

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ЗАВАД ПРИ ТЕПЛОВОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І МОРФОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ

В.О. Стороженко, О.В. Мягкий, Р.П. Орел, С.М. Мешков

НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки. 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.
E-mail: volodymyr.storozhenko@nure.ua

Описано характерні для теплового неруйнівного контролю завади, що знижують достовірність отриманих результатів. Запропоновано методику їх зменшення, що складається з двох взаємозалежних етапів. Перший етап полягає у розрахунку і аналізу характеру та рівня очікуваного сигналу за розробленою теплофізичною моделлю на тлі експериментально отриманого рівня завад. За результатами аналізу розрахунків за теплофізичною моделлю для обраних зразків найвпливовішою завадою виявилася неоднорідність випромінювальної здатності поверхні зразка. Зменшенню цієї завади присвячений другий етап обробки отриманих даних, який полягає в обробці термограм температурних полів і включає морфологічний аналіз стану поверхні, фільтрації та зменшення характерних завад та шумів. Він розділений на чотири практичні процедури: аналіз візуального зображення та отримання карти зон з різною випромінювальною здатністю поверхні зразка, аналіз термограми з оцінкою рівня дискретності термограми та положенням реперних точок на зображенні, згладжування термографічного зображення та виділення на термограмі зон з різною випромінювальною здатністю поверхні об'єкта контролю, після чого відбувається фільтрація завади. Так як на результати теплового контролю сильно впливає форма об'єкта, можливості та ефективність запропонованої методики проілюстрована на об'єкті циліндричної форми. Експериментально підтверджено, що для вибраного зразка рівень завад вдалося знизити до рівня певненого виділення корисного сигналу на фоні завади. Бібліогр. 10, рис. 5.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, рівень корисного сигналу, структурні завади, теплофізична модель, обробка зображень, морфологічний аналіз

Вступ. Активний розвиток трубопровідного транспорту в світі розпочався наприкінці 1960-х р., а зараз протяжність магістральних трубопроводів складає сотні тисяч кілометрів, у тому числі: газопроводів, нафтопроводів, водопроводів, систем опалення та охолодження. Ця гігантська інфраструктура знаходиться під навантаженням десятки років, за рахунок чого схильна до корозії та зносу. Моніторинг стану таких систем контактними методами є складною та дорогою процедурою. Тому ефективнішими для вказаних об'єктів є безконтактні методи, які в більшості випадків не мають альтернативи. Одним з перспективних методів безконтактного неруйнівного контролю є тепловий метод (для об'єктів, які мають своє теплове поле). У даний час існує велика кількість алгоритмів підвищення якості зображень, проте вони неефективні для обробки термограм при неруйнівному тепловому контролі. Це пов'язано з особливостями інфрачервоного випромінювання та специфікою його реєстрації. Тому реалізувати потенційні можливості цього методу на практиці не завжди вдається внаслідок наявності значних завад. Усунути зазначений недолік можна як на етапі проведення вимірювань, так і при обробці

отриманих результатів за рахунок урахування теплофізичних характеристик та структурних особливостей об'єктів контролю [1, 2].

Завади у тепловому неруйнівному контролі. При реалізації теплового контролю (ТК) джерелом шумів і завад є сам об'єкт контролю (ОК), реєструюча апаратура та вплив навколишнього середовища. Шуми можуть додаватись до корисного температурного сигналу T (адитивний шум \tilde{A}) або перемножуватись з ним (мультиплікативний шум \tilde{A}) [1]:

$$u(x, y, \tau) = \tilde{M}T(x, y, \tau) + \tilde{A}. \quad (1)$$

З (1) видно, що зареєстрований сигнал $u \equiv T$ тільки тоді, коли $\tilde{M} \equiv 1$ та $\tilde{A} \equiv 0$. Найкращою процедурою випробувань є така, у якій чутливість методу обмежена детектором випромінювання, тобто $\tilde{M} \equiv 1$ та $\tilde{A} \rightarrow \min$. Також цьому закону підпорядковуються завади та шуми, але різниця між ними полягає у характері їх залежності: шум є сигналом, який має випадковий характер, а завада є сигналом, величина якого підпорядкована причині його виникнення [3].

