

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЯГКИЙ ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 620.179

**ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ
БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ТРУБОПРОВІДІВ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі фізики Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Стороженко Володимир Олександрович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
професор кафедри фізики.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
Щапов Павел Федорович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
професор кафедри промислової та біомедичної
електроніки;

доктор технічних наук, професор,
Хандецький Володимир Сергійович,
Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара,
завідуючий кафедрою електронних обчислювальних
машин.

Захист відбудеться 23 травня 2019 р. о 14 - 00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради 064.050.09 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 12 квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Костюков І. О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах розвитку промисловості тепловий неруйнівний контроль (ТНК) є одним з найбільш розповсюджених методів контролю, який перспективно використовувати для визначення якості виробництва і ступеня зносу обладнання у багатьох галузях промисловості і сільського господарства.

Однак, у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю, використання теплового контролю пов'язане з рядом проблем, які ускладнюють його застосування. Підвищення якості виробів та безпеки виробництва вимагають вирішення цих проблем. Тому починаючи з кінця 80 – тих, початку 90 – тих років минулого століття вирішенням задач пов'язаних з підвищенням надійності та точності теплового контролю займався ряд провідних вчених, таких як Вавилов В.П., Будаїн О.Н., Молдаг К.Р.В., Ключев В.В. та інші. В їх працях розглядалися проблемами застосування ТНК, однією з них є проблема великої кількості шумів і завад різної природи, так і те, що теплова дефектоскопія (ТДС) застосовується, як правило, не в оптимальних режимах контролю, що істотно погіршує виявлення дефектів та обмежує достовірність результатів контролю. В результаті широкий клас об'єктів (насамперед композиційні структури), для дефектоскопії яких найбільш перспективним є тепловий метод, контролюється недостатньо ефективно, що не забезпечує необхідну якість і надійність в експлуатації.

Тому підвищення завадостійкості теплової дефектоскопії, засноване на більш глибокому аналізі процесів виявлення дефектів та розробці принципів отримання оптимальної процедури контролю і подальшої обробки отриманих результатів з використанням диференційного та вейвлет аналізу, є важливим і актуальним науково – практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізики Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках виконання держбюджетної НДР за планом МОН України, «Технологии применения термографических приборов для анализа температурных полей» (ДР № 0103U011561), а також при виконанні госпдоговірних робіт «Розробка нових методів термографічного обстеження газоперекачувального обладнання» (ДР № 0107U011577), «Визначення можливостей діагностики стану обладнання та трубопроводів ОП ЗАЕС шляхом термографічних обстежень» (ДР № 0107U011580), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає в підвищенні чутливості і достовірності теплової дефектоскопії шляхом зменшення завад за рахунок вибору режиму контролю по критерію максимізації відношення «корисний сигнал»/«завада», та спеціальної обробки отриманих результатів на прикладі контролю багатошарових конструкцій та трубопроводів.

Для досягнення вказаної мети були поставлені наступні задачі:

- проаналізувати існуючі методи боротьби з факторами, що обмежують чутливість ТДС;

- побудувати теплофізичну модель, що адекватно описує об'єкти контролю та умови проведення ТДС, та на її основі дослідити основні процеси виявлення дефекту, а також встановити оптимальні режими проведення ТДС за критерієм максимуму відношення «сигнал / завада»;

- реалізувати метод оптимізації процедури ТДС за критерієм максимуму відношення сигнал/завада у вигляді прикладного пакета комп'ютерних програм для розрахунку оптимальних режимів контролю;

- розробити методи обробки результатів теплової дефектоскопії шляхом зменшення та фільтрації завад на основі використання вейвлет аналізу і диференційних перетворень.

- провести експериментальну перевірку отриманих результатів шляхом проведення ряду натурних експериментів на різних досліджуваних зразках.

Об'єкт досліджень - процес визначення прихованої неоднорідності (дефекту) в структурах різних багат шарових виробів у вигляді локальних аномалій температурного поля на їх поверхні.

Предмет досліджень - методи теплового неруйнівного контролю та теплової дефектоскопії, що дозволяють виявляти приховані дефекти об'єкта контролю в умовах наявності завад.

Методи досліджень, що реалізовані при вирішенні поставлених задач базуються на положеннях теорії нестационарної теплопровідності (побудова теплофізичної моделі), та методах математичного моделювання (розрахунки величин очікуваного сигналу та завад), теорії ймовірності і математичної статистики (розрахунок достовірності отриманих результатів) і вейвлет аналізу (зменшенні рівня завад викликаних нерівномірністю теплового поля джерела збудження), методи диференційної фільтрації (усунення завад викликаних неоднорідністю клейового шару), та методи обробки зображень (компенсація завад викликаних сторонніми джерелами збудження та неоднорідності випромінювальної здатності поверхні зразка).

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримала подальший розвиток теплофізична модель багат шарової пластини, яка враховує неоднорідності складу об'єкта контролю (ОК) і дозволяє визначити режими проведення теплової дефектоскопії, які забезпечують зменшення випромінювальної завади.

2. Удосконалено метод побудови теплофізичних моделей багат шарових конструкцій, що відрізняється від існуючих моделей, тим що одночасно враховує температурні ефекти від неоднорідних регулярних структур та проходження тепла крізь дефект і дозволяє розраховувати очікувану величину сигналу (температурного перепаду) від дефектів і підвищити відношення сигнал / завада за рахунок вибору режиму проведення дефектоскопії.

3. Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість виявлення рідкої фази в магістральних газопроводах безконтактним дистанційним методом на основі теплового неруйнівного контролю, що дозволило проводити технічні роботи на ділянках накопичення рідкої фази тільки у разі виникнення у цьому потреби.

4. Отримали подальший розвиток методи та послідовність їх використання для максимального зменшення завад у тепловій дефектоскопії, за рахунок вейвлет аналізу та диференціальної фільтрації яка базується на побудови операторів частинних похідних сигналу від температурного контрасту, що дозволило значно зменшити заваду викликану неоднорідністю клейового шару.

Практичне значення одержаних результатів для неруйнівного контролю технічного стану об'єктів промислового призначення:

- у вигляді програмного забезпечення реалізовані розроблені методи для розрахунку режиму максимізації відношення сигнал/завада, та проведення теплової дефектоскопії й оцінки величини очікуваного сигналу від дефекту для виробів із внутрішньою неоднорідністю, що дозволяє підвищити чутливість контролю.

- реалізовано у вигляді пакета комп'ютерних програм алгоритм зменшення впливу характерних завад на очікуваний сигнал від дефекту при застосуванні теплового неруйнівного контролю багат шарових конструкцій та трубопроводів, що дозволило підвищити швидкість та ефективність контролю.

- отримано експериментальні дані, у вигляді термограм, що обґрунтовують ефективність застосування термографії до неруйнівного контролю багат шарових конструкцій різного застосування, а також газопроводів, паропроводів та трубопроводів іншого призначення без виводу їх з експлуатації.

Результати, отримані у дисертаційній роботі, використані на підприємствах УкрНДІГаз (м. Харків), ДП «ЮжМаш» (м. Дніпро), на «АС» (м. Запоріжжя), а також прийняті до впровадження в УкрНДІГАЗ.

