

ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВИХ ДИМОВИХ ТРУБ ПАСИВНИМ ТЕПЛОВІЗІЙНИМ МЕТОДОМ

В.Ю. Глуховський, О.Г. Бондаренко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Email: office@paton.kiev.ua

Виконано аналіз галузей промисловості, в яких отримав розповсюдження пасивний тепловізійний метод контролю для діагностування технічного стану важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів. Розглянуто умови експлуатації найбільш поширених потенційно небезпечних промислових димових труб. Проаналізовано причини утворення та основні типи дефектів та ушкоджень в структурних елементах димових труб. Наведено основні способи оцінки технічного стану димових труб пасивним тепловізійним методом шляхом вирішення прямої задачі дефектоскопії з використанням моделей термограм аномалій температурних полів на зовнішній поверхні димової труби. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: димова труба, пасивний тепловізійний метод контролю, причини утворення несучільностей, способи оцінки технічного стану

Пасивний тепловізійний метод неруйнівного контролю отримав велике розповсюдження в різних галузях промисловості України як метод діагностування технічного стану різноманітних промислових об'єктів. Метод визнано у більшості розвинених країн як ефективний, інформативний та безпечний, а його швидкодія перевищує решту методів неруйнівного контролю та технічного діагностування.

На сьогодні накопичено значний досвід із застосування пасивного тепловізійного контролю в різних галузях промисловості для визначення різноманітних параметрів об'єктів контролю [1]. При пасивному тепловому контролі схеми досліджень промислових об'єктів визначаються, головним чином, можливістю доступу до тієї поверхні об'єкта, на якій дефекти проявляються оптимальним чином. Враховуючи, що формування термографічних зображень температурних полів на поверхні багатьох промислових об'єктів здійснюється в процесі їх функціонування, то з позиції доступності для діагностування їх технічного стану пасивним тепловізійним методом такі об'єкти можна класифікувати як доступні, важкодоступні та потенційно небезпечні. Найбільше таких об'єктів знаходиться в енергетичній промисловості, металургії та машинобудуванні, хімічній та нафтохімічній промисловості, будівництві та комунальному господарстві.

Характерними із доступних об'єктів для кожної з названих галузей промисловості є теплотраси та теплоізоляція теплотрас. До основних доступних об'єктів контролю в цих галузях промисловості, що полягають діагностуванню пасивним тепловізійним методом, відносяться турбоге-

нератори, енергоагрегати та електричні машини різного призначення, електричні підстанції та трансформатори. Дефекти в енергонавантажених вузлах утворюються неперервно, тому за допомогою періодичного тепловізійного діагностування кількість виникаючих і деградуючих дефектів можна підтримувати на деякому мінімальному рівні. Масовими об'єктами контролю в електроенергетиці є контакти закритих та відкритих розподільчих пристроїв електричних підстанцій тощо [2].

В металургійній та машинобудівній галузях промисловості пасивним тепловізійним методом діагностуються різноманітні доступні машини та механізми, валки, бойлери тощо. Особливо важливо застосовувати пасивний тепловізійний метод контролю в хімічній та нафтохімічній промисловості, де контролю підлягають резервуари на предмет рівня теплої рідини в них, цистерни з агресивним середовищем на предмет хімічного спрацьовування стінок тощо. В будівництві контролю пасивним тепловізійним методом підлягають стан огорожувальних конструкцій, теплоізоляція огорожувальних конструкцій, дахи будівель і т. п.

Найважливішу групу об'єктів, що підлягають контролю пасивним тепловізійним методом, складають важкодоступні та потенційно небезпечні об'єкти у наведених галузях промисловості. На рис. 1 наведена спрощена класифікація важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів діагностування пасивним тепловізійним методом їх технічного стану в різних галузях промисловості.

Серед важкодоступних і потенційно небезпечних об'єктів, що підлягають дистанційному діагностуванню пасивним тепловізійним методом в енергетиці, можна виділити протяжні лінії



Рис. 1. Спрощена класифікація важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів діагностування пасивним тепловізійним методом їх технічного стану в різних галузях промисловості електропередач та порцелянові ізолятори високовольтних ліній. Для отримання термограм температурних полів цих об'єктів використовувались гелікоптери [1]. На сьогоднішній день обліт ліній електропередач запропоновано здійснювати за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а для тепловізійної зйомки опор з ізоляторами, відповідно, мультикоптери [3].

Значна частина важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів є й в інших галузях промисловості: металургійні печі, футерівка печей і розливних ковшів, гарячий прокат; в хімічній промисловості – хімічні реактори та їх футерівка; в будівництві – огорожувальні конструкції, втрати тепла будівлями та спорудами тощо.

Найбільшу групу важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів у названих галузях промисловості займають димові труби різного призначення, а також інші промислові газоходи, в тому числі й вентиляційні, які є невід'ємною частиною технічних схем промислових підприємств, теплоенергоцентралей (ТЕЦ) та теплових електростанцій (ТЕС).

Нижче буде розглянуто основні умови експлуатації та характеристики димових труб і особливостей діагностування їх технічного стану пасивним тепловізійним методом.

Умови експлуатації димових труб. Димові труби, призначення яких є відведення газів від теплових установок та розсіювання їх в атмосфері, відносяться до складних і дорогіших висотних інженерних споруд баштового типу, є кінцевою ланкою багатьох важливих технологічних процесів, вихід яких з експлуатації, як правило, призводить до зупинки всього виробництва, що несе за собою великі фінансові втрати. Тому від надійності, міцності та довговічності цих споруд залежить безперебійна робота під'єданого до них обладнання та агрегатів, забезпечення

тепло- та електроенергією як окремих промислових підприємств, так і цілих регіонів.