При активному ТК основним джерелом зовнішньої завади є нагрівач. При пасивному ТК зовнішні джерела теплового випромінювання можуть

Стороженко В.О. – <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>, Мягкий О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0442-5570>,

Орел Р.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>, Мешков С.М. – <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>

© В.О. Стороженко, О.В. Мягкий, Р.П. Орел, С.М. Мешков, 2022

створювати помилкові сигнали, які оператор може трактувати як ознаки дефекту. Цей факт ускладнюється тим, що випромінювання, яке відбивається від об'єкту контролю, залежить від стану його поверхні та кута реєстрації.

Для зниження завад і підвищення ефективності теплового контролю було використано метод, який базується на аналізі виявлення дефектів (процедурі ТК) і вдосконалені методики обробки отриманих зображень температурних полів ОК. Крім стану поверхні важливу роль у тепловому контролі має також форма ОК.

Поставлена мета досягається використанням теоретично-експериментального підходу, який поєднує побудову і аналіз теплофізичної моделі та методику комп'ютерної обробки результатів контролю об'єкта складної форми. У якості експериментального зразка було використано фрагмент напірного трубопроводу, який надано спеціалістами Південноукраїнської АЕС.

Вибір теплофізичної моделі. Запропонована методика складається з двох взаємозалежних етапів. Перший етап полягає у розрахунку і аналізі характеру та рівня очікуваного сигналу за розробленою теплофізичною моделлю на тлі експериментально отриманого рівня завад. За результатами аналізу розрахунків за теплофізичною моделлю для обраних зразків обирається методика подальшої комп'ютерної обробки отриманих даних [4, 5]. Другий етап полягає в обробці термограм температурних полів і включає морфологічний аналіз стану поверхні, фільтрацію та зменшення характерних завад і шумів. Основною умовою адекватного опису процесу контролю є вибір як фізичної, так і математичної моделі, які найповніше відображають особливості теплопередачі в дефекті та виробі, а також дозволяють аналізувати модель контрольованого об'єкта, особливості процесу та розраховувати з необхідною точністю кількісні параметри.

У якості моделі ОК обрана теплофізична модель циліндричної форми з локальним дефектом типу витончення стінки, яка наведена на рис. 1. Об'єкт контролю представляється у вигляді цилін-

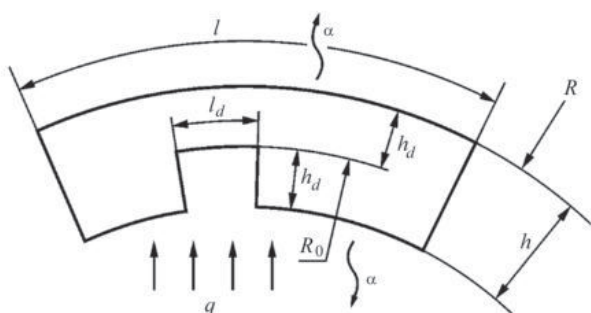


Рис. 1. Об'єкт контролю з дефектом типу витончення стінки трубопроводу

дра з неоднорідністю (дефектом). Дефект у вигляді витончення стінки модельований пазом всередині ОК глибиною h_d і розміром l_d .

Обраній моделі відповідає наступне рівняння:

$$\text{div}(\lambda(T)\nabla T(\vec{r},t)) + Q(\vec{r},t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial t}, \quad (2)$$

де $T(\vec{r},t)$ – температура об'єкта контролю, що залежить від координат точки M і часу t ; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К) (у загальному випадку може залежати від температури T); $Q(\vec{r},t)$ – функція внутрішніх джерел тепла, Вт/м²; c – питома теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина речовини, кг/м³. Якщо R_1 – внутрішній радіус ОК; R – зовнішній радіус ОК, то $\lambda(T)$ для $r < R_1$ дорівнює $\lambda_1(T)$, для $R_1 < r < R - \lambda_2(T)$, для $r > R - \lambda_3(T)$.