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні та експериментальні результати роботи, що винесені до захисту, отримані автором самостійно. Серед них: розроблена теплофізична модель багат шарової пластини, яка враховує неоднорідності складу об'єкта контролю. Реалізовано у вигляді пакета комп'ютерних програм, алгоритми зменшення впливу характерних завад на очікуваний сигнал від дефекту при застосуванні теплового неруйнівного контролю. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість виявлення рідкої фази в магістральних газопроводах методами теплового неруйнівного контролю. Розроблені методи поворотної і диференціальної фільтрації, та ефективна послідовність використання розроблених методів с вже існуючими (вейвлет аналіз, методи обробки зображень та алгоритми теорії ймовірності і математичної статистики) для зменшення характерних завад.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались й обговорювались на Міжнародних семінарах та конференціях : «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики» (Харків, 2004), «Метрологія й вимірювальна техніка» (Харків, 2008), «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 2009), «Традиции, тенденции и перспективы в научных исследованиях» (Чистополь, 2010), «Радіоелектроніка та молодь у 21 сторіччі» (Харків, 2012), на міжнародній конференції «Радіоелектронне

приладобудування як основа високотехнологічного оновлення всіх галузей виробництва» (Харків, 2013).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, з них - 8 статей у наукових фахових виданнях України (в тому числі одна у виданні входить в міжнародні наукометричні бази), 1 – в іноземному виданні, 8 тез доповідей на конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 119 сторінках, містить 55 рисунків, включає 7 таблиць, список з 115 найменувань використаних джерел на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи. Відзначено актуальність проблеми досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Сформульовано мету і завдання досліджень. Розкрито наукову новизну і відзначено практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

У першому розділі подано коротку характеристику сучасного стану теплового методу неруйнівного контролю. Показано, що для контролю якості найбільш розповсюджених матеріалів в сучасній авіації і космічній техніці перспективно застосування теплової дефектоскопії.

Проаналізовані проблемами ускладнюючі застосування теплового неруйнівного контролю. Проведена робота по аналізу характерних завад різної природи, та методам боротьби з ними. На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність розвитку теплового методу, заснованого на більш глибокому дослідженні процесів виявлення дефектів і розробці принципів вдосконалення як процедури контролю, так і подальшої обробки отриманих результатів. Сформульовано завдання, які потребують вирішення для досягнення поставленої мети.

Другий розділ присвячений підвищенню завадостійкості активного теплового методу (теплової дефектоскопії) по виявленню дефектів типу порушення суцільності (сторонніх включень) в однорідних або композиційних структурах. До їх числа можна віднести багатошарові структури типу метал-неметал, склопластики, стільникові структури і труби. Для розрахунків оптимальних режимів ТДС в якості теплофізичної моделі об'єкта контролю (ОК) у вигляді стільникових конструкцій обрана багатошарова пластина, що адекватно відображає реальну конструкцію стільникової структури, яка складається з вуглепластикової обшивки, між двома шарами якої поміщений сотопласт (рис. 1). Неоднорідності типу непроклеї між обшивкою і сотопластом, які моделюються повітряним прошарком, і завада типу «нерівномірність клейового шару», що моделюється включенням стороннього матеріалу в сотопласт, також наведені на рис. 1. Для розрахунків по теплофізичній моделі використовується циліндрична система координат: r - радіальна координата; z - вертикальна координата, φ - кутова координата. Ряд завад, такі як неоднорідність випромінювальної здатності поверхні зразка і

«крайовий ефект», моделюються окремо. Для ефективного зменшення завад вони були розділені на дві групи: першу групу, в яку входять неоднорідність випромінювальної здатності поверхні ОК і адитивні завади, з огляду на її властивості подавляємо шляхом оптимізації режиму контролю, а другу, в яку входять мультиплікативні завади, виключаємо шляхом послідовної фільтрації отриманих термограм. Розрахунки по теплофізичній моделі (рис 1.) проводилися двома методами: методом кінцевих різниць і конечних елементів, після чого порівнювалися з даними, отриманими в результаті експерименту на декількох різних зразках.

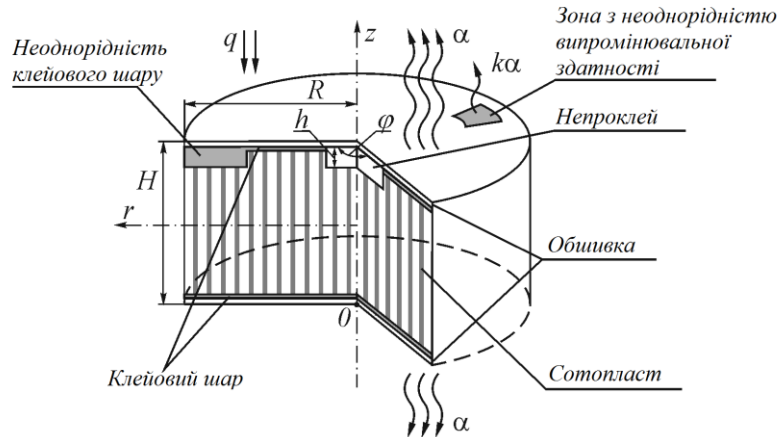


Рисунок 1 – Об'єкт контролю: R - радіус ОК; H - товщина ОК; q - потужність нагріву; α - коефіцієнт тепловіддачі поверхні

Аналіз побудованої теплофізичної моделі проводиться шляхом розв'язання диференціального рівняння нестационарної теплопровідності, записаного для обраної циліндричної системи координат:

$$\operatorname{div}(\lambda(\vec{r}, T) \nabla T(\vec{r}, t)) + q(\vec{r}, t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

де c - питома теплоємність матеріалів ОК; ρ – густина матеріалу.

Теплофізична модель (рис. 1) побудована за даною геометричною моделлю і задається граничними умовами (2) - (4), що відображають реальні умови проведення ТДС, тобто нагрівання ОК зовнішнім джерелом тепла, теплообмін з навколишнім середовищем з коефіцієнтом α .

На зовнішніх поверхнях ОК виконуються граничні умови 2-го і 3-го роду:

$$\text{для } z=H, \quad \left(\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) \Big|_S = \alpha \left(T(\vec{r}, t) \Big|_S - T_{\text{середовище}} \right) - q(\vec{r}, t); \quad (2)$$

$$\text{для } z=0, \quad -\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} \Big|_S = -\alpha \left(T(\vec{r}, t) \Big|_S - T_{\text{середовище}} \right), \quad (3)$$

для кордону розділу між ОК та дефектом гранична умова (4)

$$-\lambda_1(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_1(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) = -\lambda_2(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_2(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) \quad (4)$$

де $T(\vec{r}, t)$ - координатно-часова функція температури; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалів ОК; q - густина потоку тепла від зовнішнього джерела (нагрівача); ρ - густина матеріалів ОК. Особливістю даної моделі, на відміну від ряду відомих моделей, є одночасне урахування як тепловіддачі з поверхні α , що нагрівається, так і теплопровідності через дефект λ (повітря). Для розв'язання рівняння (1) застосовувався чисельний (сітковий) метод скінченних різниць і метод кінцевих елементів. Для його реалізації застосовувався розроблений дисертантом програмний пакет «TermoPro_TFH_Statistic», що дозволяє розраховувати оптимальні режими контролю шаруватих структур, моделювати сигнал і заваду на поверхні ОК. В якості числового матеріалу використовувалися довідкові дані по одному з різновидів стільникових структур (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристики матеріалів ОК

