



ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВИХ ДИМОВИХ ТРУБ

В. Ю. ГЛУХОВСЬКИЙ

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03680, Київ-150, вул. Боженка, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Високі димові труби, що експлуатуються промисловими підприємствами, відповідають категорії потенційно небезпечних, важкодоступних чи цілком недоступних об'єктів. Це обумовлює використання нетрадиційних методів технічної діагностики, насамперед тепловізійного неруйнівного контролю. Розглянуті найбільш розповсюджені типи димових труб, що експлуатуються вітчизняними підприємствами. Визначені основні дефекти для залізобетонного стовбуру, ізоляції та пароізоляції, а також футерівки димових труб. Розглянуті особливості стаціонарної теплопередачі через багат шарову цегляну стінку димової труби. Наведені основні етапи методики тепловізійного неруйнівного контролю димових труб з переліком основних температурних аномалій, яким відповідають дефекти в залежності від типу димових газів в трубі. Бібліогр. 2, табл. 4, рис. 2.

Ключові слова: високі димові труби, потенційно небезпечні, важкодоступні, цілком недоступні об'єкти, тепловізійний неруйнівний контроль, наскрізні дефекти

В сучасних галузях промисловості і будівництва експлуатується велика кількість потенційно небезпечних об'єктів, діагностика технічного стану яких звичайними методами неруйнівного контролю (НК) пов'язана з великими труднощами. Особливо це стосується важкодоступних або цілком недоступних об'єктів, що перебувають в неперервній експлуатації.

До перспективних методів діагностики технічного стану таких об'єктів відноситься тепловий метод, коли інформацію про параметри об'єкта несе температурне поле його поверхні, значення якого в основному визначається змінами теплофізичних, геометричних параметрів та параметрами навантаження [1].

В принципі будь-які об'єкти, експлуатація яких перш за все пов'язана зі зміною температурних режимів їх функціонування, можна діагностувати за допомогою теплового контролю (ТК).

На відміну від традиційних методів дефектоскопії об'єктів, що вимагають тимчасового виводу їх з експлуатації, ТК застосовують на об'єктах, що експлуатуються під робочими навантаженнями.

Для контролю технічного стану таких об'єктів переважно застосовують методи пасивного ТК без додаткового нагрівання або охолодження об'єкта контролю, коли його температурне поле змінюється за рахунок природних причин.

До потенційно небезпечних важкодоступних або недоступних об'єктів належать високі димові труби. Даний тип технічних споруд знаходиться під неперервною дією високотемпературних агресивних газових потоків і зовнішніх природних факторів, що знижують розрахований строк ек-

сплуатації димових труб. Серед причин, які викликають накопичення дефектів і зниження несучої здатності конструкцій, крім природного старіння якості будівельних матеріалів, найбільш важливими виступають багато- і малоциклічна втома, крихке руйнування та повзучість.

Димові та вентиляційні труби промислових підприємств – електростанцій, металургійних, нафтохімічних, газоперероблювальних та інших заводів – являють собою кінцеву ланку технологічних процесів, і виведення їх з експлуатації в багатьох випадках призводить до зупинки всього технологічного процесу.

Відмова в роботі димових труб напряму пов'язана з порушеннями режимів під час експлуатації, практично повній відсутності технічного нагляду, недооцінкою важливості проведення технічних діагностичних заходів. В той же час вихід з ладу димових труб може призвести не лише до зупинки виробництва, а й до великих економічних втрат. Нерідко проводиться технічний огляд димових труб, що знаходяться в передаварійному стані. При цьому навіть в таких умовах промислові підприємства дуже важко вирішують економічні проблеми.

Вивчення питання в області безпеки експлуатації і контролю стану димових труб дуже обмежене. Застосування з цією метою традиційних методів обстеження і моніторингу будівельних об'єктів потребує суттєвого коректування і обґрунтування, пов'язаних зі специфікою експлуатаційних умов об'єкту (низькі температури зовнішнього повітря, високотемпературні, хімічно агресивні газові потоки всередині труб, вібрація тощо). Офіційні методи оцінки фізичного стану функціонування димових труб без



зупинки технологічного процесу до даного часу не розроблені [2].

