

УДК 004.932:616-71
DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.1.5>

АВТОМАТИЗАЦІЯ МЕТОДУ ТЕРМОГРАФІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПАТОЛОГІЇ ОРГАНІЗМУ ЛЮДИНИ

Муравйов О.В. – кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-7699-0245

Петрик В.Ф. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0003-2301-0722

Лисенко Ю.Ю. – кандидат технічних наук, доцент,
старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0001-9110-6684

Богдан Г.А. – кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0001-6745-1509

Наконечная А.В. – студентка кафедри автоматизації
та систем неруйнівного контролю
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0001-7171-8659

Медична термографія найбільш успішно поєднує ефективний пошук патологій та абсолютну неінвазивність для пацієнта та медичного персоналу. Надійність діагностики заснована на стабільності тепловізійної симптоматики, основним параметром якої є послідовність та передбачуваність зміни відносних температур. Це дозволяє використовувати термографію як метод ефективного контролю над перебігом патологічних процесів в організмі людини для різних сфер медичної діяльності.

Робота присвячена аналізу можливостей і перспектив розвитку та застосування термографії як методу медичної діагностики. Розглянуто сучасний стан та проблеми використання тепловізійної апаратури для виявлення різних патологій організму людини. Запропоновано напрями концентрації подальших досліджень щодо вдосконалення методу та його поширення в різних галузях медицини.

Одним із найвідоміших принципів діагностики патологій організму людини на основі термограм є порівняння температур симетричних частин тіла або аналіз зміни градієнта температури на окремих ділянках організму. Перший підхід має кілька винятків, найбільш значущим серед яких є область серця: температура в цій області, безумовно,

вища, ніж у симетричній ділянці з правого боку грудної клітки. Тому такий метод не завжди можливий для застосування, особливо якщо патологія пов'язана з кардіологічним аспектом. Однак порівняння температур симетричних ділянок на основі термограм в інших ділянках тіла людини дозволяє з високою ймовірністю виявити вогнища запальних процесів чи наявність пухлин. Крім онкології, медична тепловізійна техніка знайшла застосування в отоларингології, мамології, стоматології і навіть хірургії, де в процесі певних операцій (наприклад, під час розтину серця або трансплантації) необхідно дуже точно підтримувати певну температуру тіла пацієнта.

Подальші зусилля з удосконалення діагностичного методу медичної термографії доцільно спрямувати на підвищення якості теплових зображень та розробку алгоритмів автоматичної діагностики хвороб та патологій із застосуванням цифрової обробки зображень та технології штучного інтелекту.

Ключові слова: медичний тепловізор, термографія, автоматизація, тепловізійна техніка, неінвазивна діагностика.

Muraviov O.V., Petryk V.F., Lysenko I.I., Bohdan H.A., Nakonechna A.V. Automatization of thermographic diagnostic method of human body pathologies

Medical thermography successfully combines effective search for pathologies and absolute non-invasiveness for patient and medical staff. The reliability of diagnostic is based on the stability of thermal imaging symptoms, the main parameter of which is consistency and predictability of relative temperatures changes. This allows to use thermography as a method of effective testing over the pathological processes in the human body for various areas of medical practice.

The article is devoted to analysis of possibilities and prospects of development and application of thermography as a method of medical diagnostic. The current state and problems of using thermal imaging equipment to detect various pathologies of human body are considered. Directions of concentration of further researches for development of method and its distribution in various spheres of medicine are offered.

One of the most well-known principles of diagnosing pathologies of human organism on the basis of thermograms is comparison of temperatures of symmetrical parts of body or changes analysis in temperature gradient on certain parts of the body. The first approach has several exceptions, the most significant of which is the heart area. Temperature in this area is certainly higher than in symmetrical area on the right side of chest. Therefore, this method is not always possible to use, especially if the pathology is related to cardiological aspect. However, the comparison of temperatures of symmetrical areas on the basis of thermograms in other parts of human body allows with a high probability to detect focus of inflammation or presence of tumors. Besides oncology, medical thermal imaging cameras has found application in otolaryngology, mammology, dentistry and even surgery, where during some operations (for example, heart transplantation) it is necessary to maintain definite temperature of the patient body.