Характеристики матеріалів	Вуглепластик обшивки	Полімерний стільниковий заповнювач
Теплопровідність (Вт/м К)	0,3–0,9	0,065
Ступінь чорноти	0,8–0,82	–
Товщина (мм)	0,8	28
Розмір комірки (мм)	–	2,5

Чисельні параметри дефекту закладені при моделюванні, (повітряний прошарок) були обрані такими: $h = 0,8$ мм (відповідає товщині обшивки), розкриття (товщина) $\delta = 0,2$ мм (відповідає товщині клейового шару), поперечний розмір $l = 5$ мм (відповідає розміру двох осередків). Аналіз розробленої теплофізичної моделі проведено за методикою, закладеною в зазначеному вище програмному пакеті, а саме: розв'язувалось рівняння (1) з граничними умовами (2) - (4), а розрахованою величиною був температурний контраст ΔT на поверхні ОК над місцем залягання дефекту. При цьому варіювалися параметри режиму проведення ТДС: густина потоку тепла q , тривалість нагріву поверхні ОК τ_n , час запізнювання τ_z (проміжок часу між закінченням нагрівання і реєстрацією температурного поля). Максимальна температура нагріву поверхні ОК обмежувалась значенням $T_{max} = 100^\circ\text{C}$ (для уникнення деструкції матеріалу).

З отриманого масиву значень визначався оптимальний режим ТДС, що відповідає критерію $\Delta T \rightarrow \Delta T_{max}$, параметри якого наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку режиму ТДС, що забезпечують максимум сигналу

q , кВт/м ²	τ_n , с	τ_z , с	ΔT , °C
28	15	3,3	1,73

Однак цей режим проведення ТДС не є оптимальним, тому що для зменшення завад необхідно максимізувати відношення сигнал / завада.

Для вирішення цього завдання використовувалась зміна потужності нагрівача q еквівалентна флуктуації ε . Дійсно, якщо, наприклад, на обраній ділянці поверхні об'єкта контролю ε відхиляється в більшу сторону, то і нагрів цієї ділянки, тобто T_{max} , буде більшим.

Результати такого моделювання наведені на рис. 2, де представлено розвиток в часі поверхневої температури для двох випадків: рис. 2, а - бездефектний зразок з відхиленням по ε ; рис. 2, б - зразок з дефектом.

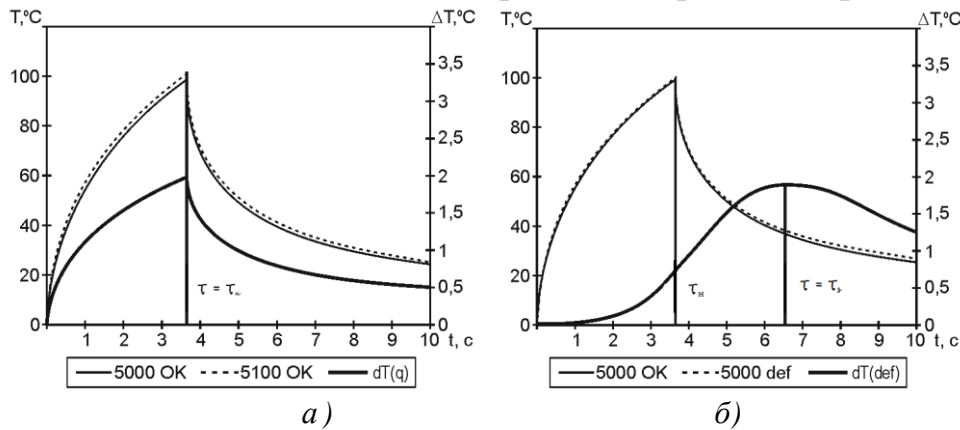


Рисунок 2 – Розвиток в часі поверхневої температури: а - бездефектного зразка з відхиленням по ε ; б - зразка з дефектом

Порівняння представлених залежностей показує, що моменти часу, які відповідають максимальним значенням завади ΔT_ε і корисного сигналу ΔT_{def} , не збігаються: сигнал від завади досягає максимуму відразу після закінчення нагрівання $\tau = \tau_n$, а корисний сигнал - через певний час запізнювання $\tau = \tau_s$.

Цей факт відкриває можливість максимізувати відношення сигнал / завада, (тобто, $\Delta T_{def}/\Delta T_\varepsilon$) шляхом вибору відповідного часу реєстрації температурного поля на поверхні об'єкта контролю.

Даний висновок справедливий і для завад іншого виду - нерівномірного нагрівання поверхні ОК, тобто флуктуації q , урахувавши це сформуємо «функцію завади» $U(\vec{r}, t)$, що враховує адитивні і мультиплікативні завади (5) для підвищення точності розрахунку оптимального режиму контролю.

$$u(\vec{r}, t) = \tilde{M}T(\vec{r}, t) + \tilde{A} \quad (5)$$

де M - мультиплікативна завада; A - адитивна завада; $T(\vec{r}, t)$ - розподіл розрахункового температурного поля ОК.

Таким чином, отримуючи максимальне значення критерію $\Delta T_{def}/\Delta U$, замість критерію $\Delta T_{def}/\Delta T_\varepsilon$, отримуємо більш точне значення часу реєстрації для оптимального режиму контролю.

Зокрема, згідно з даними рис. 2, б, при виборі часу запізнювання $\tau_s = 6,35$ с відношення сигнал / завада дорівнює 0,4, а при $\tau_s = 6,65$ с цей показник становить 2,6, тобто в 6,5 разів більше.

Розроблена модель дозволяє не тільки оптимізувати режим контролю за вказаним критерієм, але і визначати чутливість методу.

Розроблений і реалізований алгоритм моделювання має досить високу гнучкість при реалізації розрахунків за різними теплофізичними моделями, що

дозволяє модифікувати процес під велику кількість об'єктів, зокрема, для напірних газо- і паропроводів.

Так, для перевірки гнучкості алгоритму до модифікації були розроблені і випробувані теплофізичні моделі напірних трубопроводів з локальним дефектом типу стоншення стінки, і друга модель з глобальною несправністю типу «наявність рідкої фази», яка знижує ефективний перетин об'єкта контролю. Перша теплофізична модель наведена нижче (рис. 3).

Об'єкт контролю представляється у вигляді циліндра з неоднорідністю (дефектом). Дефект у вигляді стоншення стінки модельований пазом всередині ОК, глибиною h_0 і розміром l_0 .

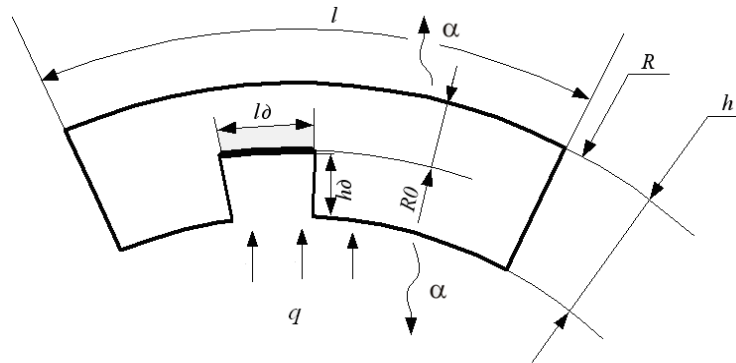


Рисунок 3 – Об'єкт контролю у вигляді стоншення труби паропроводу

Відповідно до обраної моделі розв'язання здійснюється при граничних умовах 2-го і 3-го роду, рівняння (2) та (3) на зовнішніх поверхнях ОК.