Під час експлуатації димові труби зазнають не лише значних вітрових та температурних навантажень, а й вплив агресивних високотемпературних газів, що рухаються стволом труби зі значною швидкістю. Первісно труби різного призначення слугували лише для створення тяги, яка забезпечувала потрібний режим горіння або вентиляції, що дозволяло обмежуватись трубами малої висоти. В подальшому з розвитком промисловості виникли жорсткіші вимоги щодо захисту навколишнього середовища від викидів у атмосферу шкідливих промислових відходів. Для зменшення негативних впливів димових та вентиляційних газів на стан повітряного басейну почали використовувати відведення попередньо очищених газів від виробничих підприємств на значну висоту. Це дозволило розсіювати їх на значну висоту й тим самим знизити концентрацію до безпечного рівня. На даний час в Україні на промислових підприємствах експлуатується понад 3000 димових труб висотою понад 100 м. Визначення технічного стану димових труб, що знаходяться в експлуатації, дозволяє прогнозувати період їх безвідмовної роботи, визначення об'єму та місця проведення ремонту, оцінити якість ремонтних робіт.

Саме тому пасивний тепловізійний метод ще на початку 1980-х рр. став одним з основних методів неруйнівного контролю багатьох важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів, таких як димові труби, в різних галузях промисловості з метою діагностування технічного стану [4].

Причини утворення та основні типи дефектів та ушкоджень димових труб. В залежності від конструктивних особливостей димові труби під-розділяють на [5]:

- цегляні, з футерівкою з глиняної цегли, вогнетривких або кислотостійких матеріалів;
- монолітні залізобетонні з притиснутою футерівкою з глиняної цегли та кислототривких виробів, з футерівкою та вентиляційними проміжками, з внутрішнім стовбуром або декількома внутрішніми стовбурами;
- збірні залізобетонні, з футерівкою або без неї;
- металічні, вільно розташовані або на розтяжках, футеровані або з внутрішніми стовбурами.

Як показує світова практика, саме для діагностування технічного стану наведених димових труб широко застосовується пасивний тепловізійний метод. Нижче розглянемо причини утворення та основні типи дефектів цегляних та залізобетонних димових труб. Саме димові труби об'єктів енергетики, металургії, хімічної та нафтохімічної промисловості, будівництва та комунальних господарств в своїй більшості виконані або виконуються цегляними чи залізобетонними.

Конструктивно цегляні димові труби виконуються з:

- цегляною футерівкою та теплоізоляцією в нижній частині труби;
- цегляною футерівкою по всій висоті стовбура труби та теплоізоляцією в нижній частині стовбура й повітряним вентиляльованим проміжком;
- кислотостійкою цегляною футерівкою та теплоізоляцією по всій висоті труби.

Серед залізобетонних димових труб щодо їх конструктивного виконання виділимо такі:

- з футерівкою з глиняної цегли, з частковою теплоізоляцією і повітряним не вентиляльованим каналом;
- з футерівкою з глиняної цегли, теплоізоляцією з мінеральних матів або напівжорстких плит та притисною стінкою;
- з футерівкою з кислотостійкої цегли, мінеральною ізоляцією, притисною стінкою та не вентиляльованим каналом.

Таким чином, за конструктивними особливостями наведені димові труби виконуються з тришаровими стінками, які складаються з шару футерівки, шару теплоізоляції та власне шару самого стовбура труби із цегли або залізобетону. В процесі експлуатації димових труб руйнування будь-якого з наведених шарів призведе до виникнення аномалій температурного поля на їх зовнішній поверхні. Саме внутрішні дефекти у шарах димових труб можуть бути виявлені тільки в тих межах, які вносять збудження в поле температур на їх поверхні.

Виникнення дефектів в шарах димових труб пояснюється особливо складними умовами, в яких вони працюють. Температурні перепади, коливання тиску, зміна вологості, агресивний вплив

димових газів, вітрові навантаження та навантаження від власної маси, ось не повний перелік факторів, що призводять до виникнення дефектів в тілі стінки труби в процесі її експлуатації. Конструктивні елементи труб одночасно зазнають різноманітних видів корозії, ерозії, температурних напружень, статичних й динамічних навантажень.

Конструкції димових труб контактують з атмосферою й тому зазнають різноманітних фізико-хімічних впливів. Джерелом цих впливів є різні типи атмосферних опадів, високошвидкісні тверді частинки, газоподібні компоненти та аерозолі, які містяться в атмосфері, сонячна радіація, повітряний тиск, різночастотні періодичні коливання температури навколишнього повітря та коливання його вологості та інші характеристики. В реальних умовах властивості матеріалів, які складають конструкцію димової труби, можуть значно відрізнятись під дією температури та вологості повітря, агресивного впливу атмосферних газів, а також замерзання та танення, що не рідко призводить до утворення тріщин у стовбурі труби.

В процесі експлуатації димових труб відбувається накопичування дефектів і пошкоджень у шарах матеріалів димової труби, які утворюються в основному внаслідок вітрового впливу, агресивних компонентів робочого середовища, високотемпературних впливів як від відпрацьованих димових газів, так і під дією сонячної радіації в процесі однобічного опромінення.

На рис. 2 наведена спрощена класифікація дефектів стовбурів цегляних та залізобетонних димових труб.

Основним недоліком експлуатації димових труб різного призначення, є їх робота в непроєктованому режимі. За останні роки внаслідок спаду промислових виробництв значна частина підприємств змушена працювати з незавантаженими виробництвами. Димові труби, які розраховані на відведення газів від теплотехнічних агрегатів при їх повноцінному навантаженні, зазнають посилене спрацьовування внаслідок зменшення об'ємів відпрацьованих газів, зменшення їх температури, нестаціонарних навантажень й зміни видів палива. Остання проблема стоїть особливо жорстко на підприємствах енергетичного комплексу, коли замість природного газу спалюють вугільний пил, мазут та інші «важкі» вуглеводні. Робота димової труби з режимами навантаження, відмінних від первинно встановлених, збільшує ймовірність корозії при низьких температурах навколишнього повітря.

