

УДК 006.91+536.5

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВТРАТ БУДИНКУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

© Дзіковська Юлія, Гоц Наталія, 2015

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Проаналізовано методики розрахунку тепловтрат будинку, виявлено їх особливості та недоліки. Розроблено методику проведення розрахунку теплових втрат поверхні огорожувальних конструкцій будинку за результатами тепловізійного дослідження залежно від опору теплопередачі та градієнта температури базової й дефектної ділянок.

Ключові слова: теплові втрати, тепловий потік, тепловізійне дослідження, теплопередача, випромінювання.

Проанализированы действующие методики расчета теплопотерь здания, выявлены их особенности и недостатки. Разработана методика проведения расчета тепловых потерь поверхности ограждающих конструкций здания по результатам тепловизионного исследования в зависимости от сопротивления теплопередаче и градиента температуры базового и дефектного участков.

Ключевые слова: тепловые потери, тепловой поток, тепловизионное исследование, теплопередача, излучение.

The application of infrared thermography as a method of estimation of heat losses of building structures is becoming more popular within the resolve the issues of power resources economy, determination of energy efficiency and increasing of buildings thermal protection. It should be remembered that the output result of buildings thermal imaging research is thermal temperature distribution of the investigated surface on the thermogram. Other information, including the value of the heat losses from the surface of the building envelopes, is gotten by analytical method, which involves the construction of certain algorithm. As the results of the review of recent researches and publications we can conclude that the usage of thermal imaging research is mainly limited by finding places with thermal field deviations from basic values and recognition that they are defective. Quantitative processing of heat losses that are related with it is missing out. Therefore, in the article the brief overview of current methods of heat losses calculation is provided, their features and weaknesses are identified and the method of calculating of heat losses of the building envelopes surface, that is based on the results of thermal imaging research depending on resistance of the thermal transmittance and temperature gradient of the basic and defect areas, is developed.

Methods, that are provided by acting normative documents of Ukraine, optimally satisfy the conditions of complex heat exchange because they take into account within the usage of the resulted and subjunctive thermal transmittance coefficients all three types of heat exchange, namely conductivity (through heat conductivity of material), convection (through heat transmission) and radiation (through heat emission). Thus, if we can find all unknown values in the methods formulas such algorithms give us possibility to determine the basic value of building envelope heat losses for a specific rooms and building in general. The negative aspect of the usage of these algorithms is proximity of calculation (for example, as a result of surface heterogeneity of the building envelopes) and the reference to table values of most variables, which can significantly vary from the actual values as a result of the building exploitation, the influence of climatic conditions, the repairs etc. In addition, the awkwardness of the calculations and the need of the simultaneous availability of a large number of normative documents increase the time that is required to their realization, respectively the cost of such work, as well as the growth of subjective component of calculations error.

Therefore we propose to add to the normative methods method of heat losses calculation of building that is based on the results of thermal imaging research.

The first algorithm involves the determining of the value of resulted resistance of thermal transmittance of defective area using its basic value from formula of the surface temperature distribution of the building envelopes.

The second algorithm allows to determining the growth of heat losses compared to its value of the basic area using the identified quantity of the relative resistance of thermal transmittance.

The disadvantage of these two algorithms is that to calculate the heat losses we must have information about the structure of the building envelope (its basic area) to determine the resulted resistance of the thermal transmittance of the construction. The effectiveness of these two algorithms is justified in the case of simulation of potential thermal characteristics of the building on the results of the implementation of the recommendations for building thermomodernization, when the resulted resistance of building thermal transmittance is predetermined.

The third algorithm allows to consider that in practice in real conditions operators have to work with the buildings of long time exploitation, for which its thermal characteristics are changed due to influence of various factors or data of these characteristics are absent. In this case, in calculating of heat losses we have to be limited only by the data of thermogram and the results of accounting of the research conditions to determine the resulted resistances of basic and defective areas. For this we provide the creation of the system of two equations based on the formula of surface temperature distribution of the building envelopes. Creation of such system is possible in three variants. Selection of each of them depends on the thermograms information of building and the possibility of second thermal imaging research, because each of the options makes its own budget of uncertainty in the resulting value of the resulted resistance of thermal transmittance.

The following algorithm for determination of the heat losses suggests their definition only in the radiative component of heat flux. It allows to limit the minimum number of input variables, whose values are provided exclusively by thermal imager and technical documentation on it. It should be remembered that such losses are always smaller than losses that are determined by the total heat flux.