Товщина стінки труби становила 12 мм і 16 мм. Температура носія становила 40°C, 100°C, 200°C, що відповідає реальним паропроводам, зокрема на АЕС. Отримані результати представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку теплового контрасту на поверхні ОК.

$h_0, \text{мм}$	12				16					
$T_H, ^\circ\text{C}$	200				40	100	200			
$h_0, \text{мм}$	2	4	6	8	8	8	2	4	6	8
$\Delta T_c, ^\circ\text{C}$	2,3	3,28	4,11	6,92	0,56	1,12	0,34	0,61	1,22	2,83

Теоретична оцінка підтверджує можливість виявлення дефектів типу «стоншення стінки» в паропроводах, оскільки температурний перепад від дефекту (корисний сигнал) досягає декількох градусів, в той час як чутливість сучасних тепловізорів становить 0,1- 0,2°C. Відомо, що достовірне виділення оператором зон з аномальною температурою, які відповідають дефекту, можливо при 3-5 кратному перевищенні сигналу над завадами.

Для другої моделі, як наведено вище, характерним дефектом для газопроводів є скупчення конденсату, що призводить до звуження ефективного перерізу для прокачування газу. Для такого об'єкту розроблена теплофізична модель, яка схематично представлена на рис.4. Металевий циліндр з товщиною стінки h частково заповнений рідиною (конденсатом) з температурою T_2 ,

частково - газом з температурою T_1 . Температура навколишнього середовища T_0 , при цьому передбачається, що $T_1 > T_2 > T_0$.

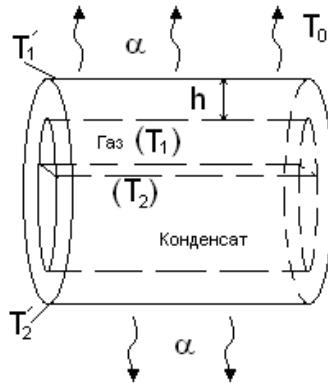


Рисунок 4 – Схематична модель газопроводу

Для математичного опису теплофізичної моделі використовувалися граничні умови: на межі розділу метал - газ, метал - рідина і метал - повітря (довкілля) граничні умови 3-го роду з коефіцієнтами тепловіддачі α_1 , α_2 і α відповідно.

При аналізі моделі визначаємо значення величини температур на поверхні труби: T'_1 - в її верхній частині; T'_2 - в її нижній частині.

Результати розрахунку температурного перепаду $\Delta T = T'_1 - T'_2$ на поверхні труби при постійній температурі газу ($T_1 = 16^\circ\text{C}$) і різних температурах навколишнього середовища з використанням програмного комплексу «TermoPro_TFH_Statistic» дають температурний перепад $\Delta T_{теор} = 0,7^\circ\text{C}$.

Отримані експериментальні і розрахункові дані підтверджують принципову можливість використання алгоритму для контролю рівня конденсату в газопроводі. При цьому метод має такі важливі переваги як безконтактність і можливість оперативної реалізації.

У третьому розділі наведені експериментальні результати апробації теплового методу стосовно об'єктів різних класів, зокрема, до стільникових конструкцій, паро- і газопроводів.

Для порівняння результатів, отриманих теоретичним шляхом, були проведені експерименти на зразку стільникової конструкції, параметри якої наведені в табл. 1. Зразок містив два ідентифіковані дефекти з розмірами в правій верхній і лівій нижній області ОК: 1) 40×70 (мм); 2) 20×80 (мм).

Інші параметри відповідали розрахунковим - глибина $h = 0.8$ мм, розкриття $\delta = 0,2$ мм.

Для проведення експериментів використовувався тепловізор IRTIS-200, створений авторами двовимірний нагрівач радіаційного типу, керований таймером (площа нагріву нагрівача, тобто площа кадру становила 15×15 см, нерівномірність нагріву по полю кадру 12%).

Для перевірки оптимальності розрахованого режиму контролю було отримано ряд термограм: в режимі максимізації відношення сигнал/завада, до і після нього (рис.5).

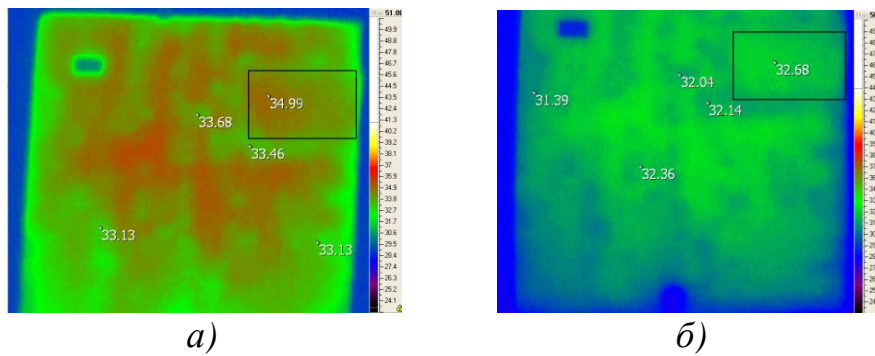


Рисунок 5 – Термограми об'єкта контролю: а - оптимальний режим; б - довільний режим

З термограм видно, що в оптимальному режимі тепловий контраст, викликаний дефектом, істотно вищий $\Delta T = 1,53^\circ\text{C}$, ніж в неоптимальному $\Delta T = 0,54^\circ\text{C}$. Відмінність експериментально отриманого значення $\Delta T = 1,53^\circ\text{C}$ від розрахункового $\Delta T = 1,73^\circ\text{C}$ знаходиться в межах похибки. При цьому експериментально отримане значення $\Delta T = 1,53^\circ\text{C}$ досить близько до розрахункового $\Delta T = 1,73^\circ\text{C}$.

Однак при цьому, поряд з корисним сигналом, на термограмах присутні і температурні контрасти, викликані завадами (шумовий сигнал). Величини температурних контрастів, викликаних завадами, можна порівняти за величиною з корисним сигналом ($\Delta T = 1,36^\circ\text{C}$). Таким чином якщо використовувати для ідентифікації дефектів амплітудні ознаки, то вірогідність їх виявлення буде невеликою.

Також для перевірки теоретичних даних були досліджені газопроводи, результати дослідження наведені рис. 6.

