УДК 697.85

DOI 10.31471/1993-9981-2023-2(51)-5-15

**ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРАВИЛА ПОРОГОВОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ У ТЕПЛОВОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ**

***О. Zivenko***

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding;*

*208, Central Ave. 3, Mykolaiv, 3650, Ukraine; e-mail:* [*oleksii.zivenko@nuos.edu.ua*](mailto:oleksii.zivenko@nuos.edu.ua)

В

.

**Ключові слова**: невизначеність вимірювань, радар, радарний датчик рівня направленої дії, діелектрична проникність, фактор впливу.

T.

**Keywords:** thermal imaging thermography, informative parameters, discontinuity, threshold identification of defects, smoke pipe.

**Introduction**

Accurate level measurement of liquids and solids is essential for standard industrial processes [1]: controlling storage tanks, ensuring precise filling in production lines, preventing overflows or dry running, and complying with stringent safety and environmental regulations. The reliability and precision of level sensors directly impact operational efficiency and product/process quality in industries such as oil and gas, food and beverage, chemical and energy, and manufacturing.

The quality of level sensing can be characterized by accuracy, repeatability, resolution, response time, and the influence of different environmental factors on the measurements. Measurement uncertainty or maximum permissible error (MPE) are critical concepts considered for several applications, such as warehouse monitoring, technological overfill protection, or any safety-related applications. Uncertainty represents the degree of confidence in a measurement result, often defined by statistical analysis, while MPE refers to the largest allowable deviation from the true value during operation. Understanding and minimizing uncertainties makes processes reliable and allows using results of such measurements for specific purposes, e.g., custody transfer applications. This article focuses on guided wave radar (GWR) sensors, which leverage electromagnetic energy for precise level measurement. GWR sensors can operate effectively in a variety of liquids and under extreme environmental conditions. While radar-based sensors are notable for their non-contact operation, which minimizes contamination risks, GWR sensors stand out for applications demanding high precision, such as monitoring liquids with low permittivity or in pressurized vessels. Another advantage of GWR sensors is their ability to work as a polymetric system, enabling simultaneous measurement of multiple parameters, such as level, temperature, and pressure, using a single device. However, achieving and sustaining such accuracy necessitates a meticulous calibration process and corresponding techniques. This process ensures traceability, enhances accuracy and provides consistent performance.

A calibration procedure aligns a sensor’s output to a known standard or reference. This involves adjusting measurements for level sensors to reflect true product levels under controlled conditions.

Calibration can establish/correct the measurement scale during manufacturing and test the accuracy and performance throughout the sensor's lifecycle. By using appropriate reference standards, calibration enables tuning of sensors during production and provides a means to verify the sensor's performance under standard or specific required conditions if a predefined calibration table is available.

This article addresses the calibration of GWR sensors, examining the impact of dielectric permittivity variations under reference and non-reference environmental conditions. It then makes recommendations to enhance measurement reliability for manufacturers and regulators.

LSn

LS2

RM

V1

**LSCC**

…

**PVCS**

V2

L2

L1

LS1

Ln

L0

RP

ARI

**Figure 1 – Structural Diagram of a Calibration Stand for Evaluation and Tuning of Level Sensors**

**The main objective** of this study is to analyze the influence of the environmental factors under reference and non-reference environmental conditions and to

1. evaluate the uncertainty in level estimation across extended environmental conditions for particular level sensor and calibration procedures;
2. propose recommendations for sensor manufacturers and independent evaluators on how to reduce measurement uncertainty.

**Literature review and analysis.** It’s essential to consider a measurement model and appropriate calibration scheme used to highlight possible sources of uncertainties.A typical GWR level sensor uses a widely known time domain reflectometry principle [3-9], the simplified measurement model is described by Eq. (1):

. (1)

where *L* – distance from generator/receiver of electromagnetic pulses; *c* – speed of light in vacuum; ε – dielectric constant of the vapor phase of a product through which the electromagnetic pulse propagates; *t* – time delay between moments of sounding and receiving the reflected pulse; the coefficient of ½ stands for the fact that the electromagnetic pulse propagates along double the length of the probe (forward and backward).

In this case, the main feature used to estimate distance *L* is the time delay *t* if the vapor's dielectric constant is considered a constant.

However, sources [10-13] show significant variability in dielectric constant or correlated parameters under changing environmental conditions.