On the basis of the calculation of building heat losses increase their monetary evaluation is conducted. It helps to estimate the recouplement of work to eliminate the sources of such heat losses.

Key words: heat losses, heat flux, thermal imaging research, thermal transmittance, radiation.

Постановка проблеми. Застосування інфрачервоної термографії як методу оцінювання теплових втрат будівельних конструкцій стає все популярнішим у межах вирішення питань економії енергоресурсів, визначення енергоефективності та підвищення теплового захисту будівель. Оптимальним вважається проведення тепловізійних досліджень теплоізоляційного шару всередині та назовні будівлі. Це дає змогу насамперед:

- зарахувати будівлю до того чи іншого класу енергетичної ефективності, розробляючи її енергетичний паспорт (за результатами екстраполяції результатів поточного огляду на весь період нагрівання [1]);
- провести розрахунок теплотехнічних характеристик будівлі та перевірити їх на відповідність чинним будівельним та санітарним нормам;
- перевірити якість роботи підрядних організацій із будівництва, модернізації, реконструкції чи ремонту будівлі;
- виявити містки холоду, місця пошкодження чи відсутності теплоізоляційного шару, інфільтрації повітря, невідповідності конструктивного шару проектній документації, накопичення вологи тощо, що, власне, і призводять до зростання втрат теплоти, та розробити рекомендації щодо їх усунення.

Загалом результати тепловізійного дослідження теплоізоляційного шару будівлі є підтвердженням його якості в межах відповідності встановленим вимогам.

Треба пам'ятати, що вихідним результатом тепловізійного дослідження будівлі є розподіл температури по досліджуваній поверхні на термограмі. Інші дані, зокрема величину втрат теплоти, отримуємо розрахунково-аналітичним методом, який передбачає побудову визначеного алгоритму.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Загальні питання підвищення теплового захисту та визначення енергоефективності будівель розглянуто у статтях [2–4]. Проте для них характерна пропозиція застосування тепловізійного дослідження лише як засобу візуалізації наявних відхилень від встановлених норм. Спроби оцінювання результатів термографування зроблено у статті [5], у якій розглянуто можливість поєднання термографування та комп'ютерного моделювання для визначення й оцінювання дефектів ізоляції фасадів будівель, що водночас сприяє підвищенню точності результатів тепловізійного дослідження. Важливим у цій статті є підкреслення необхідності у комп'ютерній обробці результатів тепловізійного дослідження з метою виключення суб'єктивного фактора оцінки та інтерпретації результатів, проте конкретні алгоритми роботи надто розмиті та зведені до посилання на чинні нормативні документи. У роботі [6] запропонована комплексна оцінка енергоефективності та теплового захисту

багатоквартирних будинків, що передбачає візуально-інструментальне обстеження, тепловізійний контроль якості теплового захисту та розрахункову оцінку теплотехнічних показників огорожувальної конструкції. При цьому її використання обмежене потребою у наявності повного комплексу проектної документації, що часто відсутня частково чи повністю або вже не відповідає дійсності внаслідок, наприклад, проведення ремонтних робіт.

Мета та завдання дослідження. Огляд літератури підтверджує доцільність та ефективність застосування під час оцінювання стану огорожувальних конструкцій, зокрема і теплоізоляційної оболонки, тепловізійного дослідження. Його використання переважно обмежене пошуком місць із відхиленнями показників розподілу теплового поля від базових значень та визнання їх дефектними, тобто констатацією факту їх наявності. Кількісного опрацювання пов'язаних із цим втрат теплоти немає.

Відповідно до цього, метою нашого дослідження є розроблення алгоритму кількісного визначення втрат теплоти на підставі вихідних результатів тепловізійного дослідження. Відповідно до мети виділяємо такі завдання:

- ознайомитися із нормативним порядком розрахунку втрат теплоти;
- визначити арифметичні залежності між величинами, що впливають на показник втрат теплоти;
- розробити методику розрахунку втрат теплоти за результатами тепловізійного дослідження.