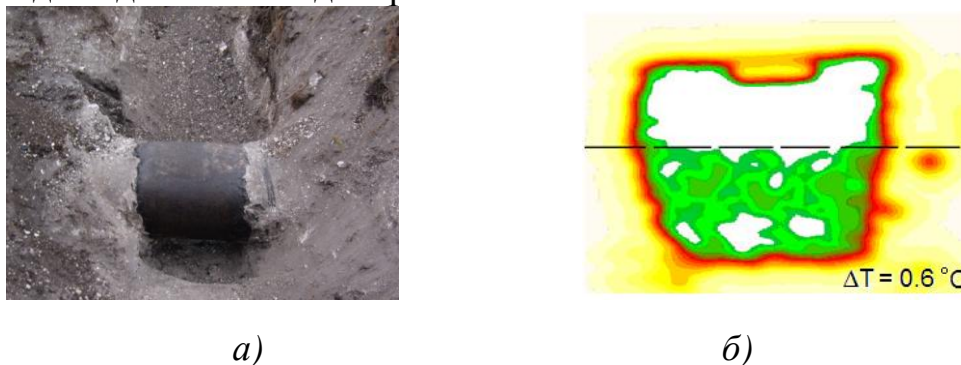


Рисунок 6 – Видиме зображення газопроводу і його оброблена термограма.

Експериментальні дослідження проводилися при термографічному обстеженні ділянки газопроводу Червонодонецької ДКС (нижня відмітка залягання трубопроводу), за таких умов: температура навколишнього середовища $T = 14^\circ\text{C}$, температура газу $T_1 = 16^\circ\text{C}$. При порівнянні отриманого теоретично перепаду температури, викликаного наявністю газового конденсату, $\Delta T_{теор} = 0,7^\circ\text{C}$ і зафіксованого експериментального значення $T = 0,6^\circ\text{C}$, видно що експериментальні результати з досить високою точністю підтверджують теоретичні.

Однак присутність на отриманих термограмах різного виду завад вимагає створення спеціальних методів обробки експериментальних даних.

Також були проведені експериментальні дослідження паропроводів системи охолодження Південноукраїнської АЕС. На їх основі можна зробити висновок, що використання методів теплового неруйнівного контролю є одним з найперспективніших напрямів.

При проведенні зйомки в робочих умовах системи паропроводів було виявлено присутність ще й адитивної завади - засвічення сторонніми джерелами випромінювання, що ясно видно на рис. 7.

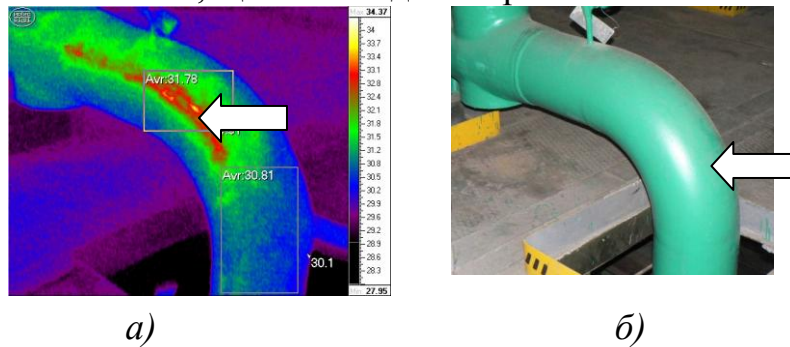


Рисунок 7 – Середня температура труби становить $= 30,81^{\circ}\text{C}$ – а); рівень засвічення від сторонніх джерел досягає $3,2^{\circ}\text{C}$ - б

Як видно, тепловий контроль паропроводів перспективний за умови подальшої обробки отриманої інформації з метою компенсації, подавлення, або фільтрації завад і шумів з огляду на їх значний вплив на інформативність методу.

Четвертий розділ присвячений розробці методів подавлення завад, таких як: засвічення сторонніми джерелами енергії, неоднорідність нагрівання, неоднорідність випромінювальної здатності поверхні зразка, неоднорідність клейового шару.

Наявність засвічень від сторонніх джерел призводить до виявлення неіснуючого дефекту, тобто до «помилкової тривоги». Метод усунення завади, викликаної зовнішніми умовами проведення експерименту, пов'язаний з тим, що вона не залежить від зразка. Таким чином, дві термограми одного зразка зроблені в однакових умовах, за винятком того, що друга термограма отримана від зразка повернутого на 90° , дає можливість усунути цю заваду шляхом повороту і поєднання зображень, як це показано на рис. 8.

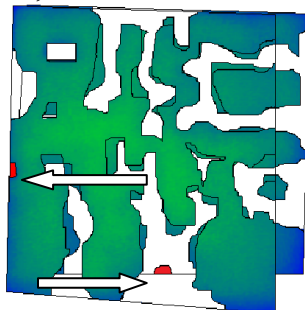


Рисунок 8 – Накладання термограм двох термограм

Елементи, які не пов'язані з внутрішньою структурою зразка, змінять своє місце розташування і фільтруються, тоді як інші неоднорідності теплового поля збережуть своє місце розташування.

Компенсацію неоднорідності нагріву досліджуваної поверхні ОК можна провести на етапі цифрової обробки отриманих експериментальних даних. Як варіант такої обробки пропонується використання можливостей апарату вейвлет-аналізу.

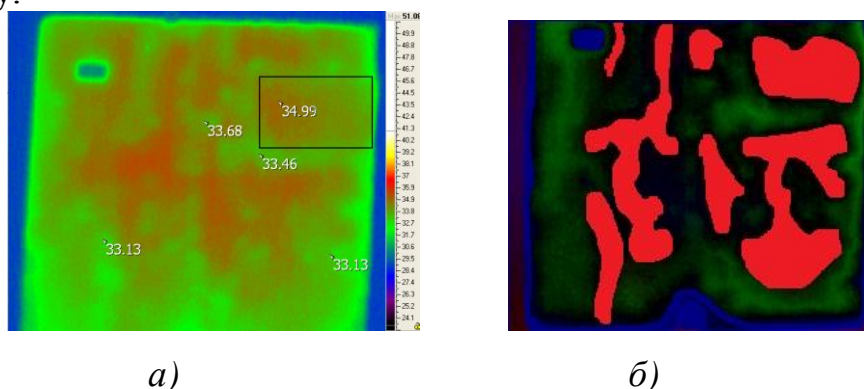


Рисунок 9 – Вихідна термограма - *а*; обробка термограми дискретним вейвлетом Мейера - *б*

При цьому виникає питання вибору вейвлета для аналізу, оскільки на сьогодні можливе використання різних вейвлетів, в тому числі і двовимірних. Основним критерієм відбору є геометрія теплового поля, що створюється нагрівачем. У нашому випадку воно центрально симетрично, саме тому вейвлет для аналізу повинен бути симетричним. До того ж рекомендується, щоб він був досить гладким. Одним з таких вейвлетів є дискретний вейвлет Мейера, наведений на рис. 9, який і використовувався в даній роботі. Результат обробки наведено на рис. 9 (б). В результаті вдалося знизити рівень завади, пов'язаної з неоднорідністю нагрівання - з $1,4^{\circ}\text{C}$ до $0,7^{\circ}\text{C}$.

Як уже зазначалося, неоднорідність випромінювальної здатності поверхні зразка є однією з основних завод в тепловій дефектоскопії, в роботі її вплив знижується як за рахунок оптимізації процедури контролю, так і за рахунок фільтрації.

Суть методу спільної фільтрації полягає в компенсації неоднорідності випромінювальної здатності в зонах її наявності.

Для цього шляхом обробки виділялися зони неоднорідності випромінювальної здатності за рахунок аналізу видимого зображення. Потім застосовується спільна фільтрація, що включає в себе поєднання характерних зон на видимому і інфрачервоному зображеннях з подальшим урахуванням самої неоднорідності. Результат застосування фільтрації наведено на рис. 10.