Димові труби в залежності від ступеня агресивності димових газів та їх об'єму, кліматичної зони та часу спорудження мають різну конструкцію. На рис. 1 наведені схеми фрагментів залізобетонних димових труб [3].

Всі труби таких конструкцій мають залізобетонний стовбур 1. Деякі конструкції труб включають футерівки 2 із глиняної цегли або із кислототривкої цегли 4. Між стовбуром труби та футерівкою прокладають паровологоізоляцію 3. В старих конструкціях залізобетонних труб використовували слизнік 5, прибудовували глиняну звичайну цеглу або будівельний легковаговик 6 та прокладали азбестовий шнур 7. В наступних конструкціях залізобетонних труб влаштовують повітряні зазори 8 для вентилявання, компенсатори 9 із азбесту та бітуму, а також повітряні канали 10 в зоні консолей стовбура. В останніх конструкціях залізобетонних труб футерівка 11 виконана із силікатполімербетону або полімербетону, а між стовбуром труби та футерівкою знаходиться металева роздільна діафрагма 12.

Основні дефекти димових труб є результатом низької якості будівництва та експлуатації в непроєктному режимі при зниженні об'єму та температури димових газів внаслідок наявності нещільностей по тракту котел–димова труба, порушень теплоізоляції і утворення конденсату, який руйнує будівельні матеріали.

Димові труби об'єктів металургії, енергетики та промислових підприємств будуються залізобетонними та цегляними. Характерні дефекти димових труб зі стовбурами із залізобетону та опис цих дефектів в залежності від важливості наведені в табл. 1–3.

Характерні дефекти димових труб із цегли: наскрізні та ненаскрізні вертикальні та горизонтальні тріщини; руйнування кладки в результаті попереозмінного заморожування та розморожування; порушення зчеплення цегли та розчину кладки від сірчаноокислої корозії; розкриття цегляної кладки (бочкоподібність) між бандажними поясами; деформація верхньої частини труби (нахил) в результаті сульфатації цегляної кладки.

Одним із найбільш розповсюджених дефектів димових труб з примусовою вентиляцією є закриття (засміченість) повітряного каналу або непрацююча (не змонтована) вентиляційна установка.

Розглянемо особливості стаціонарної теплопередачі через багатошарову цегляну стіну. В основі тепловізійної діагностики технічного стану конструкційних шарів димових труб та газоходів лежать процеси теплопередачі через циліндричні та плоскі стінки. На рис. 2 наведено принцип стаціонарної теплопередачі через багатошарову циліндричну стінку, в якості якої вибрана тришарова стінка.

Тепловий потік Q через циліндричну тришарову стінку можна визначити наступним чином [3]:

$$Q = \frac{T_r - T_{\text{п}}}{R}, \quad (1)$$

де T_r – температура гарячого газу в димовій трубі; $T_{\text{п}}$ – температура зовнішнього повітря; R – повний опір теплопередачі стовбура димової труби.

Опір R теплопередачі стовбура димової труби залежить від кількості шарів труби. Для тришарового стовбура димової труби величину опору теплопередачі можна визначити за формулою:

$$R = \frac{r_4}{r_1 \alpha_{\text{вн}}} + \frac{r_4}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_4}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_4}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{зв}}}, \quad (2)$$