Виклад основного матеріалу. Положення будівельних нормативних документів щодо теплових характеристик будівлі мають використовуватися під час проектування, будівництва, реконструкції й капітального ремонту (термомодернізації), складання енергетичного паспорта, визначення витрат паливно-енергетичних ресурсів для опалення будинків розрахунково-аналітичним методом, проведення енергетичного обстеження будівель тощо. При цьому враховується, що конструкції сучасних багатошарових огорожень характеризуються розподілом функцій між окремими матеріальними шарами. У загальному випадку огорожувальна конструкція складається з конструктивного (несучого шару), теплоізоляційного, а також паро- або гідроізоляційних, внутрішнього і зовнішнього фактурних шарів. Для режиму теплопередачі основними є конструктивний і теплоізоляційний шари.

Конструктивним зазвичай є шар зі щільного матеріалу, що відповідно володіє значною теплопровідністю і низькою проникністю для водяної пари і повітря. Матеріал теплоізоляційного шару пористий, рихлий, а отже, із низькою теплопровідністю та добре пропускає водяну пару і повітря [7]. Тому пошкодження або наявність неякісного теплоізоляційного шару істотно позначається на величині втрат теплоти із поверхні огорожувальних конструкцій будівлі.

В ідеальних умовах кількість теплоти, що має споживатись будівлею, а відповідно і кількість теплоти, що вона втрачає, залежить від теплотехнічних якостей огорожувальних конструкцій та від температури зовнішнього повітря. Фактично ці величини залежать не лише від згаданих вище факторів, які належать до основних, а і від другорядних: швидкості вітру, роботи вентиляційних систем, недосконалості засобів генерації та розподілу теплоти тощо.

Нормативне споживання теплоти визначають, виконуючи розрахунки за використовуваними методиками, передбаченими чинним законодавством. Найдоцільніше використовувати методики, наведені у ДБН В.2.6-31:2006 “Теплова ізоляція будівель” та ДСТУ Н Б А.2.2-5:2007 “Настанова з розробки енергетичного паспорта”. Проте не можна забувати, що вони спираються на розрахункове визначення питомих тепловитрат на опалення будинку, що часто ототожнюють із порядком розрахунку теплових втрат будинку. Ці поняття варто чітко розмежовувати.

Згідно з пунктом 5.3 ДСТУ Н Б А.2.2-5:2007 визначаються загальні тепловтрати будинку, до яких входять, окрім тепловтрат через огорожувальні конструкції (тобто через теплоізоляційну оболонку будинку), ще і тепловтрати за рахунок інфільтрації та вентиляції. Згідно з цим стандартом порядок розрахунку такий.

Загальні тепловтрати будинку Q_k , кВт·год, визначаються за формулою (1):

$$Q_k = \aleph_1 \cdot K_{\text{бод}} \cdot D_d \cdot F_{\Sigma}, \quad (1)$$

де $\aleph_1 = 0,024$ – розмірний коефіцієнт; D_d – кількість градусо-днів опалювального періоду, що нормативно визначаються залежно від температурної зони експлуатації; F_{Σ} – загальна площа внутрішньої поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій, м²; $K_{\text{бод}}$ – загальний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку, Вт/(м²·К).

Загальний коефіцієнт теплопередачі є сумою приведеного коефіцієнта теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку та умовного коефіцієнта теплопередачі, що враховує тепловтрати за рахунок інфільтрації та вентиляції.

Своєю чергою, приведений коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку залежить від орієнтації огорожень за сторонами світу, площі відповідних конструкцій, їх приведених опорів теплопередачі та загальної площі поверхонь будівлі.

У цьому стандарті також передбачене визначення опору теплопередачі для нетипових огорожувальних конструкцій, але до їх переліку входять лише теплі горища, техпідпілля та засклені лоджії і балкони, а порядок визначення величини опору теплопередачі зведений до корегування нормативних або мінімально допустимих значень для відповідної поверхні. Такий порядок не підходить для поверхонь із невідомими властивостями або дефектами. Тобто виникає проблема визначення втрат теплоти для конструкцій, про властивості яких немає інформації.

Втрати теплоти через огорожувальні конструкції приміщень будівлі визначаються згідно з додатком 9 СНіП 2.04.05-91 "Отопление, вентиляция и кондиционирование".