Further efforts for improve the diagnostic method of medical thermography should be aimed at improving the quality of thermal images and the development of algorithms for automatic diagnosis of diseases and pathologies using digital image processing and artificial intelligence technology.

Key words: medical thermal imaging camera, thermography, automatization, thermal imaging system, non-invasive diagnostic.

Постановка проблеми. Як відомо, теплові зображення поверхні тіла дозволяють оцінювати відхилення від норми та аналізувати наявність патологій в організмі людини. Зокрема, медична термографія використовується нині для діагностики раку, травм, запальних процесів. Інформативність аналізу термограми насамперед ґрунтується на роздільній здатності оптичної системи та приймача випромінювання, а також якості отриманого зображення. Остання при цьому залежить від температури навколишнього середовища, наявності завад під час проведення процедури діагностики та ефективності алгоритму цифрової обробки даних.

Однією з основних переваг медичної термографії є неінвазивність, тому що в процесі діагностики проводиться реєстрація лише власного випромінювання об'єкта контролю. Метод також дозволяє виявити на ранній стадії різні захворювання людини та застосовується в багатопрофільних медичних закладах.

Термографія дозволяє проводити аналіз анатомо-топографічних та функціональних змін у досліджуваній зоні. Візуальне спостереження теплової картини тіла

пацієнта за допомогою умовних відмінностей яскравості або колірнього контрасту областей зображення дозволяє визначити різницю температур певних ділянок.

Термографічна техніка, що використовується нині в різнопрофільних медичних закладах, дозволяє отримати якісну високоінформативну термограму окремої ділянки тіла, проте опрацюванням результатів діагностики займається безпосередньо лікар, який самостійно аналізує відхилення температури ділянок теплового зображення від норми. На жаль, за такого підходу є висока ймовірність помилки, зумовленої людським фактором: суб'єктивністю судження та низькою кваліфікацією медичного персоналу.

Основним фактором, що зумовлює складність аналізу результатів термографічної діагностики, є відмінність нормальної температури у різних людей. Частина тіла також мають значну різницю в температурі, і хоча загальні закономірності існують, уніфікувати значення нормальної температури для всіх пацієнтів все одно неможливо через індивідуальні особливості організму. Таким чином, одним з найважливіших та актуальних завдань у розвитку цього напрямку медичної діагностики натеper є автоматизація аналізу термограм і вдосконалення програмних алгоритмів виявлення патологій на основі цифрової обробки зображень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Медична термографія – відносно молодий метод діагностики великої кількості захворювань людини, що дозволяє відслідковувати зміну стану пацієнта, контролювати хід його лікування, динаміку процесу загоєння ран, а також запобігати можливому розвитку ускладнень. Застосування термографа є високоефективним засобом обстеження пацієнтів з метою виявлення запальних процесів, особливо на стадії відсутності клініко-лабораторних даних, тому цей метод діагностики доцільно використовувати саме на ранніх стадіях захворювання. Пасивність та безконтактний характер процесу дослідження взагалі унеможливають нанесення будь-якої шкоди здоров'ю людини. Отже, термографія є потенційно вкрай ефективною для застосування як функціональний і метод скринінг-діагностики. Термограми, отримані за допомогою різних тепловізорів, уніфіковані, відрізняються фактично лише розмірами і якістю зображення та можуть використовуватись одночасно для виявлення різних патологій. У наші дні вже розроблено критерії та методики тепловізійної діагностики для ідентифікації більш ніж двохсот захворювань людини. Метод дозволяє діагностувати відхилення від норми на ранніх стадіях протікання хвороби, що значно прискорює лікування та одужання пацієнта [1, с. 1294–1320]. Протягом останнього десятиліття список патологій, які можна виявити за допомогою медичної термографії, значно розширився. Тенденція зумовлена не лише вдосконаленням тепловізійної техніки, температурна роздільна здатність якої нині вже досягає сотих часток градуса, а й розробкою та впровадженням нових методів обробки та аналізу зображень [2, с. 169–171].