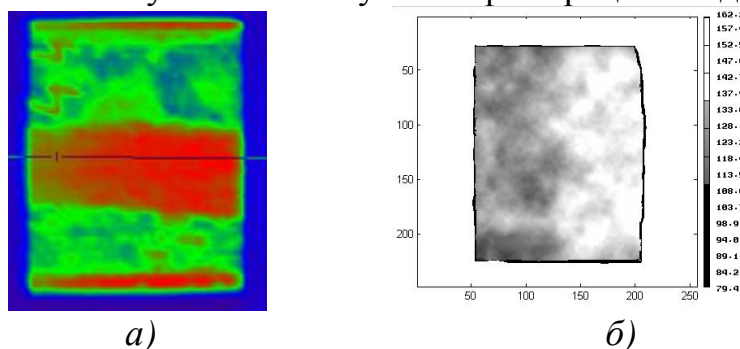


Рисунок 10 – Зображення фрагменту паропроводу: термограма – *а*; відновлене температурне поле зображення фрагменту паропроводу - *б*

Як видно з рис. 10, в результаті обробки вдалося знизити рівень завади, пов'язаної з неоднорідністю коефіцієнта випромінювальної здатності ϵ поверхні зразка - з 2°C до $0,6^{\circ}\text{C}$.

Для усунення другого виду завади, викликаного неоднорідністю клейового шару, запропоновано використовувати метод диференціальної фільтрації. Встановлено, що різновтовщинність клейового шару еквівалентна зміні термічного опору і призводить до появи температурних контрастів на поверхні ОК. Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що ці контрасти відрізняються від корисного сигналу (ΔT викликаного дефектом) часовою залежністю $\Delta T(\tau)$. Цей факт був використаний для побудови методу зменшення цієї завади шляхом комп'ютерної обробки термограм, заснованої на отриманні похідної $\partial T/\partial \tau$ як функції координати x для завади, та для дефекту що містить ОК (рис. 11).

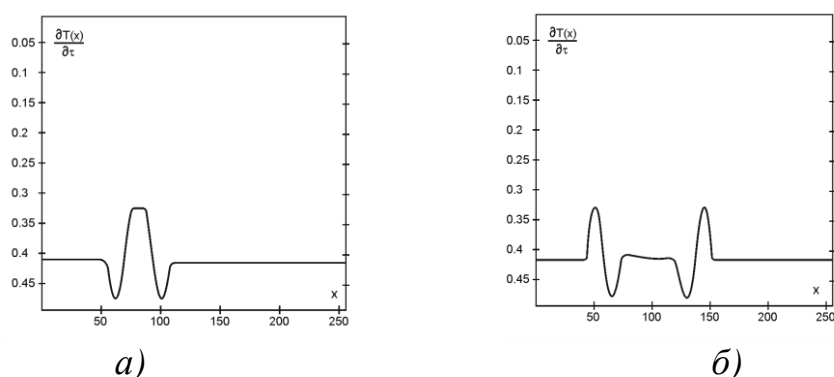


Рисунок 11 – Графік залежності частинної похідної від координати для завади – *a*; для корисного сигналу – *б*

Як видно з рис. 11 відносність цих функцій легко помітна, що і лягло в основу методу.

Суть методу полягає в обчисленні двовимірної матриці, елементами якої є відповідні частинні похідні за часом (б)

$$F_{i,j} = \frac{\partial F'_{i,j}(x, y)}{\partial t} \quad (6)$$

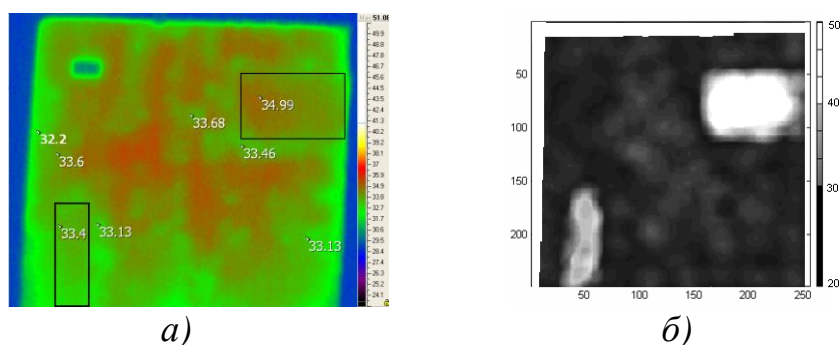


Рисунок 12 – Вид термограми до обробки - *a*; вид термограми після обробки - *б*

Розшифрувавши $F_{i,j}$, використовуючи залежності, наведені на рис. 9, рис. 10 і рис. 11 отримуємо кінцевий вигляд термограми після обробки (рис.12б).

Порівняння цієї термограми з вихідною (рис. 12, а) підтверджує той факт, що достовірність виявлення дефектів істотно зросла після обробки. При цьому, рівень завади обумовленої різнотовщинністю шарів багат шарових об'єктів знижений - з $1,2^{\circ}\text{C}$ до $0,4^{\circ}\text{C}$.

Це створює всі передумови для того, щоб у виробництві від візуального методу ідентифікації дефектів перейти до автоматизованого, заснованого на відповідних технічних засобах.

У додатках наведені акти впровадження та список публікацій здобувача за темою дисертації.

Висновки

У дисертації отримані нові науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, які в сукупності є рішенням науково-практичної задачі підвищення достовірності та чутливості теплової дефектоскопії за рахунок вибору режиму контролю по критерію максимізації відношення «корисний сигнал»/«завада», та спеціальної обробки отриманих результатів на прикладі контролю багат шарових конструкцій та трубопроводів.

1. Проаналізовано види дефектів, що властиві для розглянутих об'єктів контролю (стільникових конструкцій, газо- і паропроводів), розглянуті основні види шумів і завад, характерних для теплової дефектоскопії, а також існуючі методи зниження їх впливу. Доведено, що для підвищення чутливості і достовірності теплової дефектоскопії необхідно створення більш ефективних методів подавлення завад як на стадії проведення контролю, так і при подальшій обробці його результатів. Що дозволяє підвищити завадостійкість ТДС.

2. Розроблена теплофізична модель стільникових панелей, яка адекватно відображає неоднорідність їх структури і процес формування сигналу від дефекту, що дозволяє розрахувати очікувану чутливість теплової дефектоскопії і шляхом вибору режиму її проведення мінімізувати заваду, викликану неоднорідністю випромінювальної здатності ОК.

3. Створено універсальний алгоритм побудови теплофізичних моделей різних об'єктів теплової дефектоскопії, що мають характерну шарувату структуру з осьовою або кутовою симетрією, реалізований у вигляді комп'ютерного програмного комплексу ТермоPro_TFH_Statistic. Алгоритм випробуваний при формуванні теплофізичної моделі труби газопроводу з наявністю рідкої фази і труби паропроводу системи охолодження з дефектом типу стоншення стінки. Аналіз отриманих моделей дозволив оцінити очікувану величину сигналу від дефектів і підтвердити можливість реалізувати їх виявлення тепловим методом, та перевірити на експериментальних дослідженнях реальних зразків розглянутих виробів (стільникових панелях, газо- і паропроводах) з штучними і реальними дефектами, які підтвердили результати отримані шляхом аналізу теоретичних моделей.