Порядок, передбачений у цих нормах та правилах, під час розрахунків спирається на значення опору теплопередачі, що нормативно визначений згідно з ДБН В.2.6-31. Основною формулою для розрахунку вважається така:

$$Q = A(T_p - T_{ext})(1 + \sum b)^n / R, \quad (2)$$

де A – розрахункова площа огорожувальних конструкцій, m^2 ; R – опір теплопередачі огорожувальної конструкції, $m^2 \cdot K / Wt$ (приведений, згідно зі СНіП 23-02-2003, та окремо для підлог на ґрунті); T_p – розрахункова температура повітря, K ; T_{ext} – розрахункова температура зовнішнього повітря для холодного періоду року для розрахунку втрат теплоти через зовнішні огороження або температура повітря холоднішого приміщення – для розрахунку втрат теплоти через внутрішні огороження, K ; b – додаткові втрати теплоти у частках від основних втрат (згідно з наступним пунктом додатка); n – коефіцієнт, що визначається залежно від положення зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції відносно зовнішнього повітря (згідно зі СНіП 23-02-2003).

Зазначено, що втрати теплоти через огорожувальні конструкції виробничих приміщень зі значними надлишками теплоти доцільно розраховувати із врахуванням променевого теплообміну між джерелом теплоти та конструкцією, тобто ще більше розширити розрахунки.

Ці методики оптимально задовольняють умови складного теплообміну, адже враховують з використанням приведеного та умовного коефіцієнтів теплопередачі всі три види передавання теплоти, а саме: кондукцію (через теплопровідність матеріалу), конвекцію (через теплопередачу) та випромінювання (через тепловіддачу). Отже, за умови наявності всіх невідомих у формулах такі алгоритми дають можливість визначити базове значення тепловтрат через огорожувальні конструкції для конкретного приміщення та будівлі загалом.

Зрозуміло, що такі розрахунки можна запрограмувати у вигляді електронних таблиць Excel чи навіть програмного продукту, наприклад, калькулятора.

Негативним моментом використання алгоритмів, запропонованих у цих нормативних документах, є наближеність розрахунків (наприклад, внаслідок неоднорідності поверхні огорожувальної конструкції) та посилання на табличні значення більшості величин, які можуть істотно відрізнятися від реальних у результаті експлуатації будинку, впливу кліматичних умов, виконання ремонтних робіт тощо. Окрім того, громіздкість розрахунків та потреба в одночасній доступності великої кількості нормативних документів збільшують витрати часу на їх проведення, відповідно і собівартість такої роботи, а також спричиняють зростання суб'єктивної складової похибки проведених розрахунків.

Тому пропонуємо розширити можливості нормативних методик методикою розрахунку втрат теплоти будівлі за результатами тепловізного дослідження.

Із формул нормативних документів стає зрозумілим, що величина теплового потоку, що проходить через матеріал конструкції, пропорційна до різниці температур і обернено пропорційна до товщини матеріалу. Різні матеріали за однакової товщини і однакових різниць температур можуть пропускати різну кількість теплоти. Ця відмінність вказує на коефіцієнт теплопровідності цього матеріалу, а відповідно і значення опору теплопередачі. А приведений опір теплопередачі враховує ще й умови теплообміну з навколишнім середовищем у межах випромінювання через коефіцієнт тепловіддачі.

Відповідно тепловий потік через багатопарову огорожувальну конструкцію прямо пропорційний до

різниці температур на межах конструкції та обернено пропорційний до суми приведених термічних опорів цих шарів.

Згідно з [8] одновимірне температурне поле конструкції можна визначити достатньо просто. Його теплозахисні властивості визначаються приведеним опором теплопередачі конструкції R_{np} , що дорівнює сумі опорів теплопровідності окремих матеріальних шарів $\sum R_i$ та променевого теплообміну на внутрішній R_e та зовнішній R_z поверхнях:

$$R_{np} = R_e + \sum R_i + R_z. \quad (3)$$

Розподіл температури в огорожувальній конструкції визначається так:

$$T_x = T_e - \frac{R_{e-x}}{R_{np}} (T_e - T_z), \quad (4)$$

де T_x – температура у довільному розрізі конструкції (враховуючи поверхневий шар), К; R_{e-x} – приведений опір теплопередачі від внутрішньої поверхні до місця розрізу (або приведений опір теплопередачі від внутрішньої поверхні до дефектної ділянки, властивості якої до появи відхилення прирівнювалися до властивостей базової ділянки), $m^2 \cdot K/Wt$; T_z та T_e – температура зовнішнього та внутрішнього повітря біля досліджуваних поверхонь, К.

Звідси випливає, що, знаючи опір базової конструкції, маємо змогу за зміною температур розрахувати величину приведенного опору теплопередачі дефектної ділянки та визначити значення її теплового потоку.