Some sensors utilize correction techniques to consider changes in the dielectric constant of the media, especially for pressurized vessels gauging). The typical calibration process of a GWR level sensor is performed under the reference conditions []. Several calibration schemes and devices are proposed {make citation to the }.

However, sources [1-3] show significant variability in εair\varepsilon\_{\text{air}}εair​ under changing environmental conditions.

* Limited focus has been given to how these variations propagate into measurement uncertainty, affecting metrological verification standards.

**Висвітлення основного матеріалу статті**

Аналіз основних характеристик активної і пасивної тепловізійних термографій засвідчує, що вони відрізняються між собою способами формування теплового поля на поверхні об‘єкта контролю та кількістю інформативних параметрів.

Основними спільними інформативними параметрами активної і пасивної термографії є гістограми розподілення амплітудного температурного профілю аномалії над несуцільністю виробу та об‘єкта контролю і морфологія температурної зони аномалії над несуцільністю на їх зовнішній поверхні. В активній термографії фіксація гістограми розподілення амплітудного температурного профілю аномалії відбувається в динаміці і за короткий проміжок часу по мірі зміни значень температурного поля, а у пасивному тепловому контролі – в статиці при стаціонарному або квазістаціонарному температурному полі.

Тому в процесі проведення теплового контролю виробів та об’єктів контролю методом тепловізійної активної термографії в порівнянні з пасивною тепловізійною термографією використовуються два додаткові інформативні параметри – момент часу  оптимального спостереження за температурним перепадом на зовнішній поверхні виробу або об’єкту контролю при тепловізійному термографуванні поверхні та частота  запису гістограм для накопичення їх необхідної кількості перед досягненням оптимального часу спостереження . Частота може бути обрана із умови виду:

.

Відповідно й морфологія температурної зони (її розміри) аномалій над несуцільністю на зовнішній поверхні виробу чи об’єкта контролю в активній термографії буде ґрунтуватись на однозначному зв’язку між межами несуцільності та швидкістю поверхневого температурного перепаду, а в пасивній термографії - на однозначному зв’язку лише з межею (розміром) несуцільності.

Для визначення несуцільностей в якості дефектів за їх температурними аномаліями необхідно, щоб:

• теплофізичні характеристики матеріалів у місцях виникнення несуцільностей відрізнялись від теплофізичних характеристик основного матеріалу виробу або ОК;

• несуцільності виробу або ОК створювали максимальне збудження для тих теплових полів, за допомогою яких виникають температурні аномалії на їх зовнішніх поверхнях.

Відомо, що гістограми розподілення амплітудних температурних профілів аномалій та морфологій їх температурних зон над несуцільностями на зовнішній поверхні виробів та ОК при активному та пасивному термографічному контролі є функціями великої кількості різноманітних факторів, які можна розділити на внутрішні і зовнішні. Внутрішні фактори визначаються теплофізичними власти-востями виробу або ОК та геометричними параметрами несуцільностей.

Зовнішніми факторами є характеристики процесу теплообміну на зовнішній поверхні виробу чи об’єкта контролю, потужність джерела нагрівання та швидкість переміщення потоку тепла вздовж об‘єкта контролю. При нестаціонарному темпе-ратурному полі в активній термографії наведені внутрішні фактори визначають часові параметри процесу теплопередачі та особливості часового розвитку температурної аномалії на зовнішній поверхні виробу чи ОК. При активній термографії величина  залежить від тепло- та температуропровідності виробу або об’єкта контролю та глибини залягання несуцільності. У цьому випадку активна термографія ефективна при виявленні газонаповнених несуцільностей великої площі в середині ОК, основна площина якого розміщена перпендикулярно тепловому потоку.

Таблиця 1 – Основні порівняльні характеристики методів тепловізійної термографії в тепловому неруйнівному контролі

