення мікротріщини, залежить від розміру структурного елемента D та напружень, що діють на його поверхні σ^* ,

$$E_i = \frac{\sigma^{*2} D^3}{2E_y \square u^2},$$

де E_y – модуль пружності матеріалу, враховує залежність

$$\sigma^* = \frac{U_0 + KT \ln \dot{\sigma} - KT \ln \left[\frac{KT}{\gamma \tau_0} \right]}{\gamma}.$$

Тобто частина енергії E_i переходить в енергію пружної хвилі, яка наближаючись до поверхні матеріалу, затухає залежно від частоти хвилі, коефіцієнта затухання та відстані, пройденій від місця реєстрації акустичної емісії.

З усієї сукупності хвиль акустично-емісійна апаратура реєструє тільки частину, що потрапляє в певний амплітудний діапазон, обмежений верхнім U_B та нижнім U_H рівнями дискримінації. Різні дефекти, неоднорідність структури цегляної кладки та напруженого стану окремих ділянок, що виражаються у варіації значень D , σ^* та $\dot{\sigma}$, призводять до розкиду значень амплітуд сигналів акустичної емісії. Розкид значень амплітуд акустичної емісії у сукупності з випадковістю процесу руйнування є причиною варіації значень імовірності P_U потрапляння амплітуди сигналу акустичної емісії в амплітудний діапазон $[U_H; U_B]$, що реєструється апаратурою

$$P_U = \int_{U_H}^{U_B} \Phi(u) du,$$

де U_H, U_B – нижня та верхня амплітудні межі дискримінації вимірювальної апаратури; $\Phi(u)$ – щільність ймовірності розподілу сигналів акустичної емісії по амплітуді u .

Пропонований підхід був упроваджений під час моніторингу димової труби котельної в м. Переяслав. Завданням експерименту було простежити за динамікою вектора вільних параметрів моделі димової цегляної труби в обраному просторі ознак, які характеризують стан досліджуваної споруди. У випадку істотної зміни параметрів, що розглядаються, можна робити висновок щодо структурної зміни об’єкта, зокрема вихід вектора вільних параметрів з області стаціонарності. Область стаціонарності, яку можна уявити у вигляді певного еліпсоїда обертання фіксованого об’єму \mathcal{E} в просторі ознак старіння моделі димової цегляної труби, є індивідуальною для кожного досліджуваного об’єкта, й вибирається, виходячи з умов дослідження, що проводиться, та специфіки самого об’єкта. Як параметричний простір ознак старіння досліджуваного об’єкта приймаємо простір вільних параметрів моделі димової цегляної труби як суперпозиції осциляторів.

Порівняння розрахунків для вимірювань, що відстоять у часі один від одного на відстані в півроку, дозволяють стверджувати, що для об’єктів вибраного типу призначені параметри для ідентифікації його стану достатньо стійкі та можуть слугувати опорною базою для довгострокового моніторингу. На сьогоднішній день можна зробити висновок, що об’єкт перебуває в стійкому стаціонарному стані.

Висновки. Використання результатів фізичних і чисельних досліджень впливу зміни параметрів у процесі експлуатації дозволяє визначити напружено-деформований стан димової цегляної труби та виконати прогнозування його зміни в часі з відповідними

висновками і рекомендаціями. Пропозиції для вдосконалення конструктивної схеми димової цегляної труби дають можливість поліпшити порівняно з рішеннями, які застосовуються традиційно, економічні та експлуатаційні показники умов технічного нагляду, ремонтопридатності, довговічності.

Література

1. Верюжський Ю.В. Методи аналізу небезпек будівельних конструкцій будинків та споруд на основі теорії ризиків / Ю. В. Верюжський // Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2004, №4. – с.92–98.
2. Верюжський Ю.В. Визначення розрахункового і допустимого значення ризиків відповідальних об'єктів / Ю. В. Верюжський, В. Г. Ширишов // Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2004, №4. – с.86–89.
3. Мостовой С.В. Оценка информативных параметров состояния строительных конструкций в режиме мониторинга / С. В. Мостовой, В. С. Мостовой, С. М. Кондра, Ж. С. Страшко // Научно-производческий журнал «Промышленное строительство та інженерні споруди». – К.: 2011, №1. – с. 7–13.
4. Мостовой В.С. Модели систем мониторинга геофизических полей / В. С. Мостовой // Дис. доктора физ.-мат. наук: 04.00.22; Утверждена решением Аттестационной коллегии МПНМС Украины от 01.03.2013 – 263 с., 119 ил, 4 табл., 6 доп. - Библиогр. с. 250-263.
5. Поллок Д.А. Акустико-эмиссионный контроль, авторская перепечатка из книги Металлы (Metals Handbook), 9-е издание, т. 17, ASM International (1989), с. 278 294. URL: <http://www.diapac.ru/Articles/Pollock.pdf> (дата обращения: 08.11.2011).
6. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.: ил.
7. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. – 312 с. ил.

О.И. Яворская, ассистент
Национальный авиационный университет, г. Киев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ

Рассмотрена проблема определения степени износа и прогнозирования остаточного ресурса промышленных дымовых кирпичных труб в режиме мониторинга. Использование данных влияния изменений параметров в процессе эксплуатации позволило определить напряженно-деформированное состояние дымовых кирпичных труб и выполнить прогнозирование его изменения во времени.

Ключевые слова: дымовые трубы, мониторинг, динамические параметры.

O.I. Yavorska, assistant
National Aviation University

MATHEMATICAL MODEL ESTIMATE OF DYNAMIC PARAMETERS OF CHIMNEY FLUES

It has been considered the problem of evaluation of wear and forecasting of residual life of break chimney flues in monitoring. The use of influence of changes in the parameters at maintenance provides to define strain stress state of break chimney flues and carry out forecasting of its change in time.

Keywords: chimney flues, monitoring, dynamic parameters

Надійшла до редакції 11.09.2014

© О.І. Яворська