Постановка завдання. Завданням роботи є дослідження можливості використання термографічних систем як засобу ефективного обстеження та виявлення патологій організму людини в різних галузях медицини, аналіз сучасних проблем, актуальних і перспективних сфер використання такого методу діагностики, а також напрямів його вдосконалення з метою підвищення ефективності роботи та більшого поширення.

Виклад основного матеріалу. Як правило, тепловізійні камери реєструють електромагнітне випромінювання довжин хвиль, що відповідають вікнам прозорості атмосфери 3–5 мкм або 8–14 мкм [3, с. 195–199]. Однак, якщо йдеться саме про медичну термографію, вибір спектрального діапазону визначається не

лише характером поглинання атмосфери, оскільки об'єкт контролю (людина) знаходиться близько до камери і ступінь поглинання інфрачервоного (ІЧ) випромінювання повітрям стає відносно невеликим. Встановлено, що термографи, які працюють у діапазоні довжин хвиль 3–5 мкм, дуже чутливі до рефлексів шкіри від теплових джерел навколишнього середовища. Зважаючи на те, що максимальна інтенсивність випромінювання тіла людини з температурою 37°C припадає приблизно на 9,3 мкм [4, с. 106–111], а вплив паразитного фону значно менший у діапазоні 8–14 мкм, під час проєктування медичної ІЧ техніки рекомендується орієнтуватися саме на ці довжини хвиль оптичного спектра.

Принцип роботи всіх теплових детекторів заснований на зміні електричних характеристик матеріалу чутливого шару фотоприймача за рахунок поглинання енергії ІЧ випромінювання, що надійшла від об'єкта контролю. Термограф є оптико-електронним пристроєм, основними елементами якого є матричний приймач випромінювання та оптична система. Багатоеlementні фотоприймачі, що застосовуються нині в тепловізійній техніці, мають суттєву теплову інерційність, тому їх частота кадрів обмежується 50 Гц. Проте цього періоду оновлення зображення досить для вирішення всіх актуальних діагностичних задач біомедицини. Натепер температурна чутливість (мінімальна різниця температур, що розпізнається) термографічних приладів за температур контролюваної поверхні 30°C може досягати 0,02°C [5, с. 47–55]. Більшість сучасних термографів мають можливість підключення та передачі даних на комп'ютер для їх подальшої обробки та аналізу медичним працівником.

Застосування термографії. Поверхня певної ділянки тіла людини має свою нормальну температуру, що пов'язано з особливостями системи кровообігу організму. При цьому для конкретного пацієнта вона також є індивідуальною. Проте, крім області серця, температура протилежних симетричних зон за відсутності патологій приблизно однакова. У разі однорідних температурних умов навколишнього середовища відмінність значень температури у таких областях не має перевищувати 0,3°C (рис. 1).