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Характеристики методів тепловізійної термографії | Активна термографія | Пасивна термографія |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Сфера застосування методів тепловізійної термографії | Теплова дефектоскопія несуцільностей в об‘єкті контролю | Теплове діагностування технічного стану об‘єкта контролю |
| 2 | Метод теплового неруйнівного контролю | Активний | Пасивний |
| 3 | Спосіб формування теплового поля об‘єкта контролю | Об‘єкт зазнає впливу стороннього джерела тепла (нестаціонарний режим) | Об‘єкт не зазнає впливу стороннього джерела тепла (стаціонарний режим) |
| 4 | Характер взаємодії теплового поля з об‘єктом контролю | Конвекційний або/та радіаційний | Конвекційний |
| 5 | Інформативна ознака несуцільностей в структурі об‘єкта контролю | Аномалії температурного поля на зовнішній поверхні об‘єкта контролю | Аномалії температурного поля на зовнішній поверхні об‘єкта контролю |
| 6 | Інформативні параметри тепловізійної термографії | 1. Декілька гістограм динамічного розподілу амплітудного температурного профілю аномалії над несуцільністю на зовнішній поверхні виробу чи об‘єкта контролю в процесі термографування | 1. Одинична гістограма статичного розподілу амплітудного температурного профілю аномалії над несуцільністю на зовнішній поверхні виробу чи об‘єкта контролю в момент термографування |
| 2. Морфологія температурних зон аномалій на зовнішній поверхні об‘єкта контролю (розміри ґрунтуються на однозначному зв‘язку між межами несуцільностей та швидкістю поверхневого температурного перепаду) | 2. Морфологія темпера-турної зони аномалії на зовнішній поверхні об‘єкта контролю (розміри ґрунту-ються на однозначному зв‘язку тільки з межею несуцільності ) |
| 3. Момент часу  оптимального спостереження температурного перепаду при термографуванні поверхні об‘єкту | - « - |
| 4. Частота  запису гістограм для накопичення їх необхідної кількості перед досягненням оптимального часу спостережень | - « - |

Момент настання максимального перепаду та глибина залягання несуцільності зазвичай пов’язані лінійною залежністю, при цьому кут нахилу відповідної прямої залежить від теплофізичних властивостей виробу та несуцільності. Чим більша теплопровідність виробу, тим менша величина *.* В залежності від типу матеріалу та глибини залягання несуцільності величина в активній термографії коливається від сотих до десятків секунд.

Саме за такий час здійснюється теплова дефектоскопія активним тепловим методом матеріалів виробів та об’єктів, результатом якого будуть гістограми динамічного розподілу профілю аномалій нестаціо-нарного температурного поля на зовнішній поверхні виробу чи ОК в момент термографування, що відповідають наявності в них виявлених несуцільностей.

Застосування пасивної тепловізійної термографії у неруйнівному контролі виробів та ОК здійснюється шляхом знімання гістограм статичного розподілу амплітудного температурного профілю аномалії над несуцільністю на їх зовнішніх поверхнях. Для визначення розмірів гістограм аномалій температурного поля за координатами *х, у* на зовнішній поверхні об‘єкта контролю при його термографуванні дистанційним пасивним тепловізійним методом (на прикладі димової труби) запропоновано спосіб, суть якого наведена в роботі [8].

Обгрунтуємо одне із можливих правил порогової ідентифікації дефектів на прикладі дистанційного діагностування технічного стану димових промислових труб.

Припустимо, що при виконанні процедури тепловізійного термографування зовнішньої поверхні димової труби тепловізором була зафіксована множина інформативних ознак несуцільностей в конструктивних елементах труби. Під множиною інформативних ознак будемо розуміти сукупність аномалій температурного поля на зовнішній поверхні труби, яка розглядається як єдине ціле. Елементи такої множини - ознаки аномалій температурного поля, з яких складається множина. Інформативним параметром кожної аномалії є сформована тепловізором гістограма амплітудного розподілу температурного поля над відповідною несуцільністю. В кінцевому результаті ми отримаємо множину амплітуд гістограм розподілення температурного поля над несуцільностями труби.

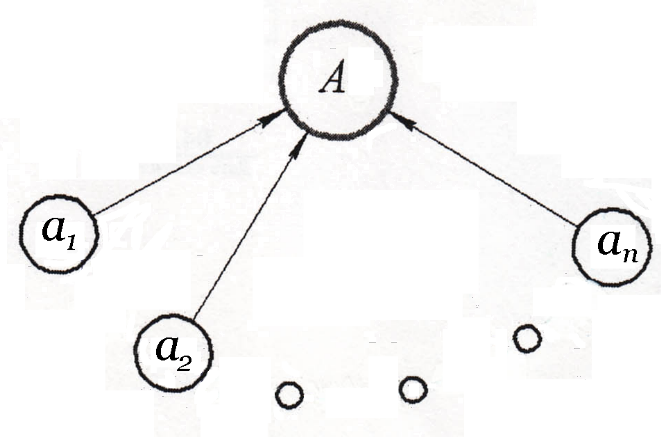
Якщо таку множину гістограм температурного поля за допомогою комп’ютеру або інших засобів електроніки перетворити в електричні сигнали, то отримуємо множину електричних сигналів різної амплітуди. Позначимо отриману множину електричних сигналів літерою , а кількість електричних сигналів окремих гістограм температурних полів як елементів множини  позначимо літерами .