В процесі експлуатації димових труб різних типів виникають дефекти та ушкодження також у решті внутрішніх шарів труб: футерівці, теплоізоляції та паровологоізоляції. На рис. 3 наведена

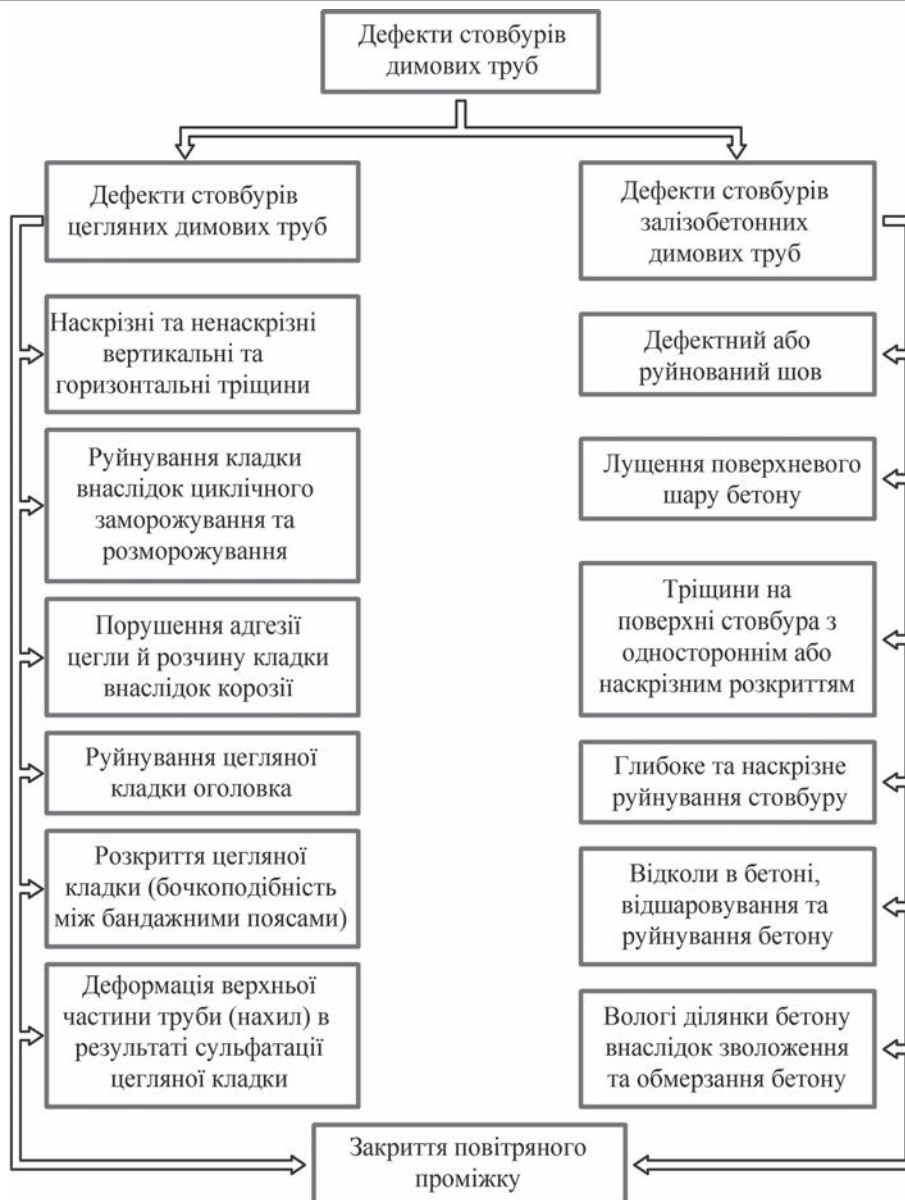


Рис. 2. Спрощена класифікація дефектів стовбурів цегляних та залізобетонних димових труб

спрощена класифікація дефектів та ушкоджень футерівки та ізоляції димових труб.

В якості прикладу на рис. 4 наведена кількість металевих димових труб у відсотках із загальної вибірки, в яких виявлені дефекти та ушкодження футерівки різних типів [6].

Основними типами дефектів та ушкоджень футерівки металевих димових труб є:

- 1 – вертикальні та похилі тріщини в футерівці;
- 2 – локальні руйнування футерівки та випадіння окремих цеглин;
- 3 – пучення цегляної кладки футерівки та теплоізоляції труби;
- 4 – пошкодження або відсутність ізоляції;
- 5 – пошкодження сльозників уступів;
- 6 – проміжки між ланками футерівки.

Більшість наведених дефектів і ушкоджень футерівки металевих труб характерні також і для цегляних та залізобетонних димових труб.

Важливо зазначити, що значна кількість підприємств наведених галузей промисловості в Україні побудовані за часів інтенсивного розвитку промисловості (1950–80-ті рр.) і експлуатуються тривалий період, аж до останнього часу. Більшість димових труб цих підприємств також знаходиться в експлуатації протягом 50–70-ти років, при розрахованому терміні експлуатації в 50 років. По мірі збільшення строку їх експлуатації вже гостріше постає питання забезпечення надійності та довговічності зазначених об'єктів. А тим часом на сьогоднішній день на різних підприємствах нашої держави, як вже раніше зазначалось, експлуатується більш ніж 3000 різноманітних типів димових та вентиляційних труб та газоходів.