5. Для підвищення завадостійкості теплового неруйнівного контролю, розроблені відповідні методи зменшення завад, а саме: для нерівномірності нагріву – вейвлет аналіз; для завади, викликані засвіченням сторонніми джерелами енергії – поворотна фільтрація; для завади, викликані

неоднорідністю випромінювальної здатності поверхні об'єкта контролю – спільна фільтрація; для завади, викликані неоднорідністю клейового шару стільникової конструкції – диференційна фільтрація.

6. В результаті застосування розроблених методів вдалося знизити рівень завад:

- пов'язаної з неоднорідністю нагрівання - з 1,4°C до 0,7 °C;
- викликані неоднорідністю коефіцієнта випромінювальної здатності поверхні зразка - з 2°C до 0,6 °C;
- обумовленої різнотовщинністю шарів багат шарових об'єктів - з 1,2°C до 0,4 °C.

Завдяки цьому підвищилась чутливість теплової дефектоскопії до виявлення дефектів типу «непроклей» в стільникових структурах - розмір порогового дефекту знижений з 6 мм до 3 мм, а достовірність їх виявлення зросла на 17 -20%.

7. Результати, отримані у дисертаційній роботі, впроваджені на підприємствах УкрНДІГаз (м. Харків), ДП «ЮжМаш» (м. Дніпро), на «АС» (м. Запоріжжя), а також прийняті до впровадження в УкрНДІГАЗ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІИ.

1. Мягкий А.В. Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования / В.А. Стороженко, С.Б. Малик, А.В. Мягкий // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2008. – №48. – С. 84-91.

Здобувачем розроблено засади для створення контрольно-програмного комплексу для моделювання процесів теплової дефектоскопії.

2. Мягкий А.В. Информационные признаки и решающие правила для обработки результатов термографического контроля / В.А. Стороженко, С.Б. Малик, А.В. Мягкий // Науково-технічний журнал «Методи та прилади контролю якості». – Івано-Франківськ, 2009. – №22. – С. 3-6.

Здобувачем розроблений другий розрахунковий модуль контрольно-програмного комплексу, який відповідає моделювання завад різного походження та з різною залежністю від базової температури.

3. Мягкий А.В. Повышение чувствительности тепловой дефектоскопии в условиях наличия излучательной помехи / С.Б. Малик, А.В. Мягкий, А.В. Стороженко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2009. – №14. – С. 49-52.

Здобувачем розроблений третій розрахунковий модуль контрольно-програмного комплексу, який надає можливість провести статистичний аналіз залежностей корисного сигналу та завад від різних параметрів як самого досліджуваного об'єкта так і його дефекту.

4. Мягкий А.В. Применение термографического метода контроля для определения содержания жидкой фазы в газопроводах. / В.А. Стороженко, С.Н. Мешков, С.А. Сапрыкин, А.В. Мягкий // Науково-технічний журнал «Методи та прилади контролю якості». – м. Івано-Франківськ, 2009. – №22. – С. 117–121.

Здобувачем розроблено метод фільтрації завад на поверхні трубопроводу який дозволяє застосувати метод теплового контролю для встановлення рідкої фази у трубопроводі.

5. Мягкий А.В. Теплофизическая модель процесса тепловой дефектоскопии сотовых конструкций, ее анализ и проверка / В.А. Стороженко, С.Б. Малик, А.В. Мягкий, Д.А. Беденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков 2011. – №5/5 (53) – С. 7–10.

Здобувачем розроблено теплофізичну модель процесу активного теплового контролю, яка враховує теплопередачу через дефект та обмеження нагріву об'єкта контролю, а також дозволяє моделювати характерні для цього методу завади.

6. Мягкий А.В. Оптимизация процедуры тепловой дефектоскопии сотовых конструкций. / В.А. Стороженко, С.Б. Малик, А.В. Мягкий, В.Г. Тихий // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. – Київ, 2013 – № 3. – С. 31-35.

Здобувачем розроблено теплофізичну модель процесу активного теплового контролю, яка враховує особливий конструкційний характер об'єкта контролю.

7. Мягкий А.В. Обработка результатов тепловой дефектоскопии сотовых конструкций с целью понижения уровня шумов. / Лазоренко О.В., Стороженко В.А., Мягкий А.В. // Вісник НТУ «ХП» – Харків, 2013 – № 34. – С. 108 – 122.

Здобувачем розроблено диференціальний фільтр який дозволяє фільтрувати заваду, викликану неоднорідністю клейового слою, та застосовано метод вейвлет аналізу для знешкодження складних завад.

8. Мягкий А.В. Тепловой контроль режимов работы радиоэлектронной техники. / Орел Р.П., Мягкий А.В. // Экономика, наука, производство: Сборник научных трудов. – Москва, Россия, 2013. – № 26. – С. 120-122.

Здобувачем розроблено метод встановлення оптимального режиму спостереження об'єкта контролю.

9. Myagkiy A.V. Optimization of the procedure of thermal flaw detection of the honeycomb constructions by improving the accuracy of interference function. / Volodymyr Storozhenko, Aleksandr Myagkiy, Roman Orel. Східноєвропейський журнал передових технологій. – Харків: НВП «Технологічний центр», 5/5 (83), 2016 – С. 12 – 18.

Здобувачем розроблено теплофізичну модель процесу активного теплового контролю, яка враховує особливості процесу теплової дефектоскопії об'єкта контролю. Також розроблена нова інтегральна функція завад, яка дозволяє більш достовірно відфільтровувати завади.

10. Обследование гидротехнических сооружений термографическим методом. / Стороженко В.А., Мешков С.Н., Орел Р.П., Мягкий А.В. // 5-ый международный семинар-выставка «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики» – Харьков, 2004. – С. 57 – 60.

В цій роботі здобувачем проведена статистична обробка отриманих матеріалів.

11. Мягкий А.В. Оценка возможности применения тепловизионного метода для обнаружения дефектов в напорных трубопроводах / С.Н. Мешков С.Н., А.В. Мягкий, С.Б. Малик // Международная научно-техническая конференция, науч. труды. конф. в 2х томах – Харьков: Метрология и измерительная техника, 2008. – Т.2. – С. 154-157.

Здобувачем розроблено теоретичний критерій чутливості методу для порівняння його з вимогами приладів та замовника.

12. Мягкий А.В./ Математична модель теплофізичних процесів при тепловім контролі. / А.В. Мягкий. // Материалы 6-й международной научно-технической конференции «Системный анализ та інформаційні технології». – Київ, 2009 р. – С. 159.

13. Мягкий А.В. Развитие теплового метода и термографии применительно к неразрушающему контролю объектов различных классов / В.А. Стороженко, С.Б. Малик, А.В. Мягкий // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Національна науково-технічна конференція, збірник доповідей. – Київ: УТ НКТД, 2009. – С. 230-234.

Здобувачем розроблено розбиття об'єктів контролю на класи по їх теплофізичним характеристикам, зокрема теплопровідності.

14. Мягкий А.В. Определение дефектов в гидросооружениях термографическим методом. / Мягкий А.В., Заморий П.Ю. // V Международная студенческая научно-практическая конференция «Традиции, тенденции и перспективы в научных исследованиях» – Чистополь, 2010. – С. 152 – 153.