В загальному випадку наведена множина електричних сигналів може бути описана наступною математичною залежністю:

. (1)

Амплітуди  у виразі (1) відповідають значенням електричних сигналів від несуцільностей, упорядкованих згідно збільшенню амплітуд. Модель упорядкованої за значенням амплітуд множини електричних сигналів згідно виразу (1) подана на рис. 1.

Наведена модель широко використовується для розв‘язання задач класифікації. На рис. 1 позначення  множини сигналів являє собою цільову змінну, що може набувати , де  – стан цільової функції, а позначення  – множина незалежних вхідних змінних амплітуд електричних сигналів гістограм температурного поля, які можуть впливати на цільову. Основним припущенням моделі є те, що всі вхідні змінні незалежні між собою.



**Рисунок 1 – Модель упорядкованої за значенням амплітуди множини електричних сигналів**

Враховуючи наведене, основні характерні особливості наведеної множини можна визначити наступним чином:

1) інформативними ознаками несуцільностей димової труби є множина аномалій температурного поля на її зовнішній поверхні, тобто своєрідних теплових «відбитків» несуцільностей;

2) аномалії температурного поля на зовнішній поверхні труби формуються випадково і незалежно одна від одної та відображають характер неупорядкованої множини несуцільностей в структурі її конструкції;

3) інформативними параметрами несуцільностей є множина незалежних амплітуд гістограм температурного поля над ними в процесі тепловізійної зйомки зовнішньої поверхні димової труби;

4) при перетворенні гістограм температурного поля в електричні сигнали формується множина незалежних та різних за амплітудою дискретних детермінованих інформативних параметрів несуцільностей, зв‘язок між якими відсутній;

5) амплітуди електричних сигналів змінюються в часі по мірі збільшення несуцільностей в процесі експлуатації димової труби, що, в свою чергу, впливає на значення амплітуди  множини.

Таким чином, при тепловізійному термографуванні зовнішньої поверхні димової труби саме електричні сигнали є тими інформативними сигналами, що відображають процес утворення несуцільностей в конструктивних елементах труби в процесі її експлуатації. Форма інформативних сигналів у вигляді окремих імпульсів є зручною для передачі, обробки та використання їх при діагностуванні технічного стану та моніторингу димових труб в процесі їх експлуатації. Саме тому за формою та амплітудою детермінованих інформативних сигналів від аномалій температурних полів на зовнішній поверхні труби здійснюється процедура діагностування її технічного стану пасивним тепловізійним методом.

Множину (1) при пасивному тепловізійному методі діагностування стану димових труб можна назвати полімодальною, оскільки вона містить в своєму складі інформативні сигнали різних амплітуд від несуцільностей труби, які можуть відноситись до дефектних та якісних ділянок поверхні. Достовірність віднесення їх до однієї з двох сукупностей буде залежати від встановлення порогового значення, тобто від визначення правила порогової ідентифікації дефектів.

При пасивному тепловізійному методі діагностування димових труб оптимальне визначення дефектів буде залежати від визначення параметрів гіперплощини, що розділяє контрольовані ділянки труби на дефектні та бездефектні.

Для визначення параметрів гіперплощини необхідно створити впорядковану вибірку інформативних сигналів від несуцільностей труби, яка повинна містити в собі достатню кількість сигналів від мінімальних до максимальних амплітуд. Оскільки використовуються одновимірні інформативні сигнали, то вони мають одновимірну функцію нормального розподілу.

Виходячи з цього, при виборі величини порогового значення інформативних сигналів для пасивного тепловізійного методу діагностування технічного стану димових труб, з достатнім ступенем формалізації можна скористатись однозв’язним алгоритмом з гістограмним методом класифікації дефектів.