При утворенні в шарах футерівки, теплоізоляції та стовбурі труби суттєвих дефектів та ушкоджень відбувається інтенсифікація руйнування несучого стовбура димової труби. Це може при-



Рис. 3. Спрощена класифікація дефектів та uszkodжень футерівки та ізоляції димових труб

зводити до тяжких наслідків для технологічного обладнання та працюючого персоналу, життєзабезпечення населення та забруднення навколишньої території та виведення з експлуатації життєво важливих виробництв. Тому гостро постає питання про надійність та довговічність висотних інженерних споруд таких як промислові димові труби різних типів.

Саме оцінка технічного стану димових труб після тривалих термінів експлуатації та прогнозування їх залишкового ресурсу є дуже актуальною задачею. Водночас багато димових труб в сучасних умовах експлуатуються з порушенням проектних умов та без належного контролю їх технічного стану. А якщо контроль і виконується, то труби мають бути виведені з експлуатації на час їх діагностування. Вартість, тривалість та якість ремонту напряму залежить від своєчасного виявлення дефектів, що впливають на працездатність димової труби та діагностування технічного стану.

Як показав досвід різних країн світу, вирішити задачу діагностування технічного стану димових труб та інших важкодоступних і потенційно небезпечних об'єктів в сучасних умовах може діагностична технологія пасивного тепловізійного методу. Своєчасне проведення тепловізійного обстеження димових труб, що не вимагає зупинки виробничих процесів, дозволить на ранніх стадіях виявити дефекти і uszkodження труби та прогнозу-

вати їх розвиток. Аналіз виявлених дефектів дозволяє проводити подальше повне інструментальне обстеження димової труби на локальних ділянках, що уможливорює зниження витрат в порівнянні з повним обстеженням технічного стану димової труби без проведення тепловізійного діагностування її технічного стану. А своєчасний ремонт дозволить експлуатувати димові труби без аварійних ситуацій та зупинок технологічних процесів.

Способи оцінки технічного стану промислових димових труб пасивним тепловізійним методом. Технічному стану димових труб завжди приділяли особливу увагу з самого початку їх введення в експлуатацію, що пояснюється їх безпосереднім впливом на працездатність та економічність функціонування великої кількості різноманітних енергетичних установок та агрегатів у різних галузях промисловості не лише України. Так, виведення

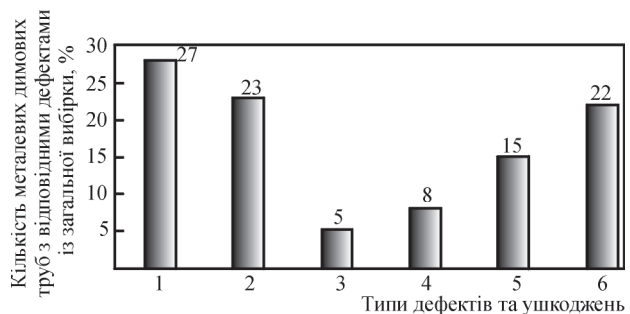


Рис. 4. Ушкодженість футерівки металевих димових труб (опис 1–6 див. у тексті)

димової труби в непередбачений ремонт на ТЕС призводив до обмеження їх потужностей на період, який залежав від характеру дефекта труби. Тому спостереження за технологічним станом димових труб було організовано так, щоб виключити руйнування та різноманітні ушкодження аварійного характеру, які могли викликати необхідність відключення котлів ТЕС, під'єднаних до димової труби.

Довгий період отримання інформації про технічний стан димової труби був пов'язаний з необхідністю обов'язкової зупинки котлів ТЕС для обстеження стовбура (футерівки) зі сторони димових газів, що вимагало виготовлення та монтажу відповідного оснащення для внутрішнього огляду та великої трудомісткості даних робіт. Разом з тим відомо, що деякі ТЕЦ обслуговують підприємства з неперервним технологічним процесом, і тому для обстеження димових труб необхідно, заздалегідь, до зупинки виробництва, передбачити заходи щодо забезпечення робочого процесу виробництва, що також пов'язано з додатковими витратами трудових та матеріальних ресурсів. При цьому часто організовані з великими труднощами внутрішні обстеження труб не давали додаткової інформації, а лише дозволяли встановити факт можливості подальшої роботи димової труби.

У зв'язку з наведеними недоліками методів обстеження димових труб для оцінки їх технічного стану розроблялися альтернативні методи, які дозволяли отримувати інформацію про характеристики надійності їх експлуатації. В основу цих методів було покладено принцип дистанційності. Вперше дистанційний метод було використано для контролю експлуатаційних режимів димових залізобетонних труб з протитиском [7]. За допомогою розробленої системи контролю, яка здійснювала вимірювання температури та статичних тисків газів і повітря у проміжку, використовувалося регулювання основних експлуатаційних параметрів надійності (протитиску та температурного перепаду в футерівці) димової труби. Контроль технічного стану труби здійснювався за значенням коефіцієнту фільтрації футерівки. Постійний контроль за припустимими температурними перепадами на футерівці забезпечував її тріщиностійкість, а задоволення вимоги зі створення протитиску у вентиляційному каналі виключно фільтрацією та дифузиею димових газів до залізобетонного стовбуру труби забезпечувало його від корозії.

Недоліки наведеного для всіх типів конструкцій димових труб традиційного контролю їх технічного стану очевидні внаслідок необхідності обов'язкового виключення котлогенераторів для візуального обстеження внутрішньої поверхні стовбура труби з підвісної люльки.

Тому справжня революція у розвитку методів контролю димових труб була здійснена після впровадження в практику пасивного теплового дистанційного методу на основі інфрачервоної техніки (тепловізорів). Початок практичного застосування дистанційного вимірювання (контролю) температури шляхом реєстрації теплового випромінювання, що отримало назву термографія (або теплобачення), відноситься до 1960-х рр., коли на ринку технічних засобів з'явилися тепловізори шведської фірми AGA (потім AGEMA Infrared systems). В першу чергу термографічні обстеження були застосовані для контролю та діагностування виробів у електротехніці, радіоелектроніці, ракетобудуванні [4]. Саме тепловізійний метод, що базується на основних законах теплового випромінювання, встановлює зв'язок між температурою поверхні тіла, його енергією випромінювання та випромінювальною здатністю об'єктів, що випромінюють, та навколишнім середовищем.