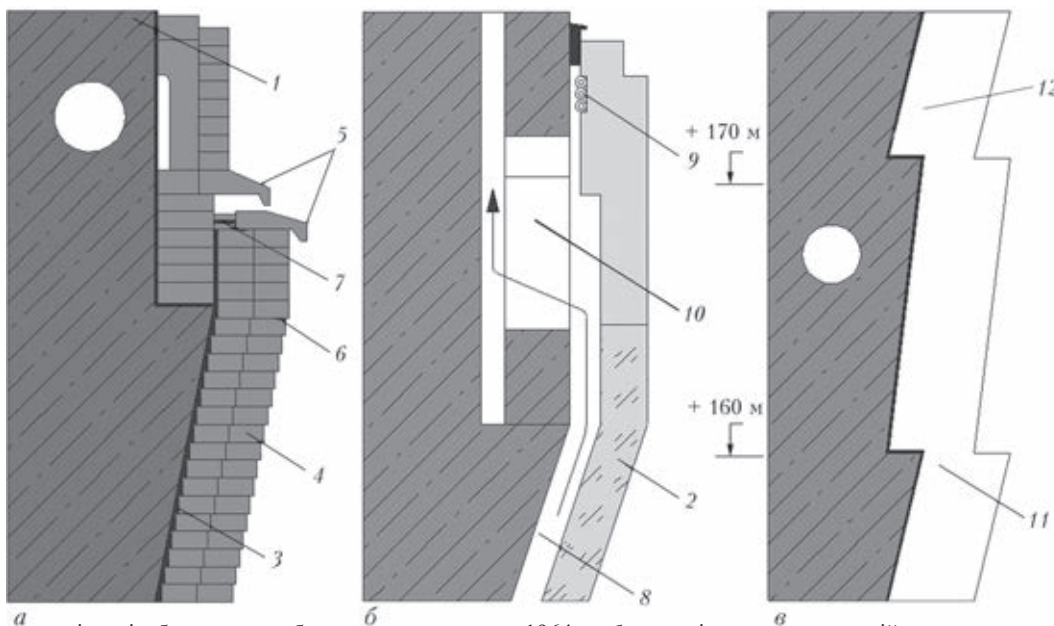


Рис. 1. Конструкції залізобетонних труб: а – споруджених до 1964 р.; б – з повітряним вентиляційним зазором; в – з монолітною футерівкою (позначення див. у тексті)



Таблиця 1. Характерні дефекти залізобетонного стовбуру димових труб

Номер п/п	Найменування дефекту	Опис дефекту
1	Дефектний шов	Шов бетонування з наявністю великопористого бетону та раковин
2	Руйнівний шов	Шов бетонування з ознаками руйнування
3	Лущення поверхневого шару бетону	Руйнування поверхневого шару бетону до великого наповнювача
4	Тріщини	Тріщина на поверхні стовбуру з одностороннім або наскрізним розкриттям
5	Глибоке та наскрізне руйнування стовбуру	Руйнування бетону стовбура: відшарування великого наповнювача і арматури від бетону, наскрізні отвори
6	Відкол в бетоні	Здуття і відрив конусоподібного шматка бетону з утворенням заглибин у вигляді кратера
7	Відшарування та руйнування бетону	Поверхнєве руйнування бетону: відшарування шматками, відколи бетону з відкриттям арматури
8	Вологі ділянки бетону	Зволоження та обмерзання стовбура труби

Таблиця 2. Характерні дефекти теплоізоляції та паровологоізоляції димової труби

Номер п/п	Найменування дефекту	Опис дефекту
1	Руйнування теплової ізоляції (димова цегла, мінеральна вата)	Теплоізоляція з боку футерівки руйнується по товщині: перетворюється в масу білого кольору, місцями з жовтим нальотом; перетворюється в порошкоподібну масу
2	Руйнування паровологоізоляції	Паровологоізоляція стає крихкою та вміщує тріщини

Таблиця 3. Характерні дефекти футерівки димової труби

Номер п/п	Найменування дефекту	Опис дефекту
1	Деформація футерівки	Утворення опуклостей, випирання та бочкоподібне розшарування кладки
2	Руйнування футерівки	Повне або часткове руйнування, обвал футерівки з утворенням отворів
3	Корозія цегли футерівки	Відшарування цегли шматками
4	Тріщини	Вертикальні, горизонтальні або нахилені тріщини на поверхні футерівки з одностороннім або наскрізним розкриттям
5	Руйнування розчину кладки	Ослаблення міцності й зчеплення розчину кладки з цеглою; часткове або повне викришування й опадання розчину в швах кладки
6	Перекривання проміжку	Відсутність проміжку між футерівкою та стовбуром; зникає компенсаційний проміжок у вузлах скупчень окремих ланок