Для інформативних сигналів  множини (1) упорядкованих за зростанням їх амплітуд, приймемо величину порогового значення:

. (2)

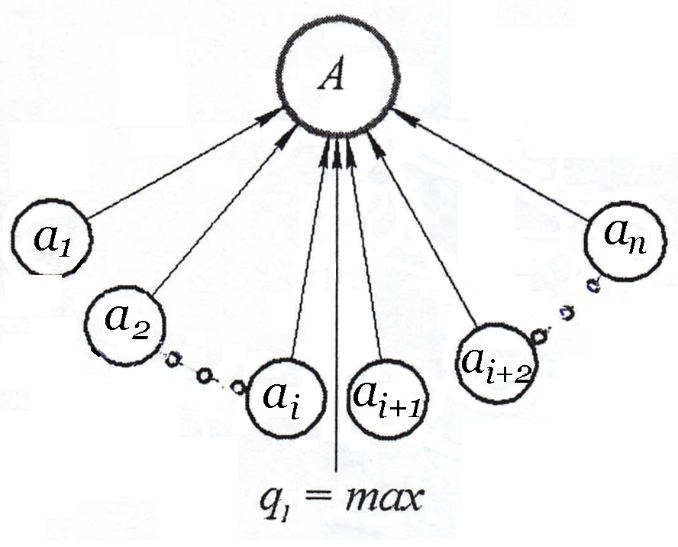
Тоді однозв‘язним алгоритмом полімодальні інформативні сигнали множини (2) будуть розділені на два класи:

 . (3)

Гіперплощина такого ділення буде характеризуватись ознакою .

Модель розділення впорядкованої множини інформативних сигналів на два класи наведена на рис. 2.

Місце розміщення максимального порогового значення  при достатній кількості інформативних сигналів у множині (1) збігається з місцем розміщення мінімуму щільності розподілу сигналів .



**Рисунок 2 – Модель розділу впорядкованої множини інформативних сигналів на два класи**

Саме тому значення сигналу *,* що відповідає *,* і є межею розділення двох сукупностей інформативних сигналів множини (1), які належать якісним та дефектним ділянкам димової труби.

Виходячи з цього, порогове значення інформативних сигналів, тобто правило порогової ідентифікації дефектів, можна визначити за виразом:

. (4)

Наведене правило порогової ідентифікації дефектів для діагностування технічного стану димових труб пасивним тепловізійним методом можна застосовувати при полімодальності гістограм аномалій температурного поля на зовнішній поверхні димової труби.

Запропонований підхід до обґрунтування правила порогової ідентифікації дефектів при діагностуванні технічного стану димових труб вимагає проведення експериментальних досліджень з визначення кількісних розмірів вибірки множини гістограм аномалій температурного поля над несуцільностями труби, визначення розмірів її діагностуємої ділянки, розробки методології оцінки рівня дефектності труби шляхом класифікації дефектів на основі правила порогової ідентифікації. Це дозволить, у разі потреби, розробити методичну документацію з технології застосування пасивного тепловізійного методу при діагностуванні технічного стану димових труб.

**Висновки**

1. Подано аналіз сутності та наведено приклади застосування правила порогової ідентифікації дефектів у методах неруйнівного контролю при оцінці якості виробів та об‘єктів контролю.

2. Виконано порівняльний аналіз основних характеристик активної та пасивної термографій в тепловому неруйнівному контролі та визначено їх основні інформативні параметри при контролі виробів та об‘єктів тепловізійним методом.

3. Обгрунтовано підхід до побудови правила порогової ідентифікації дефектів при діагностуванні технічного стану промислових димових труб із застосуванням пасивного тепловізійного методу.

**References /Список використаних джерел**

1. Zivenko A.V. Level measurement principles & sensors [Text] / A.V. Zivenko, A.G. Nakonechniy, D.Y. Motorkin // Materialy IX mezinarodni vedecko-prackticka conference “Veda a technologie: krok do budoucnosti - 2013”. – Dil. 28. Technicke vedy. Prague - 2013. pp. 85-90.

2. Yu. D. Zhukov and O. V. Zivenko, "Intelligent Polymetric Systems Industrial Applications," in Proc. 2nd Int. Workshop on Information-Communication Technologies & Embedded Systems (ICTES 2020), Mykolaiv, Ukraine, 2020, pp. 122-137. Available: <https://www.ceur-ws.org/Vol-2762/paper8.pdf>.

3. Fellner-Feldegg, H. (1969). Measurement of dielectrics in the time domain. *The Journal of Physical Chemistry, 73*(3), 616-623. https://doi.org/10.1021/j100723a023.