Основними перевагами пасивного тепловізійного методу контролю промислових об'єктів є наступні:

- дистанційність вимірювання аномалій температурного поля;
- одностороння доступність до об'єкта;
- оперативність контролю, тобто швидкість огляду поверхні об'єкта (висока продуктивність ведення контролю);
- можливість проведення контролю об'єкта без виведення його з експлуатації;
- можливість інтерпретації внутрішніх глибинних дефектів за вимірними аномаліями температурних полів на поверхні об'єкта;
- високопросторова та високотемпературна роздільна здатність тепловізорів;
- великий діапазон вимірювальних температур об'єктів контролю;
- можливість огляду тепловізором малих (декілька см) і дуже великих (до сотень метрів) поверхонь об'єктів;
- безпека ведення контролю.

На території колишнього СРСР вперше тепловізійне обстеження димових труб було здійснене у 1983 р. на залізобетонній трубі висотою 250 м з притиском [8]. Протягом 1984–1985 рр. було проведено термографування 25 димових труб з притиснутою до залізобетонного стовбура футерівкою.

Одночасно з розширенням практики застосування пасивного тепловізійного методу для дистанційного визначення технічного стану димових труб розпочалися роботи з розшифрування отриманих термограм зовнішніх поверхонь труб з метою оцінки їх технічного стану. Термограми аномалій температурного поля на зовнішній поверхні

димової труби формуються під дією температурного потенціалу димових газів димової труби й залежать від багатьох факторів: конструкції труби, теплофізичних властивостей матеріалів, умов теплообміну з середовищем та ін. В процесі експлуатації в димових трубах можуть з'являтися дефекти різного характеру: тріщини у стовбурі та футерівці, випадіння окремих цеглин футерівки, розшарування наявних в трубі шарів, зволоження внутрішніх шарів, внутрішня та зовнішня корозія стовбуру тощо. Саме такі дефекти й призводять до локальних змін температурних полів на зовнішній поверхні димових труб.

Наведені в роботі [8] результати моделювання фрагменту димової труби, що складався з бетонної стінки, футерівки з кислотостійкої цегли та розміщеної між ними теплоізоляції, показали, що тепловий потік у радіальному напрямку труби суттєво зменшується внаслідок великого термічного опору теплоізоляційного шару. В таблиці наведені значення розрахункових і вимірних питомих теплових потоків крізь експериментальний фрагмент димової труби в залежності від її конструкції.

Із наведених у таблиці даних випливає, що дефекти у футерівці тришарової конструкції труби (залізобетон – теплова ізоляція (мінеральна вата) – футерівка) методом тепловізійного діагностування визначити складніше, тому що у цьому випадку внаслідок термічного опору теплової ізоляції потік тепла крізь бетонну стінку знижується у 2-3 рази, в результаті чого знижується абсолютна температура зовнішньої поверхні димової труби. Саме тому наявність теплової ізоляції перешкоджає виявленню й інших дефектів, крім теплової ізоляції, за рахунок відносно малих значень температурних опорів решти конструктивних шарів. Тому навіть при використанні в процесі проведення експериментальних досліджень тепловізора AGA-782 (Швеція) діапазон його чутливості на той час (1980-ті рр.) був недостатнім для отримання термограм зовнішньої поверхні труби, температури якої відповідали інтервалу до 5...10 °С вище температури навколишнього середовища.

Незважаючи на недосконалість перших тепловізорів одразу почали проводитися дослідження з розробки способів визначення технічного стану промислових димових труб. І тут виникла основна проблема: як встановити зв'язок між зареєстрованими

Питомі теплові потоки, що проходять крізь бетонну стінку в залежності від конструкції труби

Конструкція фрагменту	Питомий тепловий потік, Вт/м ²	
	розрахунковий	вимірний
Бетонна стінка	670	581
Бетонна стінка + кладка футерівки	346	278
Бетонна стінка + теплоізоляція + кладка футерівки	127	119

ними аномаліями температурного поля на поверхні труби і параметрами її внутрішньої структури. На жаль і до сьогодення часу загальних рекомендацій щодо вирішення цієї проблеми не існує внаслідок відсутності універсальної методики обробки термограм. Це пов'язано в першу чергу з тим, що кожен тип димової труби має свої особливості аномального розподілення температури на її поверхні (й на різних її ділянках), які можуть бути викликані різними факторами.

Роботи в цьому напрямку в основному були пов'язані з розробкою моделей термограм аномальних температурних полів на зовнішній поверхні димової труби, викликаних наявністю дефектів у її структурі. Дослідження проводилися з використанням прямої задачі дефектоскопії у двох напрямках:

- розробка теоретичних розрахункових моделей температурних полів дефектів димової труби;
- отримання експериментальним шляхом моделей температурних полів штучних дефектів в структурі димової труби.

Для розробки розрахункових моделей розміщення температурних полів на зовнішній поверхні однієї із залізобетонних труб, яка була виконана з притискною ізоляцією з діатомової цегли та мінеральних плит між залізобетонним стовбуром і футерівкою, була здійснена тепловізійна фіксація із трьох точок термограми температурного поля зовнішньої поверхні димової труби висотою 180 м. Температура димових газів складала 146 °С, а зовнішнього повітря – 16,5 °С. На термограмі труби зміна температури по всій її поверхні відповідала діапазонам 21...26 та 19...24 °С. Проектному стану димової труби відповідала температура близько 9 °С.