Для реального процесу теплового контролю (теплової дефектоскопії) рівняння (2) можна спростити з урахуванням наступних факторів: внутрішні джерела відсутні, а коефіцієнт теплопровідності не залежить від температури, тому що прогрів ОК не перевищує 100 °С. З урахуванням цього отримуємо [3]:

$$\left(\lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(\lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left(\lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial \lambda(\vec{r})}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial t}. \quad (3)$$

Рівняння (3) є однорідним лінійним диференціальним рівнянням другого порядку параболічного типу, тому що $\lambda \geq 0$. Саме це рівняння адекватним чином описує обрану теплофізичну модель (рис. 1) за умови його розв'язання при вірно обраних граничних умовах, що відповідають реальній процедурі теплового контролю, тобто при граничних умовах 2-го і 3-го роду на зовнішніх поверхнях ОК [6]:

$$\left. \begin{aligned} r = R_0 \\ \lambda(\vec{r},T) \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial n} \Big|_s = \alpha \left(T(\vec{r},t) \Big|_s - T_{\text{середовища}} \right) - q(\vec{r},t), \end{aligned} \right) (4)$$

$$\left. \begin{aligned} r = R \\ -\lambda(\vec{r},T) \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial n} \Big|_s = -\alpha \left(T(\vec{r},t) \Big|_s - T_{\text{середовища}} \right), \end{aligned} \right) (5)$$

де $q(\vec{r},t)$ – густина потоку тепла, Вт/м²; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); R_0 – радіус поверхні, на якій знаходиться дефект, м; h – товщина ОК, м.

Співвідношення (4) і (5) відображають реальні умови проведення активного ТК, тобто нагрів ОК зовнішнім джерелом тепла та наявність теплообміну з навколишнім середовищем. Математична модель процесу ґрунтується на розв'язанні диференціального рівняння нестационарної теплопро-

відності (2), записаного для циліндричної системи координат [7, 8].

Термограму експериментального зразка із завадою, викликаною неоднорідністю випромінювальної здатності поверхні зразка, наведено на рис. 2. На основі аналізу результатів розрахунків, проведених за теплофізичною моделлю, та даних, отриманих з термограм візуальних зображень об'єкта контролю, було отримано наступні результати:

- рівень очікуваного сигналу складає $\sim 2...3$ °С;
- у рівень завади найбільший вклад робить мультиплікативна завада, що викликана неоднорідністю випромінювальної здатності зразка;
- рівень домінуючої завади складає близько $\sim 4,3$ °С.

Рівень корисного сигналу та завади близькі за порядком величини (згідно з рис. 2), тому термограма потребує подальшої комп'ютерної обробки з метою зменшення домінуючої завади.

Обробка результатів теплового контролю.

Реальні рівні завад та шумів на експериментальних зразках, для яких було розроблено теплофізичні моделі, наведено на рис. 3. Як видно, рівень сигналу завади не дозволяє впевнено виділити дефекти. Також зрозуміло, що ці завади неможливо видалити методами графічної обробки зображень, але можна застосувати додаткову інформацію, яку отримано раніше при моделюванні.

Аналіз термограми (рис. 2) показав, що найбільший вклад у рівень завад вносить та, яка викликана неоднорідністю випромінювальної здатності та пов'язана зі станом поверхні та зміною кута реєстрації випромінювання, що є характерним для циліндричних об'єктів з малим радіусом.