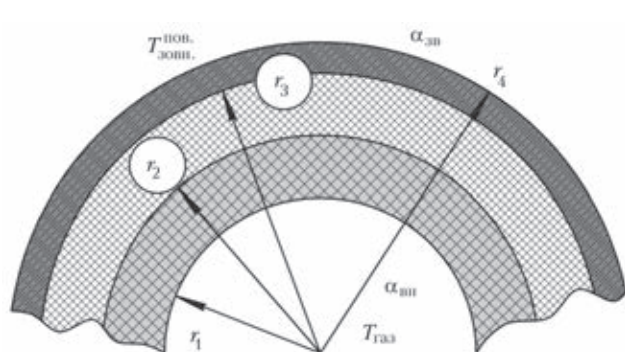


Рис. 2. Принцип стаціонарної теплопередачі через тришарову циліндричну стінку

де r_1 – внутрішній радіус стовбура труби; r_2 – r_4 – зовнішні радіуси відповідно першого, другого та третього шарів стовбура труби; $\alpha_{вн}$ – коефіцієнт тепловіддачі першого шару стовбура труби; $\alpha_{зн}$ – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній стінці труби; λ_1 – λ_3 – коефіцієнти теплопровідності шарів стовбура труби.

Тепловий потік Q на внутрішній поверхні стінки стовбура труби можна визначити за виразом:

$$Q_{вн} = \alpha_{вн} (T_{газ} - T_{вн}), \quad (3)$$

де $T_{вн}$ – значення внутрішньої температури стінки стовбура труби; $\alpha_{вн}$ – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні труби.

Відповідно величина теплового потоку труби буде дорівнювати:

$$Q_{зв} = \alpha_{зв} (T_{зв} - T_{п}), \quad (4)$$

де $\alpha_{зв}$ – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній стінці стовбура труби; $T_{зв}$ – зовнішня температура стінки стовбура труби.

Слід відмітити, що у формулі (1) тепловий потік визначено на одиницю площі зовнішньої поверхні димової труби.

Тепловізійну діагностику димових труб здійснюють з метою визначення їх технічного стану в процесі експлуатації, для прогнозування об'єму й місця виконання ремонту, а також для оцінки якості ремонтних робіт.

Обстеження димових труб виконують організації, що мають ліцензії, а оператори-термографісти повинні бути атестовані на рівень кваліфікації не нижче II.



Таблиця 4. Температурні аномалії та відповідні дефекти в залежності від типу димових газів в трубі

Номер п/п	Тип дефекту	Характер температурного розподілу		Примітки
		труба під розрідженням	труба під надлишковим тиском	
1	Дефектний шов бетонування	Горизонтальна холодна лінія	Горизонтальна тепла лінія	–
2	Тріщина несучого стовбура труби	Холодна лінія	Тепла лінія	Підтверджується при візуальному контролі
3	Наскрізна тріщина несучого стовбура труби	—>—	—>—	—>—
4	Зниження опору газопроникності матеріалу несучого стовбура	Холодна ділянка	Тепла ділянка	–
5	Руйнування несучого стовбура	В залежності від глибини руйнування – або холодна або тепла ділянка		Встановлюється при візуальному контролі
6	Корозія футерівки до 60 %	Тепла ділянка	Тепла ділянка	–
7	Обвал футерівки	—>—	—>—	–
8	Зниження опору газопроникності футерівки	—>—	—>—	–
9	Відсутність теплоізоляції в прошарку між стовбуром та футерівкою	—>—	—>—	–
10	Попелові відкладення	Холодна ділянка	Холодна ділянка	Уточнюється при проектуванні

Перевагами тепловізійного контролю обстеження димових труб та газоходів порівняно з візуальними методами є:

- можливість обстеження димових труб та газоходів без зупинки котлів;
- виявлення дефектів, які є прихованими від людського ока, наприклад, дефектів під шаром ізоляції та внутрішні дефекти;
- можливість класифікації дефектів за ступенем їх небезпеки для теплотехнічного стану димових труб та газоходів.