Для такої залізобетонної труби були розраховані можливі зміни температури на зовнішній поверхні стовбура за висотою в залежності від стану її конструкції. Графіки кривих зміни температури за висотою стовбура наведені на рис. 5.

Максимум температур близько 25 °С на зовнішній поверхні стовбура димової труби і за тепловими розрахунками згідно з графіками в своїй більшості відповідав конструктивному стану труби без притискної ізоляції.

Наведений спосіб отримання теоретичних термограм шляхом проведення розрахунків температурних полів на зовнішній поверхні труби для умов тепловізійної зйомки був проведений лише з урахуванням конструктивних варіантів димової труби у стаціонарному режимі її роботи. В дійсності при розшифруванні отриманих термограм та при проведенні теплоаеродинамічних розрахунків димових труб необхідно проводити старанний аналіз з урахуванням різноманітних змін теплообмінних та теплофізичних коефіцієнтів, які в сукупності своїй за-

лежать від дійсної температури та швидкості газів у димовій трубі, температури зовнішнього повітря в період тепловізійної зйомки, швидкості вітру, вологості повітря тощо. При цьому розрахунки мають виконуватись з припущенням, що конструкція димової труби виконана у відповідності до проекту.

При аналізі причин неспівпадіння термограм димової труби, отриманих шляхом тепловізійної зйомки результатами аналітичних розрахунків необхідно додатково проводити розрахунки при зміні різних факторів. Серед причин неспівпадіння можна вважати невідповідність фактичної конструкції димової труби її проектному рішенню, неточності визначення теплообмінних коефіцієнтів та інших факторів, у тому числі й зовнішнього середовища.

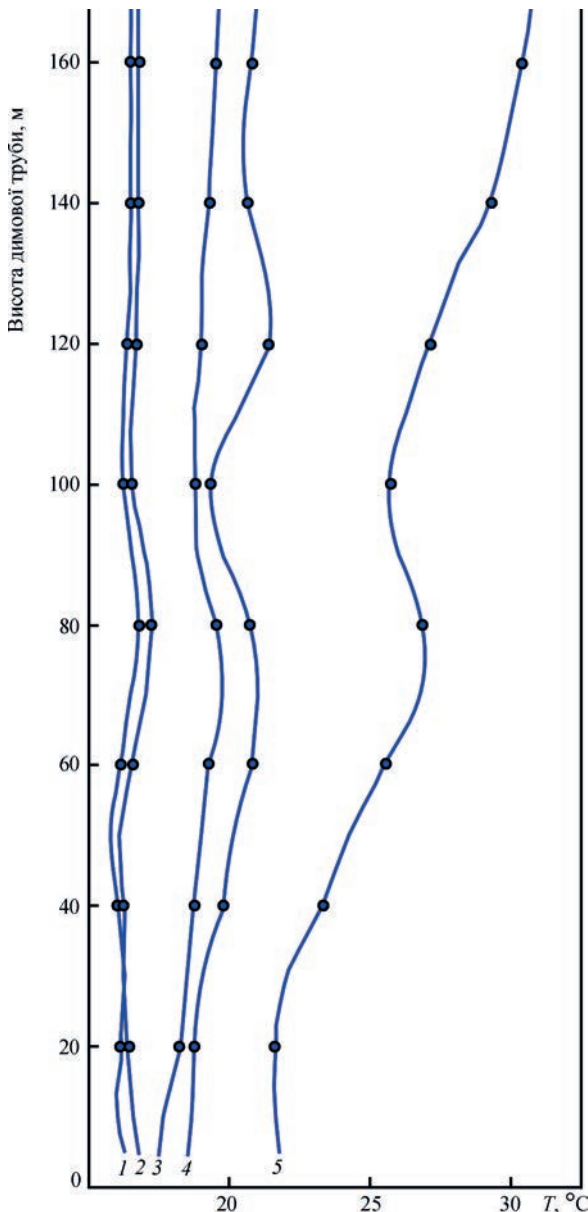


Рис. 5. Розрахункові зміни температури на зовнішній поверхні стовбура димової труби за висотою в залежності від її конструкції: 1 – проектна конструкція (залізобетонний стовбур, футерівка, теплова ізоляція, притискна ізоляція); 2 – конструкція без футерівки; 3 – конструкція без теплової ізоляції; 4 – конструкція без притискної ізоляції; 5 – одношарова конструкція

Але при наявності дефектів різноманітного характеру в структурі складових частин димової труби аналітичне дослідження температурних полів в зоні дефекту має суттєві труднощі, тому що задача теплотехнічного розрахунку перетворюється в цьому випадку із одновимірної як мінімум у двовимірну. Оскільки аналітичних рішень двовимірних задач для тришарової конструкції димової труби немає, то результати тепловізійних зйомок у вигляді термограм її поверхні не дають прямої відповіді на питання про її технічний стан.

Застосування другого способу для визначення технічного стану димової труби, пов'язаного з використанням моделей термограм температурних полів її зовнішньої поверхні шляхом виготовлення у її структурі штучних дефектів, вимагає значних витрат часу та коштів на виготовлення фрагментів таких труб, а також проведення експериментальних досліджень. Визначення технічного стану димових труб з використанням моделей обох видів здійснюється шляхом порівняння реальних термограм температурних полів несущільностей в структурі труби з теоретичними або експериментальними моделями термограм температурних полів.

На рис. 6 наведена структурна схема процесу визначення технічного стану димової труби пасивним тепловізійним методом з використанням теоретичних та експериментальних моделей термограм аномалій температурних полів зовнішньої поверхні труби.