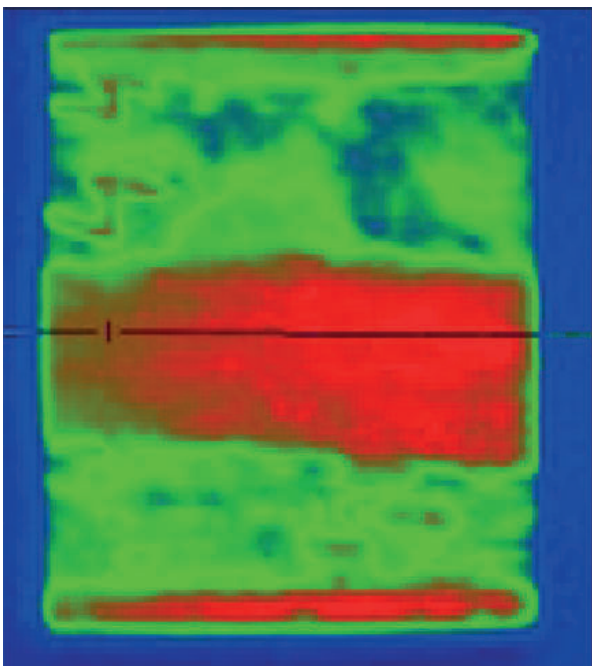


Рис. 2. Термограма фрагменту трубопроводу з дефектом та можливими завадами

Суть запропонованого методу обробки термограми ОК зі складною геометрією полягає в компенсації завад в зонах їх наявності. Запропонований метод дозволяє виділяти такі зони шляхом використання отриманої апріорної інформації з видимого зображення у вигляді карти зон з різною випромінювальною здатністю та зіставлення її з термограмою.

Для автоматизації процесу зіставлення карти зон з різною випромінювальною здатністю та термограми було запропоновано алгоритм, який складається з наступних процедур:

1. Аналіз візуального зображення (отримання карти зон з різною випромінювальною здатністю поверхні зразка).
2. Аналіз термограми (оцінка рівня дискретності термограми та положення реперних точок).
3. Попередня обробка зображень (згладжування термографічного зображення, тому що, як правило, воно більш дискретне за видиме).
4. Виділення на термограмі зон з різною випромінювальною здатністю поверхні ОК (проходить при накладанні карти зон на термограму шляхом суміщення реперних точок).

У питаннях обробки зображень і розпізнавання зон інтересу використовується обмежений набір методів попередньої обробки зображень [9]. Це пов'язано з тим, що сучасні системи реєстрації ОК розраховані на контроль оператора, що дозволяє утримувати характеристики отримуваних зображень у вузькому діапазоні, який відповідає оптимальному режиму контролю [4].

Далі для виділення на термограмі зони інтересу проводиться нормалізація видимого зображення за допомогою двох реперних точок, виділених на термограмі та на видимому зображенні. Нормалізація необхідна для отримання точнішого контуру зони інтересу на термограмі. Після етапу підготовки зображень виділяються реперні точки на видимому зображенні всередині контуру об'єкта. Цей етап проводиться і на термограмі. Після чого відбувається перенос контуру з видимого зображення на термограму. Для цього треба виконати наступні кроки:

1. Підготовка видимого зображення, яка включає фільтрацію, виділення контурів, нормалізацію (масштабування та поворот) і сегментацію (виділення об'єкта за реперними точками). Описані етапи при правильному підборі методів дозволяють отримати контур на видимому зображенні для подальшого накладання на термограму.