При тепловізійній діагностиці виявляються дефекти, що виникають на зовнішній поверхні зони аномально високої або низької температури. Ці зони виділяються дефектоскопістом на фоні середньої температури та природних шумів. Багато видів дефектів димових труб зводять до моделей наскрізних та ненаскрізних дефектів.

Наскрізні дефекти виникають у випадку сполучення стовбура або всіх шарів труби; особливо вони можуть виникати в місцях корозії арматури, кріпильних елементів і стикування конструктивно різних ділянок труби (слізниць, переходів бетонування, монтажних стиків). Даний вид дефектів є найбільш небезпечний, тому що призводить до пришвидшеного руйнування бетонного стовбура (арматури).

Наскрізні дефекти обумовлені руйнуванням матеріалу стінок стовбура або зміною їх товщини, що не супроводжується виникненням наскрізних дефектів. Ненаскрізні дефекти, що пов'язані зі зменшенням товщини швів, переважно супроводжуються локальним підвищенням температури на зовнішній поверхні труби. Відкладення попелу та локальне збільшення товщини шарів (збільшення товщини цегляної кладки або напли-

ви на бетонному стовбурі) викликають локальне зниження температури. Площі як теплої, так і холодної зони досить точно відповідають площі, що викликала дефект, а величина температурного сигналу залежить від виду та параметрів дефекту.

Тепловізійну зйомку проводять з 5–7 точок спостереження. В процесі зйомки вимірюють: температуру зовнішнього повітря на кожній точці спостереження; напрямок вітру; швидкість вітру.

Обмеження тепловізійного методу для діагностики димових труб пов'язані:

- з труднощами розшифрування інфрачервоних зображень та їх прив'язки до специфічних видів дефектів;
- з труднощами огляду верхньої частини труби внаслідок обмеженого кута зору та крутого кута огляду (усувається віддаленням від труби та застосуванням далекофокусної оптики);
- з впливом сонячного засвічування (нагрівання ділянок труби та відбита радіація); усувається правильним вибором часу огляду (уранці; пізно ввечері або у похмурий день).

Під час підготовки звіту за результатами тепловізійної діагностики технічного стану димової труби використовують як окремі, так і панорамні термограми, для чого в останньому випадку окремі термограми «зшивають» за допомогою засобів комп'ютерної графіки. За допомогою термографічної діагностики можна оцінити якість косметичного ремонту, який може виглядати задовільним при візуальному огляді димової труби.

Основним результатом тепловізійної діагностики димових труб є карта дефектів, яка складається на базі комп'ютерного моделювання та обробки панорамних термограм з урахуванням ре-



зультатів візуального огляду у відповідності з вимогами відповідних нормативних документів.

Під час проведення тепловізійної діагностики димових труб треба знати режими їх роботи, тому що дефекти труб в залежності від режимів їх роботи можуть давати на термограмах різні види поверхневих температурних аномалій. Тому в тепловізійній діагностиці димових труб необхідно враховувати накопичений досвід, який отримано шляхом фіксування термограм, що відповідають різним видам поверхневих температурних аномалій на зовнішній поверхні стовбура труби. В табл. 4 наведені характеристики температурних аномалій від дефектів різного типу в залежності від того, працює труба під розрідженим чи надлишковим тиском.

Висновки

Високі димові труби промислових підприємств – електростанцій, металургійних, нафтохімічних, газоперероблювальних та інших заводів – являють собою кінцеву ланку технологічних процесів, і виведення їх з експлуатації в багатьох випадках призводить до зупинки всього технологічного процесу. Даний тип промислових об'єктів належить до категорії потенційно небезпечних, важкодоступних або цілком недоступних об'єктів, що змушує застосовувати нетрадиційні методи неруй-

нівного контролю, а саме тепловізійну дистанційну діагностику.