Із схеми рис. 6 випливає, що процес визначення технічного стану промислових димових труб пасивним тепловізійним методом шляхом вирішення прямої задачі дефектоскопії на даний час складається з двох етапів:

- збирання даних пасивним тепловізійним методом контролю про несущільності в структурі димової труби у вигляді аномалій температурного поля на зовнішній поверхні;
- обробка даних контролю з використанням моделей термограм аномалій температурних полів дефектів димових труб для оцінки їх технічного стану. Прийняття рішення про технічний стан димової труби в цьому випадку має статистичний характер.

Необхідно зауважити, що розробка теоретичних та експериментальних моделей термограм температурного поля є рутинною процедурою і практично не відповідає реальним умовам експлуатації промислових димових труб. Процес розшифрування отриманих термограм аномалій температурного поля зовнішньої поверхні труби вимагає від дефектоскопіста значного досвіду та методологічних підходів. Тому фактично на сьогоднішній період офіційних методів оцінки технічного стану функціонуючих димових труб без зупинки будь-якого технологічного процесу практично не розроблено [9].

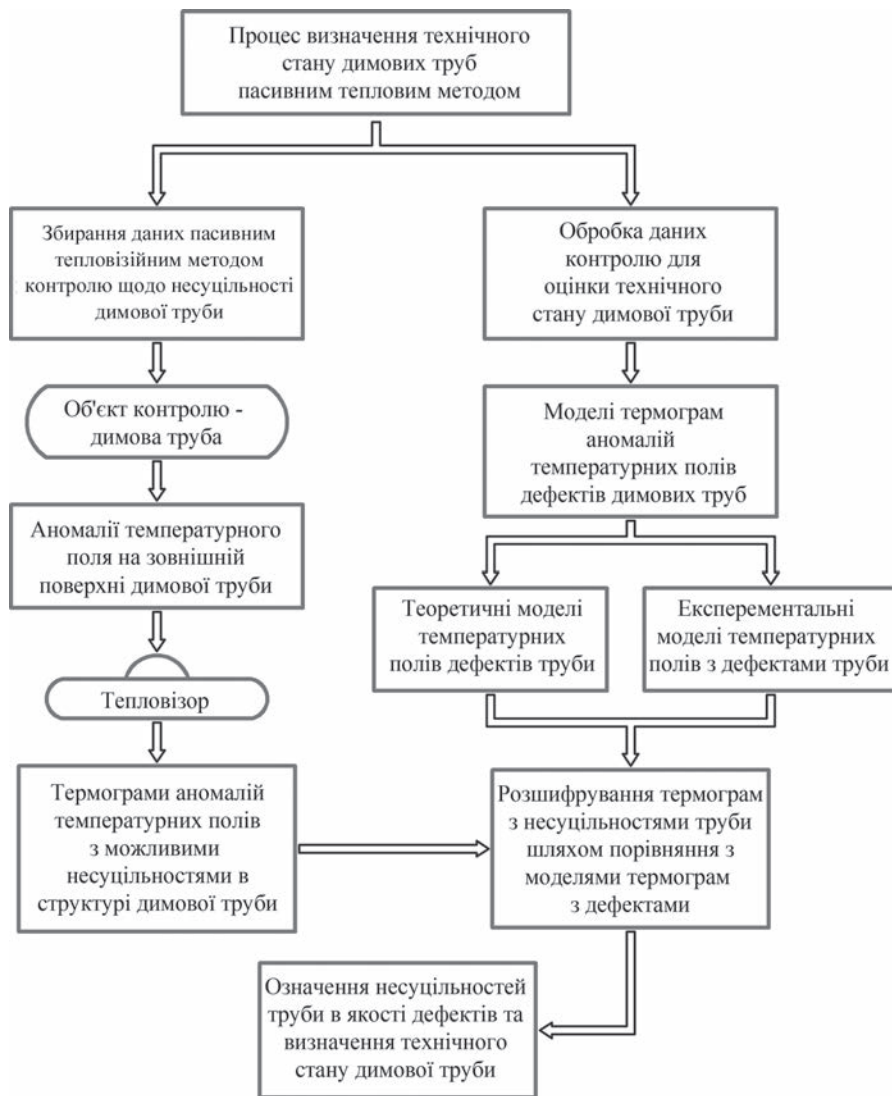


Рис. 6. Структурна схема процесу визначення технічного стану димових труб пасивним тепловізіонним методом

Це підтверджується також й більш пізніми результатами досліджень, наведеними в роботі [10]. Виявлення прихованих дефектів димових труб при використанні пасивного тепловізіонного методу ґрунтується на використанні принципу порівняння аномалії температурного поля на поверхні труби з еталонною (бездефектною). Еталонна зона аномалії визначається з технологічних міркувань проблеми або в ході тепловізіонної зйомки.

На даний час висновок про технічний стан димової труби в значній мірі приймається на основі аналізу амплітуди виявленої температурної аномалії та морфології температурних зон на зовнішній поверхні димових труб. Кінцевий користувач димової труби рішення про ступінь критичності виявлених дефектів пасивним тепловізіонним методом приймає також на підставі існуючих методик та стандартів.

Вирішення задачі визначення технічного стану димових труб без виведення їх з експлуатації лежить у площині використання методів і моделей теплової дефектометрії та теплової томографії, які успішно розвиваються в активному теплово-

му контролі. Розробка методів і моделей теплової дефектометрії та теплової томографії для пасивного тепловізіонного методу дозволить реалізувати автоматизовані тепловізіонні технології у структурі контрольно-діагностичного процесу, що підвищить достовірність виявлення дефектів в димових трубах в масштабі реального часу.

Висновки

1. Серед важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів промислових підприємств найбільше розповсюдження отримали димові труби різного призначення, дистанційне пасивне тепловізіонне діагностування яких є важливою й невід'ємною частиною визначення їх технічного стану.

2. Своєчасне проведення обстеження технічного стану димових труб пасивним тепловізіонним методом, що не вимагає зупинки виробничих процесів, дозволяє на початковій стадії виявити в структурі труб різноманітні дефекти й прогнозувати їх розвиток.