2. Проведення аналізу термограми, який включає нормалізацію та виділення реперних точок і зони інтересів на термограмі та видимому зображенні. Виділення зони інтересів складається з двох етапів: перенесення на термограму контурів виділеного об'єкта, отриманого на видимо-

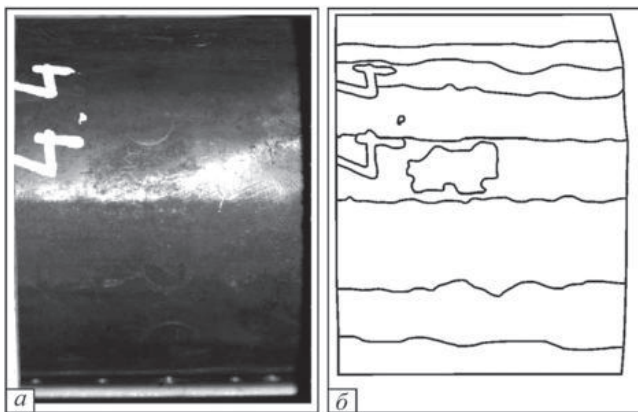


Рис. 3. Видиме зображення фрагменту труби (а) і результат обробки зображення оператором Робертса після фільтрації (б) му зображенні, та виявлення зон із середньою за зразками випромінювальною здатністю на досліджуваній поверхні [10].

За допомогою отриманого контуру зони можна її проаналізувати за температурним показником [1, 4].

Існує багато методів фільтрації видимого зображення: згортка, комбінована фільтрація з диференційованим згладжуванням областей з різною інформаційною цінністю, медіанний метод, лінійна та нелінійна фільтрація, метод SUSAN [4], з яких у проведених експериментальних дослідженнях було використано методи медіанної фільтрації та SUSAN.

Завдяки такій процедурі було подавлено текстурні завади, що спростило подальшу обробку. Візуальний аналіз не виявив значних змін, але необхідність такої фільтрації є дуже важливим етапом для подальшої обробки.

Наступним кроком при підготовці видимого зображення є виділення контурів. Для цього на видимому зображенні були обрані метод активних контурів, оператор Робертса, оператор Лапласа та різницевий метод. У розробленому програмному продукті представлені метод Робертса та різницевий метод. Перед обробкою зображення даними методами необхідно провести попередню фільтрацію методом SUSAN, тому що для коректної роботи оператора Робертса необхідна безперервна функція інтенсивності, а базове зображення має

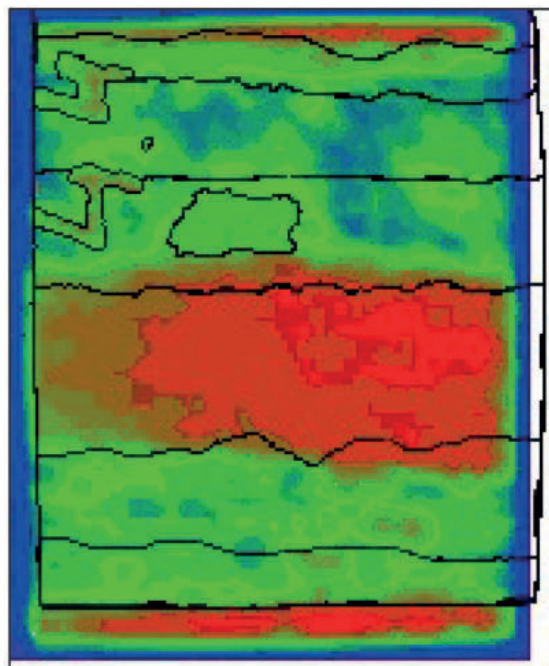


Рис. 4. Накладання відфільтрованого видимого зображення на термографічне

дискретну функцію [4]. Результат використання оператора Робертса показано на рис. 3.

Над двовимірною функцією, що отримана у результаті обробки, було проведено згладжуючу фільтрацію для зменшення дискретизації зон і отримання безперервного контуру зони, причому незалежно від того, яким методом здійснювалось виділення контуру. На цьому етапі алгоритму реалізовано функцію накладання. Вона дозволяє поєднувати відфільтроване зображення з термограмою об'єкта. Результат роботи цієї функції представлено на рис. 4.