4. G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan, Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res. 16 (1980) 574–582.

5. D.A. Robinson, S.P. Friedman, A method for measuring the solid particle permittivity or electrical conductivity of rocks, sediments, and granular materials, J. Geophys. Res. B. 108

(B2) (2003) 2076, doi:10.1029/2001JB000691.

6. Glebovich G.V., Andrianov A.V., & Vvedensky I.P. (1984). *Investigation of Objects Using Picosecond Pulses*. Moscow: Radio i Svyaz.

7. C.P. Nemarich, Time domain reflectometry liquid level sensors, IEEE Instr. Meas. Mag. (2001) 40–44.

8. P.M. Hollywood, TDR level measurement, Meas. Contr. 31 (6) (1997) 94–98.

9. Cataldo, A., Tarricone, L., Attivissimo, F., & Trotta, A. (2008). Simultaneous measurement of dielectric properties and levels of liquids using a TDR method. *Measurement, 41*(3), 307-319. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2006.11.006>

10.

3. International Organization of Legal Metrology (OIML). (2008). *OIML R 85-1 & 2: Automatic level gauges for measuring the level of liquid in stationary storage tanks. Part 1: Metrological and technical requirements; Part 2: Metrological control and tests.* International Recommendation. Paris, France: Bureau International de Métrologie Légale (BIML).

Zivenko O., Nakonechnyi A., Motorkin D., & Gudyma, E. (2013). Automated calibration of level channels in polymetric systems considering the temperature of the electronic unit (in Russian). *Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering: Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference,* 424–427. Mykolaiv: National University of Shipbuilding.

Nakonechnyi, A.G., & Zivenko, A.V. (2015). Automation of calibration of level measurement channels in polymetric systems (in Russian). *Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering: Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 95th Anniversary of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,* 337–340. Mykolaiv: National University of Shipbuilding.

3. Krautkramer J., Krautkramer H. (1986). Warkstoffprufung mit Ultraschall. Berlin.

4. Стороженко В., Хорло М., Мєшков С., Маслова В. (2005). Підходи до створення стандартних зразків для теплового неруйнівного контролю. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. 1. 21-25.

5. Xavier P., Maldague V. (2001). Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. Join. Welle Sons, Inc. p. 684.

6. Inrernational standard ISO/FDIS 18434-2:2019(E). Condition monitoring and diagnostics of machines systems. – Thermography. – Part 2: Imoge interpretation an diagnostics.

7. Бондаренко О, Глуховський В. (2019). Аналіз способів діагностування технічного стану димових труб пасивним тепловізійним методом. Збірник доповідей 9-ої Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». Київ: 199-205.

8. Бондаренко О, Глуховський В. (2022). Спосіб термографування зовнішньої поверхні димових труб дистанційним пасивним тепловізійним методом. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. 3. 19-21.

**References**

1. Maslova V., Storozhenko V. (2004). Thermography in diagnostics and non-invasive control. Kharkiv: SMITH Company. [in Ukrainian]

2. Bilokur I. (2004). Basics of flaw detection. Kiev: "Azimuth-Ukraine". [in Ukrainian]

3. Krautkramer J., Krautkramer H. (1986). Warkstoffprufung mit Ultraschall. Berlin.

4. Storozhenko V., Khorlo M., Mєshkov S., Maslova V. (2005). Approach the creation of standard signs for thermal non-destructive control. Technical diagnostics and non-invasive control. 1. 21-25. [in Ukrainian]

5. Xavier P., Maldague V. (2001). Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. Join. Welle Sons, Inc. p. 684.

6. Inrernational standard ISO/FDIS 18434-2:2019(E). Condition monitoring and diagnostics of machines systems. Thermography. Part 2: Imoge interpretation an diagnostics.

7. Bondarenko O, Glukhovsky V. (2019). Analysis of methods for diagnosing the technical mill of smoke pipes using the passive thermal imaging method. Collection of proceedings of the 9th National Scientific and Technical Conference “Non-invasive control and technical diagnostics”. Kiev: 199-205. [in Ukrainian]

8. Bondarenko O, Glukhovsky V. (2022). Method of thermographing the external surface of smoke pipes using a remote passive thermal imaging method. Technical diagnostics and non-invasive control. 3. 19-21. [in Ukrainian]