

# СПОСІБ ТЕРМОГРАФУВАННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ ДИМОВИХ ТРУБ ДИСТАНЦІЙНИМ ПАСИВНИМ ТЕПЛОВІЗІЙНИМ МЕТОДОМ

О.Г. Бондаренко, В.Ю. Глуховський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [glukhovskyy@gmail.com](mailto:glukhovskyy@gmail.com)

У роботі розглянуто принцип реалізації способу термографування зовнішньої поверхні димових труб дистанційним пасивним тепловізійним методом із застосуванням лазерно-термографічного пристрою. Наведено алгоритм розрахунку геометричних параметрів внутрішньої несучільності, яка виявляється у вигляді поверхневої аномалії температурного поля. Наведений алгоритм є основою при вирішенні оберненої задачі пасивної термографії, що дає змогу підвищити достовірність оцінки технічного стану димових труб та інших важкодоступних промислових об'єктів. Бібліогр. 1, рис. 3.

*Ключові слова:* димові промислові труби, діагностування технічного стану, інфрачервона техніка, тепловізор, лазерний далекомір, пасивний тепловізійний метод, термографія, дефектометрія, геометричні параметри несучільності

Можливості дистанційного обстеження та діагностування технічного стану димових труб значно розширилися з використанням інфрачервоної техніки, серед якої найбільше розповсюдження отримали різні типи тепловізорів. Ці прилади дозволяють оперативно фіксувати аномалії температурного поля на зовнішній поверхні димової труби у вигляді термограм. Такі аномалії формуються під дією потенціалу температури газів при наявності несучільностей або зміні теплофізичних характеристик в елементах конструкції труби. Але встановити зв'язок між зареєстрованими тепловізором аномаліями температурного поля на поверхні труби та параметрами її внутрішньої структури до сьогоднішнього часу ще не вдавалося у зв'язку з відсутністю універсальної обробки термограм. Це пов'язано в першу чергу з тим, що кожен тип труби має свої особливості аномального розподілення температури на її поверхні, які залежать від конструкції труби, теплофізичних властивостей матеріалів, умов теплопередачі та теплообміну на зовнішніх межах тощо.

Для отримання інформації про температурні аномалії на зовнішній поверхні димової труби та визначення за їх допомогою геометричних розмірів, товщини та глибини залягання несучільності шляхом застосування оберненої задачі було розроблено спосіб термографування зовнішньої поверхні димової труби дистанційним пасивним тепловізійним методом [1].

Суть способу полягає в тому, що процес термографування зовнішньої поверхні димової труби доповнено пристроєм для дистанційного вимірювання відстані, за допомогою якого фіксується значення дистанції термографування та кут візування локальної температурної аномалії. Одночасно фіксуються кути поля зору тепловізора, яким здійснюється процедура термографування зазначеної температурної аномалії на поверхні труби. У якості пристрою для вимірювання відстані використовується лазерний

Бондаренко О.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-7319-1096>, Глуховський В.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-1969-495X>  
 © О.Г. Бондаренко, В.Ю. Глуховський, 2022

далекомір. Принцип застосування способу з наведенням тепловізора та далекоміра на зону термографування на поверхні димової труби наведено на рис. 1, де: 1 – стовбур димової труби; 2 – напрямок високотемпературного потоку газів, що рухається каналом димової труби; 3 – напрямок високотемпературного потоку газів, що взаємодіє з поверхнею стовбура димової труби; 4 – внутрішній дефект стінки стовбура димової труби (зменшення товщини стінки труби внаслідок впливу агресивного середовища); 5 – теплове випромінювання; 6 – зона формування локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні труби; 7 – далекомір; 8 – фотографічний штатив; 9 – тепловізор;  $L$  – відстань до локальної температурної аномалії;  $\alpha$  – кут візування;  $\theta$  – кут поля зору тепловізора за координатою  $y$ .