Але не варто забувати, що значення температури поверхні базової чи дефектної ділянок потрібно брати усереднене (відповідно усередненим буде і значення опору теплопередачі), тобто:

$$T_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (5)$$

де T_i – температура однорідної частини ділянки, К; n – кількість однорідних частин ділянки.

У разі відхилення більше як на 1 К доцільно розділити такі ділянки на дрібніші з одноріднішим розподілом температури.

Оскільки для базової ділянки:

$$q_{\bar{o}}(T) = \frac{T_e - T_z}{R_{np}^{\bar{o}}}, \quad (6)$$

де $q_{\bar{o}}(T)$ – густина теплового потоку крізь одиницю площі базової ділянки, Wt/m^2 , то відповідно для

дефектної ділянки з відомою температурою поверхні густина теплового потоку для одиничної ділянки становитиме:

$$q_{\bar{o}}(T) = \frac{(T_e - T_z)^2}{(T_e - T_x) R_{np}^{\bar{o}}}. \quad (7)$$

Тобто, скориставшись результатами тепловізійного дослідження, а саме розподілом температури по поверхні, температурами внутрішнього та зовнішнього повітря, документацією про теплотехнічні властивості конструкції та значеннями зі стандартів, можемо визначити розмір приведенного опору в конкретній точці дефектної ділянки, а отже, і розмір конкретних втрат теплоти за одиницю часу.

Відповідно:

$$Q_{\bar{o}}(S, T) = q_{\bar{o}}(T) \cdot S_{\bar{o}}, \quad (8)$$

де $Q_{\bar{o}}(S, T)$ – тепловий потік з дефектної ділянки, Вт; $S_{\bar{o}}$ – площа дефектної ділянки, визначена за допомогою підрахунку пікселів на термограмі та масштабування їх розмірів до натурних, m^2 .

Якщо нас цікавить не величина втрат теплоти, а її приріст порівняно із базовою ділянкою, що практичніше у разі розрахунку грошових втрат, то доцільніше застосовувати інший алгоритм.

Спочатку скористаємося значенням відносного опору теплопередачі, запропонованим у ГОСТ Р 54852-2011 “Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций”:

$$r = 1 + \frac{(T_z^n - T_z^{\bar{o}})}{T_z - T_z^n - (T_z^n - T_z^{\bar{o}})}, \quad (9)$$

де T_z^n – температура зовнішньої поверхні досліджуваної ділянки, К; $T_z^{\bar{o}}$ – температура зовнішньої поверхні базової ділянки, К.

Звідси зміна густини теплового потоку:

$$Dq(T) = \frac{(T_e - T_z)(r - 1)}{R_{np}^{\bar{o}}}. \quad (10)$$

Відповідно додаткові втрати теплоти у зв'язку зі зміною теплотехнічних властивостей досліджуваної конструкції становлять:

$$DQ(S, T) = Dq(T) \cdot S_{\bar{o}}. \quad (11)$$

Отже, у будь-якому випадку для визначення втрат теплоти ми повинні мати відомості про будову огорожувальної конструкції (базової ділянки) для визначення приведенного опору теплопередачі конструкції.

Ці два алгоритми також ефективні у разі моделювання потенційних теплотехнічних характеристик будівлі за результатами виконання рекомендацій щодо термомодернізації будівлі, коли приведений опір теплопередачі будівлі наперед заданий.

Зрозуміло, що на практиці в реальних умовах операторам доводиться працювати із будівлями тривалого строку експлуатації, для яких внаслідок різних факторів змінюються теплотехнічні характеристики або даних про ці характеристики немає. У такому разі під час розрахунку втрат теплоти ми повинні обмежитися лише даними термограми та результатами обліку умов проведення дослідження для визначення приведених опорів базової та дефектної ділянок.

Проаналізувавши рівняння формули (4), доходимо висновку, що цього можна досягти лише побудовою системи із двох рівнянь з двома невідомими R_{e-x} та R_{np} . такого вигляду:

$$\begin{cases} T_x^1 = T_e^1 - \frac{R_{e-x}}{R_{np}^{\delta}} (T_e^1 - T_z^1) \\ T_x^2 = T_e^2 - \frac{R_{e-x}}{R_{np}^{\delta}} (T_e^2 - T_z^2) \end{cases} \quad (12)$$

Для отримання різних значень величин температури у системі можливі три варіанти:

– проведення тепловізійного дослідження у різні часові проміжки для стаціонарних режимів теплопередачі із різними значеннями температур;