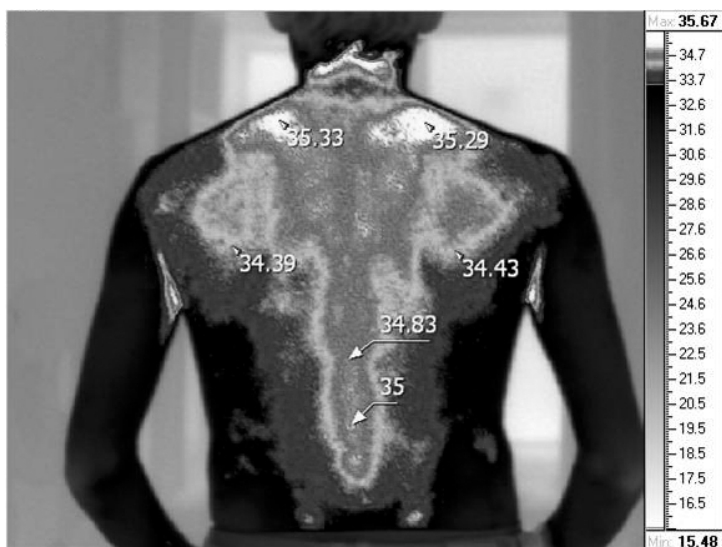


Рис. 1. Термограма здорової людини

На цій закономірності можуть ґрунтуватись принципи аналізу результатів термографічної діагностики: зареєстрована різниця температур на симетричних ділянках тіла пацієнта в 1–2°C сигналізує про наявність патології організму. У разі, коли причиною є онкологічна проблема, відхилення температурного значення у більшу сторону вказує на наявність злоякісної пухлини, меншу – доброякісного переродження.

Нині термографічна діагностика використовується в різних сферах медицини, включаючи онкологію, мамологію, оториноларингологію, кардіохірургію та судово-медичну експертизу. Розглянемо кожен з наведених напрямів медичної діяльності і проаналізуємо можливості, перспективи та особливості застосування методу.

Кардіохірургія. Однією з найважливіших проблем у кардіохірургії є ішемічне ураження міокарда через відсутність нормальної коронарної перфузії внаслідок перетискання аорти. Температурні зміни верхніх відділів серцевого м'яза в досліджуваній зоні чітко виражені на термограмі у разі гіпотермії та гіпертермії в умовах зупинки серця і штучного кровообігу. Високоточний температурний контроль у процедурах охолодження або зігрівання тканин мозку та серця забезпечує максимальний захист міокарда під час хірургічних втручань і дозволяє зменшити час штучного кровообігу. Можливість відстеження у реальному часі змін розподілу температурного поля на поверхні серця за допомогою ІЧ камери є інноваційним та може застосовуватись у процесі кардіохірургічних операцій.

Мамологія. Ефективність методів лікування раку молочної залози залежить головним чином від стадії хвороби та ступеня поширення пухлини. Гормональні препарати, хімотерапія чи променеве лікування є результативними лише у разі розміру новоутворення менше 2 см. У інших випадках ефективним засобом усунення патології залишається лише хірургічне втручання. При цьому результати проведених досліджень свідчать, що лише не більш ніж у 30% пацієнтів діагностують захворювання на ранніх стадіях. Це робить термографічну діагностику, як засіб раннього виявлення пухлин, дуже перспективною до застосування у цьому напрямі медицини.

Температура зони шкірного покриву із проєкцією патології відрізняється від значення у симетричній зоні тіла мінімум на 0,5°C. У разі кіст молочної залози на тепловому зображенні навколо патології спостерігаються кільцеві зони нижчої температури, тоді як осередок характеризується областю локальної гіпертермії.

Оториноларингологія. Термографічний скринінг у разі аурикуло-темпорального синдрому дозволяє зареєструвати наявність градієнта температур у межах 1,5–2,0°C відповідно до симетричної здорової області тіла пацієнта. Ділянка гіпертермії на початковій стадії розвитку патології зазвичай проявляється на термограмі у зоні нижньої щелепи пацієнта у вигляді однорідної структури з розмитими контурами.

Методика тепловізійної діагностики у сфері оториноларингології передбачає поділ обличчя людини на зони певної відносної температури: наприклад, ніс, вушну раковину і підборіддя відносять до холодних областей, а слуховий прохід, губи і область очей – до гарячих ділянок відповідно.

Судово-медична експертиза. Об'єктивне підтвердження думки судово-медичного експерта щодо давності строку завданих ушкоджень є важливою ланкою судового провадження. Травматичний вплив на людину зумовлює виникнення температурної реакції живих тканин організму. Термографічна діагностика дозволяє зареєструвати і зберегти у вигляді цифрових даних значення температур та положення зон гіпертермії, а також дає можливість оцінити давність та характер нанесених пошкоджень.

Абсолютна неінвазивність методу та його безконтактний характер дозволяють адаптувати термографічну діагностику для ефективного оперативного скринінгу потерпілих та звинувачуваних людей. Однак для отримання достовірних результатів дослідження слід проводити за температури навколишнього середовища в межах 22–24°C, що не завжди є можливим в умовах роботи бюро судово-медичної експертизи.