Блок-схему лазерно-термографічного пристрою та одnobічної реєстрації локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні димової труби наведено на рис. 2, де: 1 – стінка димової труби; 2 – несучільність стінки; 3 – температурна аномалія над несучільністю; 4 – лазерний далекомір; 5 – тепловізор; 6 – жорстка основа; 7 –

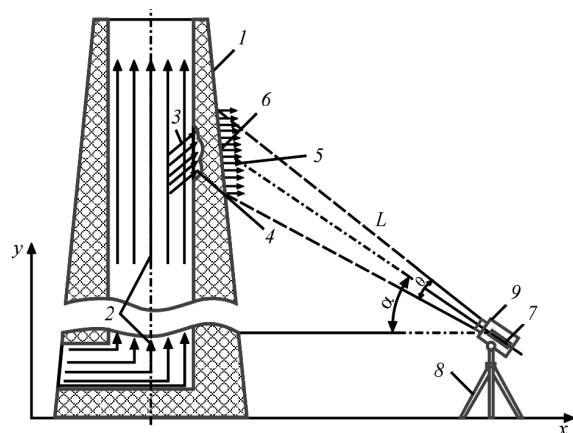


Рис. 1. Принцип застосування способу з наведенням тепловізора та далекоміра на зону термографування на поверхні димової труби

канал передачі інформації з тепловізора; 8 – блок обробки тепловізійної інформації; 9 – персональний комп’ютер; 10 – канал передачі інформації від лазерного далекоміра;  $\beta$  – кут поля зору тепловізора за координатою  $x$ . Для виконання процесу термографування кожної температурної аномалії 6 димової труби тепловізор 5 та лазерний далекомір 4 закріплюють на жорсткій основі (платформі) 6. Інформація про локальну температурну аномалію 3 з тепловізора 5 каналом 7 передачі інформації кризь блок 8 обробки тепловізійної інформації потрапляє до персонального комп’ютера 9. Інформація про відстань до димової труби з далекоміра 4 потрапляє до персонального комп’ютера 9 напрямку.

Для зручності наведення тепловізора та лазерного далекоміра на контрольовану поверхню та надійної фіксації необхідної інформації платформа з тепловізором та лазерним далекоміром закріплюється на вузлі просторової орієнтації фотографічного штативу (див. рис. 1), який дає змогу рухатись у різних просторових напрямках відносно центральної, нерухомої точки. У процесі термографування локальної температурної аномалії інформація про кути  $\theta$  та  $\beta$  поля зору тепловізора визначається параметрами його оптичного блоку, а відстань  $L$  до неї та кут відхилення  $\alpha$  від нормалі, відповідно, вимірами лазерного далекоміра. Із зафіксованого тепловізором термографічного

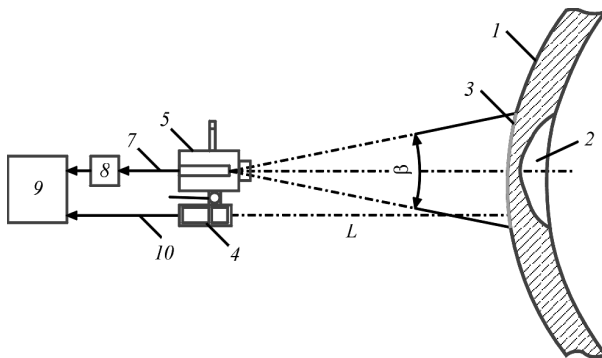


Рис. 2. Блок-схема лазерно-термографічного пристрою та однічної реєстрації локальних температурних аномалій на зовнішній поверхні димової труби

зображення температурної аномалії на зовнішній поверхні димової труби персональний комп’ютер за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення формує термограму температурного поля аномалії над несучільністю димової труби.

Під час термографування аномалії температурного поля над несучільністю на зовнішній поверхні димової труби тепловізор та далекомір встановлюються у вибраній точці.

Схему отримання наведеної інформації та представлення аномалії температурного поля у вигляді кадру термограми прямокутної форми наведено на рис. 3 [1].

Наведені на рис. 3 зв’язки дозволяють обґрунтувати алгоритм вирішення оберненої задачі пасивної термографії шляхом розрахунку площі  $S$  аномалії температурного поля над несучільністю, що буде відповідати її розмірам ( $a, b$ ) відповідно за координатами ( $x, y$ ). Для реалізації алгоритму застосовується спеціалізоване програмне забезпечення, яке входить до складу персонального комп’ютера.