Для кожної зони було задано поправочний коефіцієнт [1], який компенсував неоднорідність випромінювальної здатності та кут реєстрації в даній зоні. Таким чином було відфільтровано вказані раніше завади та відновлено початкове температурне поле (рис. 5).

Отримані результати показують, що температурне поле (рис. 5, б) збільшується зліва направо, що відповідає зменшенню товщини стінки зразка

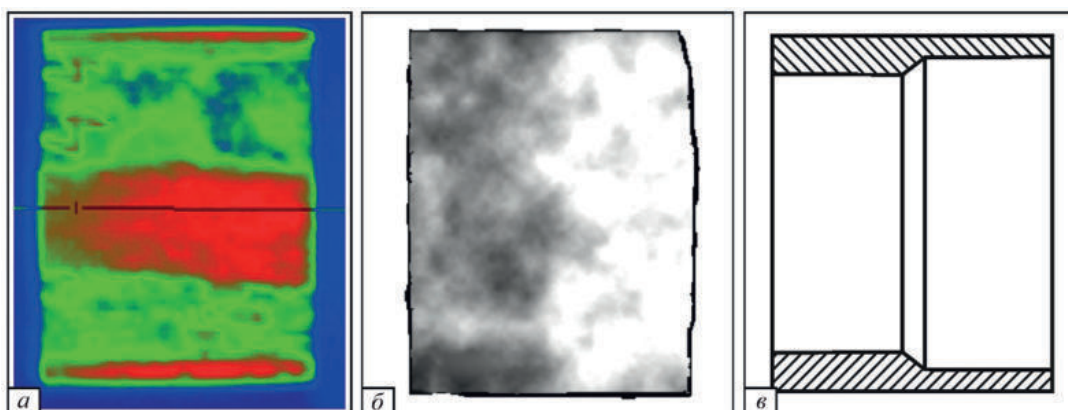


Рис. 5. Результати експерименту: термограма фрагмента паропроводу (а), відновлене температурне поле ОК (б), переріз зразка (в)

(рис. 5, в). Як видно з наведених термограм, рівень структурної завади, що викликана неоднорідністю випромінювальної здатності поверхні та кутом реєстрації зразка, знизився з 4,3 до 0,7 °С, тобто на 3,6 °С. Рівень не домінуючих завад та шумів складає 1,1 °С, що не заважає виділенню корисного сигналу на їх фоні. Таким чином, запропонована методика дозволила виявити внутрішню структуру зразка – області з різною товщиною стінки та межу між ними.

Висновки

Запропоновано метод обробки результатів теплового контролю, який дозволяє врахувати особливості інфрачервоного випромінювання та специфіку його реєстрації. Метод дозволяє знизити рівень структурних завад, який базується на аналізі теплофізичної моделі та морфологічних особливостей видимого і температурного зображень.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали ефективність нового підходу до аналізу теплових зображень при тепловому неруйнівному контролі.

Розроблено теплофізичну модель об'єкта контролю циліндричної форми, яка враховує особливості теплопередачі у дефекті та на основі якої можна розрахувати та проаналізувати характер і рівень очікуваного сигналу на фоні експериментально отриманого рівня завад.

Використання системи поправочних коефіцієнтів для різних зон на поверхні об'єкта контролю дозволяє наблизитись до розв'язання складної для теплового методу задачі – контролю об'єктів складної форми та об'єктів, які мають регулярні структурні неоднорідності.

Описаний алгоритм дозволяє проводити обробку зображення та компенсувати заваду, коли її не можна мінімізувати шляхом оптимізації режиму активного контролю [8].

Проведений експеримент підтвердив обґрунтованість та правильність теоретичних положень і дозволив визначити внутрішню структуру досліджуваного об'єкта (різну товщину стінки) та знизити рівень структурних завад на 3,6 °С (з 4,3 до 0,7 °С).