3. Аналіз виявлених дефектних зон димової труби дозволяє знизити затрати на проведення нового інструментального обстеження труб, а своєчасний їх ремонт дає можливість експлуатувати димові труби без аварійних ситуацій.

Список літератури

1. Маслова В.А., Стороженко В.А. (2004) *Термография в диагностике и неразрушающем контроле*. Харьков, Компания СПИТ.
2. Бажанов С.А. (2000) *Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств*. Приложение к журналу «Энергетик». Москва, НТФ Энергопрогресс.
3. Бабак В.П. (2016) Моніторинг об'єктів теплоенергетики з використанням безпілотних літальних апаратів. *Збірка доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT – 2016»*. Київ, УТ НКТД, сс. 48–53.
4. Вавилов В.П. (1991) *Тепловые методы неразрушающего контроля*: Справочник. Москва, Машиностроение.
5. Ельшин А.М., Ижорин М.Н., Жолудев В.С., Овчаренко Е.Г. (2001) *Дымовые трубы*. Сатъянов С.В. (ред.). Москва, Стройиздат.
6. Ханухов Х.М., Яровой С.Н. (2017) Повреждаемость металлических дымовых труб и несущих башен на протяжении жизненного цикла и предельные значения основных дефектов и повреждений. *Строительство, материаловедение, машиностроение*, **99**, 218–227.
7. Заседачев И.Б., Дужих Ф.П. (1970) Контроль эксплуатационных режимов работы дымовых железобетонных труб. *Электрические станции*, **11**, 42–44.
8. Дужих Ф.П. (1988) Тепловизионное обследование температурных полей в дымовых трубах. *Теплоэнергетика*, **5**, 51–55.

9. Яблонько Е. (2011) Основные проблемы в эксплуатации дымовых труб. *Молодой ученый*, **9**, 65–68.
10. Бабушкин Р.А., Глызов Д.С., Иванов Ю.П. (2015) Тепловизионная диагностика дымовых труб. *Инновационная наука*, **9**, 52–57.

References

1. Maslova, V.A., Storozhenko, V.A. (2004) *Thermography in diagnostics and non-destructive testing*. Kharkov, SPIT Company [in Russian].
2. Bazhanov, S.A. (2000) *Infrared diagnostics of electric equipment of switching devices*. Appendix to Journal «Energetik». Moscow, NTF Energoprogress [in Russian].
3. Babak, V.P. (2016) *Monitoring of thermal power engineering facilities using drones*. In: *Proc. of 8th Nat.Sci.-Techn. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics – UkrNDT – 2016*, Kyiv, UT NKTD, 48-53 [in Ukrainian].
4. Vavilov, V.P. (1991) *Thermal methods of nondestructive testing*: Refer. book. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Elshin, A.M., Izhorin, M.N., Zholudev, V.S., Ovcharenko, E.G. (2001) *Flue pipes*. Ed. by S.V.Satianov. Moscow, Strojizdat [in Russian].
6. Khanukhov, Kh.M., Yarovoj, S.N. (2017) Damage level of metal flue pipes and load-carrying towers during the life cycle and limit values of the main defects and damage. *Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroenie*, **99**, 218–227 [in Russian].
7. Zasedatelev, I.B., Duzhykh, F.P. (1970) Control of operational modes of flue concrete pipes. *Elektricheskie Stantsii*, **11**, 42–44 [in Russian].
8. Duzhykh, F.P. (1988) Thermal imaging of temperature fields in flue pipes. *Teploenergetika*, **5**, 51–55 [in Russian].
9. Yablonko, E. (2011) Main problems in flue pipe operation. *Molodoj Uchyonyj*, **9**, 65–68 [in Russian].
10. Babushkin, R.A., Glyzov, D.S., Ivanov, Yu.P. (2015) Thermal imaging diagnostics of flue pipes. *Innovatsionnaya Nauka*, **9**, 52–57 [in Russian].

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ ПАССИВНЫМ ТЕПЛОВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ

В.Ю. Глуховский, О.Г. Бондаренко

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. Email: office@paton.kiev.ua

Выполнен анализ отраслей промышленности, в которых получил распространение пассивный тепловизионный метод контроля для диагностирования технического состояния труднодоступных и потенциально опасных промышленных объектов. Рассмотрены условия эксплуатации наиболее распространенных потенциально опасных промышленных дымовых труб. Проанализированы причины образования и основные типы дефектов и повреждений в структурных элементах дымовых труб. Приведены основные способы оценки технического состояния дымовых труб пассивным тепловизионным методом путем решения прямой задачи дефектоскопии с использованием моделей термограмм аномалий температурных полей на внешней поверхности дымовой трубы. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: дымовая труба, пассивный тепловизионный метод контроля, причины образования несплошностей, способы оценки технического состояния

FEATURES OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF INDUSTRIAL FLUE PIPES BY PASSIVE THERMAL IMAGING METHOD

V.Yu. Glukhovskiy, O.G. Bondarenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Analysis of industries, where passive thermal imaging methods of control became accepted for diagnostics of technical condition of difficult-of-access and potentially hazardous industrial facilities, was performed. Service conditions of the most common potentially hazardous industrial flue pipes were considered. The causes for formation and main types of defects and damage in structural elements of flue pipes were analyzed. The main methods for assessment of technical condition of flue pipes by passive thermal imaging method are presented, that is performed by solving the direct flaw detection problem using models of thermograms of anomalies in temperature fields on the flue pipe outer surface. 10 Ref. , 1 Tabl., 6 Fig.

Key words: flue pipe, passive thermal imaging method of control, causes for formation of discontinuities, methods of assessment of the technical condition

Надійшла до редакції
17.07.2019