Алгоритм розрахунку геометричних параметрів ( $a, b$ ) несучільності викладемо в наступній послідовності.

Прийmemo:

$$a = DE; b = AC; L = BP; AB = BC = b/2 \quad (1)$$

Тоді відстань від місця встановлення тепловізора та далекоміра до поверхні димової труби за координатою  $x$  визначається за виразом:

$$OP = BP \cdot \cos \alpha = L \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Вираз для розрахунку параметра  $a$  кадру термограми за координатою  $x$  можна записати наступним чином:

$$a = DE = 2PB \cdot \operatorname{tg} \beta/2 \quad (3)$$

Остаточно значення параметра  $a$  буде дорівнювати:

$$a = 2L \cdot \operatorname{tg} \beta/2 \quad (4)$$

Вираз для визначення параметра  $b$  кадру термограми за координатою  $y$  можна записати у вигляді:

$$b = AC = CO - AO \quad (5)$$

Запишемо значення  $CO$  та  $CA$  з використанням тригонометричних функцій:

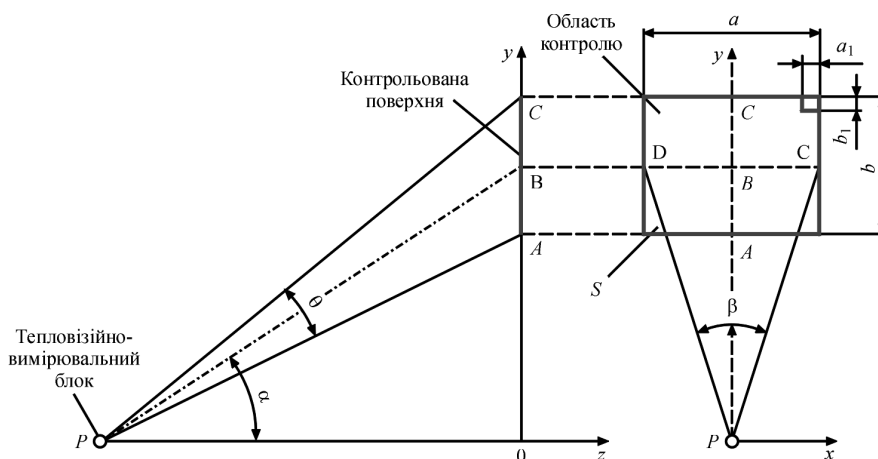


Рис. 3. Схема отримання інформації в процесі термографування та представлення аномалії температурного поля у вигляді кадру термограми прямокутної форми:  $P$  – точка встановлення тепловізора та далекоміра;  $S$  – площа контрольованої ділянки аномалії;  $a, b$  – геометричні параметри кадру термограми;  $a_1, b_1$  – геометричні параметри одиничного пікселя термограми

$$CO = OP \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) = BP \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right)$$

$$AO = OP \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) = BP \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) \quad (6)$$

Підставивши значення CO та AO виразів (6) до виразу (5), отримаємо остаточну формулу для розрахунку параметру  $b$  кадру термограми:

$$b = L \cdot \cos \alpha \left[ \operatorname{tg}\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) - \operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (7)$$

За значеннями лінійних параметрів  $a$  та  $b$  кадру термограми та за кількістю пікселів балометричної матриці тепловізора відповідно за горизонталлю ( $k_a$ ) та вертикаллю ( $k_b$ ) розміри пікселів будуть дорівнювати:

$$\text{за горизонталлю: } \alpha_1 = \frac{a}{k_a}, \text{ за вертикаллю: } b_1 = \frac{b}{k_b} \quad (8)$$

Тоді площа одного пікселя для кожної температурної аномалії буде визначатись за виразом:

$$S_n = a_1 \cdot b_1 = \frac{a \cdot b}{k_a \cdot k_b} \quad (9)$$

У залежності від значень температурних діапазонів  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$  для відповідних температурних профілів буде розрахована відповідна кількість пікселів:  $N_1, N_2, N_3$ .