В цій роботі здобувачем проведена обробка отриманих матеріалів, та проведені розрахунки величин характерних зон протікання.

15. Мягкий А.В. Применение экспресс - метода в контроле теплопотерь в жилых и промышленных зданиях. / Мягкий А.В., Заморий П.Ю. // V Международная студенческая научно-практическая конференция «Традиции, тенденции и перспективы в научных исследованиях» – Чистополь, 2010. – С. 150 – 151.

В цій роботі здобувачем проведенні розрахунки відносних тепловтрат.

16. Мягкий А.В. Снижение вероятности ложной тревоги при Тепловом неразрушающем контроле сотовых конструкций / Мягкий А.В. // Материалы 16 международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке». Том 2. международная конференция «Радиоэлектронное приборостроение как основа высокотехнологичного обновления всех отраслей производства» – Харьков, 2012. – С. 201-202.

17. Мягкий А.В. Компенсация помех вызванных неоднородностью нагрева при активном контроле сотовых конструкций/ Мягкий А.В., Горбань А.В. // Материалы 17 международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке». Том 2. международная конференция «Радиоэлектронное приборостроение как основа высокотехнологичного обновления всех отраслей производства» – Харьков, 2013. – С. 170-171.

В цій роботі здобувачем проведенні розрахунки величин характерних зон неоднорідністю випромінювальної здатності.

АНОТАЦІЇ

Мягкий О.В. Підвищення завадостійкості теплової дефектоскопії багат шарових конструкцій та трубопроводів. На правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - прилади і методи контролю та визначення складу речовини. - Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2019.

Дисертація присвячена підвищенню завадостійкості теплової дефектоскопії багат шарових стільникових конструкцій і трубопроводів шляхом зниження завад в тепловому неруйнівному контролі як за рахунок вибору режиму контролю за критерієм максимуму відношення сигнал / завада, так і за допомогою подальшої комп'ютерної обробки отриманих експериментальних даних.

Запропоновано теплофізичні моделі багат шарових стільникових конструкцій і трубопроводів. Розроблено програмний пакет «TermoPro_TFH_Statistic» і на його основі проведено чисельні експерименти по вибору режимів теплової дефектоскопії. Проведено ряд натурних і лабораторних експериментів з дослідження впливу завад на тепловий неруйнівний контроль. Розроблено ряд фільтрів, а також послідовність їх застосування для істотного зниження рівня завад при проведенні ТДС.

Завдяки цьому підвищилась чутливість теплової дефектоскопії до виявлення дефектів типу «непроклей» в стільникових структурах - розмір порогового дефекту знижений з 6 мм до 3 мм, а достовірність їх виявлення зросла на 17 -20%.

Ключові слова: Підвищення точності, підвищення чутливості, прилади неруйнівного контролю матеріалів і виробів, тепловий неруйнівний контроль, стільникові конструкції, напірні трубопроводи, усунення завад, вейвлет аналіз, диференціальна фільтрація, теплофізична модель.

Мягкий А.В. Повышение помехоустойчивости тепловой дефектоскопии многослойных конструкций и трубопроводов. На правах рукописи.

Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определение состава веществ. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена повышению помехоустойчивости тепловой дефектоскопии многослойных сотовых конструкций и трубопроводов путем снижения уровня помех и шумов в тепловом неразрушающем контроле как за счет выбора режима контроля по критерию максимума отношения сигнал / помеха, так и с помощью последующей компьютерной обработки полученных экспериментальных данных, в виде термограмм и изображений в видимом спектре, с использованием как разработанных автором так и уже существующих методов, адаптированных для решения поставленных задач.

Предложены теплофизические модели многослойных сотовых конструкций и трубопроводов. Разработан программный пакет «TermoPro_TFH_Statistic» позволяющий моделировать температурные поля и помехи в объектах со сложной внутренней структурой. На основе программного пакета проведены численные эксперименты по выбору режимов проведения тепловой дефектоскопии. Проведен ряд натуральных и лабораторных экспериментов по исследованию влияния уровня помех и шумов на точность методов теплового неразрушающего контроля. Разработан ряд методов фильтрации таких как:

- метод подавления помехи, вызванной неоднородностью температурного поля источника теплового возбуждения, основанный на использовании аппарата вейвлет анализа;

- метод подавления помехи, вызванной посторонними источниками теплового возбуждения, основанный на применении векторного и тензорного анализа к обработке изображений;

- метод подавления помехи, вызванной неоднородностью излучательной способности поверхности образца, основанный на совместной обработке видимого и инфракрасного изображений методами Робертса;

- метод подавления помехи, вызванной неоднородностью внутренней структуры образца, за счет методов дифференциальной фильтрации основанных на построении операторов смешанных частных производных от двумерных массивов.

А также разработана последовательность их применения для существенного снижения уровня помех при проведении ТДС, а также оценена достоверность применяемой методики.

Благодаря этому повысилась чувствительность тепловой дефектоскопии к обнаружению дефектов типа «непроклей» в сотовых структурах – размер порогового дефекта снижен 6мм до 3мм, а достоверность их выявления возросла на 17 -20%. Также была подтверждена принципиальная возможность выявления жидкой фазы в напорных газопроводах.

Ключевые слова: Повышение точности, повышение чувствительности, приборы неразрушающего контроля материалов и изделий, тепловой неразрушающий контроль, сотовые конструкции, напорные трубопроводы, устранения помех, вейвлет анализ, дифференциальная фильтрация, теплофизическая модель.

A.V. Miahkyi. Immunity increasing of thermal flaw detection in sandwich and pipelines. Manuscript.

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.11.13 – devices and methods of testing and materials composition determination. Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to the question of immunity to interference improvement in the thermal non-destructive testing of multilayered honeycomb constructions and pipelines, both by the monitoring mode selection with the criterion

of maximum signal-to-interference ratio, and by the further computer processing of obtained experimental data.

Thermophysical models of multilayered honeycomb constructions are proposed. The software package "TermoPro_TFH_Statistic" was worked out and number of experiments at the thermal flaw detection modes selection were performed on its basis. A number of full-size and laboratory-scale experiments were conducted to investigate the interference effect on thermal non-destructive testing. A number of filters have been worked out, as well as the sequence of their use to significantly reduce the interference level during the thermal flaw detection.

Due to this, the sensitivity of thermal defectoscopy to detection of defects of the "non-adhesive" type in honeycomb structures increased - the size of the threshold defect was decreased from 6mm to 3mm, and the reliability of their detection increased by 17-20%.

Keywords: Improvement of accuracy, increase of sensitivity, devices of non-destructive control of materials and products, thermal non-destructive control, cellular structures, pressure pipelines, elimination of obstacles, wavelet analysis, differential filtration, thermophysical model.



Підписано до друку 11 березня 2019 .Формат 60x90/16.
Обсяг 0,9 ум. – друк. арк. Папір офсетний. Друк різнограф.
Наклад 150 прим. Зам №_____

Надруковано у центрі оперативної поліграфії ФОП Грищенко Н.О.

Свідоцтво про держ. Реєстрацію №2970315485.

61003, м. Харків, пр. Науки, 7

Тел +38050 10 66 500