Розглянуто найбільш розповсюджені типи димових труб, що експлуатуються вітчизняним промисловим комплексом. Визначені основні дефекти для залізобетонного стовбура, теплоізоляції та паровологоізоляції, а також футерівки димових труб.

Розглянуто особливості стаціонарної теплопередачі через багат шарову цегляну стіну димової труби. В основі тепловізійної діагностики технічного стану конструкційних шарів димових труб та газоходів лежать процеси теплопередачі через циліндричні та плоскі стінки, що уможливорює застосування тепловізійного неруйнівного контролю для визначення технічного стану даних технічних об'єктів.

Наведені основні етапи методики тепловізійного неруйнівного контролю димових труб з наведенням основних температурних аномалій, яким відповідають дефекти в залежності від типу димових газів в трубі.

1. Маслова В. А., Стороженко В. А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. – Харьков: Компания «СМИТ», 2004. – 160 с.
2. Яблонько Е. В. Основные проблемы в эксплуатации дымовых труб // Молодой ученый. – 2011. – № 9. – С. 65–68.
3. Вавилов В. П., Александров А. Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 76 с.

High-altitude chimneys that are operated by industrial enterprises are in the category of potentially hazardous, difficult-of-access or totally inaccessible facilities. This necessitates the application of nontraditional methods of technical diagnostics, first of all thermovision nondestructive testing. The paper considers the most common types of chimneys that are operated by domestic enterprises. The main defects for the concrete column, insulation and vapour insulation, as well as chimney lining, have been determined. Features of stationary heat transfer through the chimney multilayer brick wall are considered. Main stages of the procedure of thermovision nondestructive testing of chimneys are given, with a list of main temperature anomalies, to which defects correspond, depending on the type of flue gases in the chimney. 2 References, 4 Tables, 2 Figures.

Keywords: high altitude chimneys, potentially hazardous, difficult-of-access, or totally inaccessible facilities, thermovision nondestructive testing, through-thickness defects

Надійшла до редакції
14.10.2014

НОВА КНИГА

Н. І. Бурау, О. В. Зажичський. Розпізнавання технічного стану об'єктів на основі штучних нейронних мереж. – Київ.: Нац. авіац. ун-т, 2014. – 112 с.

У монографії наведено результати досліджень можливості використання штучних нейронних мереж для розпізнавання технічного стану роторних елементів авіаційних двигунів у процесі віброакустичної діагностики на стаціонарних та перехідних режимах експлуатації за чисельними діагностичними ознаками та ознаками у вигляді контурних зображень.

Монографія містить аналіз традиційних методів розпізнавання стану об'єктів діагностики, характеристику нейронних мереж для їх застосування в задачах розпізнавання образів, результати синтезу нейромережевих класифікаторів на основі імовірносної нейронної мережі та мережі адаптивної резонансної теорії, результати розпізнавання та аналіз ефективності розпізнавання стану лопаток авіаційних двигунів розробленими класифікаторами. На думку авторів, виявлення особливостей застосування нейронних мереж для двокласової діагностики за чисельними діагностичними ознаками та ознаками у вигляді контурних зображень, встановлення характеру впливу характерних параметрів нейронних мереж та особливостей їх навчання на точність класифікації сприятиме розвитку методів функціональної технічної діагностики. А широке впровадження сучасної елементної бази на основі цифрової техніки, сучасних мікроконтролерів розширить можливості практичного застосування нейромережевих класифікаторів та сприятиме створенню нових перспективних систем моніторингу технічного стану складних динамічних об'єктів.

Книга призначена для фахівців у галузі контролю та діагностики авіаційної техніки, наукових працівників, аспірантів та студентів старших курсів вищих навчальних закладів.