Дослідження показують, що обробка експериментальних даних, яка проведена з урахуванням особливостей теплофізичних та структурних характеристик об'єктів контролю, дає значний позитивний результат і є важливим кроком до автоматизації процедур теплового неруйнівного контролю на шляху впровадження у поточне виробництво.

Список літератури

1. Вавилов В.П. (2009) *Инфракрасная термография и тепловой контроль*. Москва, Спектр.
2. Стороженко В.А., Маслова В.А. (2004) *Термография в диагностике и неразрушающем контроле*. Харьков, Смит.

3. Xavier, P.V. Maldague (2001) *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Inc.
4. Pragnan Chakravorty (2018) What is a Signal? [Lecture Notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35, 5, 175–177. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2832195>
5. Стороженко В.А., Малик С.Б., Мягкий А.В. (2008) Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования. *Вісник НТУ «ХПИ», Серія «Електроенергетика та перетворювальна техніка»*, 48, 84–91.
6. Стороженко В.А., Малик С.Б., Мягкий А.В., Тихий В.Г. (2013) Оптимизация процедуры тепловой дефектоскопии сотовых конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 31–35.
7. Мягкий А.В., Лазоренко О.В., Стороженко В.А. (2013) Обработка результатов тепловой дефектоскопии сотовых конструкций с целью понижения уровня помех. *Вісник НТУ «ХПИ», Серія «Електроенергетика та перетворювальна техніка»*, 34, 108–122.
8. Storozhenko, V., Myagkiy, A., Orel, R. (2016) Optimization of the Procedure of Thermal Flaw Detection of the Honeycomb Constructions By Improving The Accuracy Of Interference Function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79563>
9. Basim Alhadidi, Mohammad H. Zu'bi, Hussam N. Suleiman. (2007) Mammogram Breast Cancer Image Detection Using Image Processing Functions. *Information Technology Journal*, 6, 2, 217–221. DOI: <https://doi.org/10.3923/itj.2007.217.221>
10. Solomon, C.J., Breckon, T.P. (2010) *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. Wiley-Blackwell.

References

1. Vavilov, V.P. (2009) *Infrared thermography and thermal control*. Moscow, Spektr [in Russian].
2. Storozhenko, V.A., Maslova, V.A. (2004) *Thermography in diagnostics and nondestructive testing*. Kharkov, Smit [in Russian].
3. Xavier, P.V. Maldague (2001) *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Inc.
4. Pragnan Chakravorty (2018) What is a Signal? *IEEE Signal Processing Magazine*. Vol. 35, Issue 5, 175–177. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2832195>
5. Storozhenko, V.A., Malik, S.B., Myagky, A.V. (2008) Optimization of modes of thermal flaw detection based on thermophysical modeling. *Вісник НТУ ХПІ, серія «Електроенергетика та Перетворювальна Техніка»*, 48, 84–91 [in Russian].
6. Storozhenko, V.A., Myagky, A.V., Malik, S.B., Tikhy, V.G. (2013) Optimization of the procedure of thermal flaw detection of honeycomb structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 31–35 [in Russian].
7. Myagky, A.V., Lazorenko, O.V., Storozhenko, V.A. (2013) Processing the results of thermal flaw detection of honeycomb structures to reduce the level of interferences. *Вісник НТУ ХПІ, серія «Електроенергетика та Перетворювальна Техніка»*, 34, 108–122 [in Russian].
8. Storozhenko, V., Myagkiy, A., Orel, R. (2016) Optimization of the procedure of thermal flaw detection of the honeycomb constructions by improving the accuracy of interference function. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 5, 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79563>
9. Basim Alhadidi, Mohammad H. Zu'bi, Hussam N. Suleiman (2007) Mammogram breast cancer image detection using image processing functions. *Information Technology J.*, Vol. 6, Issue 2, 217–221. DOI: <https://doi.org/10.3923/itj.2007.217.221>
10. Solomon, C.J., Breckon, T.P. (2010) *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. Wiley-Blackwell.