Висновки. Термографічна діагностика захворювань натеper є перспективним напрямом та актуальним завданням у різних сферах медицини. Низька популярність та відсутність масового впровадження такого методу зумовлена його відносною новизною, недостатністю досліджень, відсутністю кваліфікованих медичних фахівців у цій галузі та програмного забезпечення для автоматичної оцінки отриманих результатів. Лише невелика кількість медичних установ в Україні використовують тепловізійну техніку, незважаючи на наявність великої кількості переваг такої діагностики: неінвазивність, швидкодію, високу інформативність.

Нині розвиток технологій штучного інтелекту дозволяє повністю автоматизувати процес аналізу медичних теплових знімків з метою виявлення патологій. Цифрова обробка зображень, алгоритми якої засновані на наведених у роботі принципах аналізу термограм, також значно підвищить вірогідність вчасно та правильно поставленого лікарем діагнозу.

Застосування нейронних мереж, що самонавчаються, за наявності анонімної бази даних термограм, яка складається з кількох тисяч теплових знімків, з поставленими ідентичними діагнозами одночасно двох-трьох висококваліфікованих лікарів дозволить домогтися достовірності автоматичної постановки діагнозу в 95%, що забезпечить успішне подальше функціонування діагностичної системи. У разі реалізації такого підходу робота медичного працівника буде суттєво спрощена.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Иваницкий Г.Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине. *Успехи физических наук*. 2006. № 12. С. 1294–1320.
2. Галаган Р.М., Муравьев А.В., Томашук А.С. Модель восстановления серии изображений из смазанного изображения для решения задачи высокоточного измерения диаметра и температуры излучающих объектов. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій* : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. 2019. С. 169–171.
3. Муравьев А.В., Назарчук Е.А. Термостабилизация качества изображения оптической системы термографа. *Вісник інженерної академії України*. 2016. № 4. С. 195–199.
4. Данилова В.А., Шликов В.В. Тепловізійне дослідження розподілу температури міокарда. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2014. № 5. С. 106–111.
5. Ставоровський К.М. Автоматична діагностика та аналіз термограм у медичній практиці. *ElectronComm*. 2014. Vol. 19. № 1 (78). С. 47–55.

REFERENCES:

1. Ivanitsyi, G.R. (2006). Sovremennoe matrichnoe teplovidenie v biomeditsine [State of the art of thermovision in biomedicine]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 12, 1294–1320 [in Russian].
2. Halahan, R.M., & Muraviov, A.V., & Tomashuk, A.S. (2019). Model vosstanovleniia serii izobrazhenii iz smazannogo izobrazheniia dlia resheniia zadachi visokotochnogo izmereniia diametra i temperature izluchaiushchich obektov [Model of restoration of a series of images from a motionblurred image to solve the task of a high-accurate measurement of diameter and temperature of radiative objects]. *IV Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia "Teoretichni ta prikladni aspekti*

radiotekhniki, priladobuduvannia i komputernikh tekhnologii", pp. 169–171. Ternopil: FOP Palianitsia V.A. [in Russian].

3. Muraviov, A.V., & Nazarchuk, E.A. (2016). Termostabilizatsiia kachestva izobrazeniia opticheskoi sistemy termografa [Thermal stabilization of image quality for optical system of thermography camera]. *Visnik inzhenernoi akhademii Ukrainy*, 4, 195–199 [in Russian].

4. Danilova, V.A., & Shlikov, V.V. (2014). Teploviziine doslidzhennia rozpodilu temperaturi miokarda [Using of thermal imaging in the study of the temperature distribution of myocardial]. *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 5, 106–111 [in Ukrainian].

Stavorovskii, K.M. (2014). Avtomatichna diagnostika ta analiz termogram v medichnii praktitsi [Automatic diagnostic and analysis of thermal images in medical practice]. *ElectronComm*, 1 (78), 47–55 [in Ukrainian].