Тоді площі кожного температурного профілю будуть визначатись за виразами:

$$\text{для } \Delta t_1: S_1 = \sum_1^{N_1} \frac{a \cdot b}{k_a \cdot k_b}, \text{ для } \Delta t_2: S_2 = \sum_1^{N_2} \frac{a \cdot b}{k_a \cdot k_b},$$

$$\text{для } \Delta t_3: S_3 = \sum_1^{N_3} \frac{a \cdot b}{k_a \cdot k_b} \quad (10)$$

Обґрунтування та розробка алгоритму оберненої задачі шляхом визначення геометричних параметрів несучільностей димової труби вирішує задачу теплової дефектометрії в пасивній термографії. Збільшення розмірів несучільностей у зв'язку зі зростанням амплітуди розподілення аномалії температурного поля в пасивній термографії дозволяє підвищити достовірність дистанційної оцінки технічного стану димових труб, інших важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів

пасивним тепловізійним методом без виведення їх з експлуатації.

У зв'язку з тим, що несучільності димової труби в її шарах починають розвиватись з внутрішньої поверхні труби, амплітуди аномалій розподілення температурного поля над ними дозволяють робити висновок про їх розміри за товщиною та розпізнавати контури несучільностей у різних шарах димової труби, що може хоча б опосередковано свідчити про вирішення задачі теплової томографії в пасивній термографії. Запропонований алгоритм вирішення оберненої задачі пасивної термографії встановлює зв'язок між зареєстрованими аномаліями температурного поля на зовнішній поверхні об'єкта діагностування та параметрами його внутрішньої структури з використанням пасивного дистанційного тепловізійного методу контролю.

### Висновки

Розроблено спосіб термографування зовнішньої поверхні димової труби дистанційним пасивним тепловізійним методом, суть якого полягає в тому, що процес термографування зовнішньої поверхні димової труби доповнено процедурою визначення дистанції контролю та куту візування тепловізійного пристрою.

Наведено алгоритм розрахунку геометричних параметрів ( $a, b$ ) несучільності, яка виявляється у вигляді аномалії температурного поля на поверхні контрольованого об'єкту.

Розроблені науково-методичні аспекти дистанційного діагностування технічного стану тришарових цегляних димових труб також можуть бути застосовані для оцінки технічного стану багат шарових бетонних димових труб (наприклад чотиришарових), інших важкодоступних та потенційно небезпечних об'єктів з використанням пасивного тепловізійного методу контролю.

### Список літератури

1. Троїцький В.О., Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. (2018) *Спосіб дистанційної пасивної теплової діагностики важкодоступних та потенційно небезпечних промислових об'єктів*. Патент на винахід № 122355. Заявл. 27.06.2018. Опубл. 26.10.2020. Бюл. № 20. Troitskiy, V.O., Bondarenko, O.G., Glukhovskiy, V.Yu. *Method of passive thermal diagnostics of difficult-to-access and potentially dangerous industrial objects*. Patent for invention 122355, fill. 27.06.2018, publ. 26.10.2020 [in Ukrainian].

## METHOD OF THERMOGRAPHY OF THE OUTER SURFACE OF CHIMNEYS BY REMOTE PASSIVE THERMAL VISION TECHNIQUE

O.G. Bondarenko, V.Yu. Glukhovskiy

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: glukhovskyy@gmail.com

The work deals with the principles of realization of the method of thermographing of the outer surface of chimneys by remote passive thermal vision method with application of a laser-thermographic device. An algorithm for calculation of the geometrical parameters of inner discontinuity is given. It is manifested in the form of surface anomaly of the temperature field. The given algorithm is the base for solving the inverse problem of passive thermography, allowing an improvement of the reliability of assessment of the technical condition of chimneys, and other difficult-of-access industrial facilities. Ref. 1, Fig. 3.

*Keywords: industrial chimneys, diagnosing of the technical condition, infrared technology, thermal imager, laser distance meter, passive thermal vision technique, thermography, defectometry, geometrical parameters of discontinuity*

Надійшла до редакції 06.06.2022