– у межах одного тепловізійного дослідження наявність на поверхні дефектної ділянки місць із різними значеннями поверхневої та приповерхневих температур (тобто зовнішньої та/або внутрішньої температури повітря, наприклад, внаслідок близького розміщення до віконних чи дверних прорізів, розміщення на різних за орієнтацією щодо сторін світу стінах тощо) із поділом її на частини для виконання розрахунків втрат теплоти для кожної із них в заданих умовах;

– у межах одного тепловізійного дослідження наявність декількох дефектних ділянок із різними значеннями температур, але прийнятих як однакові за теплотехнічними характеристиками (із подальшим окремим розрахунком втрат теплоти для кожної із ділянок в заданих умовах).

Вибір варіанта залежить від інформації на термограмах будівлі та можливості проведення

повторного тепловізійного дослідження, адже кожен із варіантів вносить свою частку непевності у результуючі величини приведених опорів теплопередачі.

Знаючи величини приведених опорів теплопередачі, за формулою (6) можемо визначити густину теплового потоку як для базової, так і для дефектної ділянок, а їх теплові потоки згідно з формулою (8). Розмір додаткових втрат теплоти внаслідок наявності дефектної ділянки визначається за формулою:

$$DQ(S, T) = \frac{(T_e - T_z) (R_{np}^{\delta} - R_{e-x})}{R_{np}^{\delta} \cdot R_{e-x}} \cdot S_{\delta} \quad (13)$$

Проте для приблизного визначення зростання втрат теплоти внаслідок наявності дефектної ділянки можна обмежитися лише інформацією про випромінювальну складову теплового потоку.

Відомо, що за нормальної теплоізоляції до 70 % втрат теплоти відбуваються через теплове випромінювання, а за температур 4–100 °C становлять 50–80 % загального теплового потоку [9]. Цієї інформації достатньо для приблизного кількісного оцінювання тепловтрат.

Оскільки наведені вище алгоритми розрахунків потребували фактично точкових значень температури досліджуваних поверхонь та знання температури зовнішнього та внутрішнього повітря, то вони не могли повною мірою використати перевагу застосування тепловізора, який дає змогу із високою точністю вимірювати саме різницю температур (градієнт температур) – понад 0,01 К.

Наступний алгоритм визначення втрат теплоти за випромінюванням дає можливість обмежитися мінімальною кількістю вихідних величин, значення яких забезпечується лише тепловізором та технічною документацією на нього.

Оскільки потік теплоти $Q(S, T)$ враховуватиме лише втрату теплоти за випромінюванням, тоді:

$$Q(S, T) = F(I, S, T), \quad (14)$$

де $F(I, S, T)$ – потік випромінювання, Вт.

При цьому згідно з [10]:

$$F(I, S, T) = M(I, T) \cdot S, \quad (15)$$

де S – площа випромінюваної поверхні, м²; $M(I, T)$ – спектральна густина випромінювання, Вт/м²:

$$M(I, T) = \int_{l_1}^{l_2} c_1 \cdot I^{-5} \cdot (e^{c_2/lT} - 1)^{-1} dl, \quad (16)$$

де c_1 та c_2 – сталі, а $M(I, T)$, що надходить на оптичну систему тепловізора, корегується на значення

коефіцієнта випромінення досліджуваної поверхні, коефіцієнта пропускання проміжного середовища та значення фонового випромінення сторонніх об'єктів; $I_1 \div I_2$ – робоча спектральна смуга оптично-приймальної системи тепловізора.

Оскільки функція перетворення тепловізора згідно з ASTM E-1213-92 “Standard Test Method for minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems” та [11]:

$$U_i(T) = k_1 \cdot M_i(I, T) + k_2 = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_i + B}\right) - 1} \quad (17)$$

де $U_i(T)$ – вихідний сигнал окремого приймача матриці тепловізора; k_1 та k_2 – коефіцієнти перетворення тепловізора; T_i – значення температури у досліджуваній точці (у нашому випадку тотожне з $T_{сеп.}$), К; C , A , B – коефіцієнти, що визначаються за результатами калібрування відповідно до формули Сакума–Хатторі та вказані в технічній документації приладу.

Відповідно:

$$\Delta Q(S, T) = Q_{\delta}(S, T_2) - Q_{\delta}(S, T_1) = (M_{\delta}(\lambda, T_2) - M_{\delta}(\lambda, T_1)) \cdot S = \frac{U_{\delta}(T_2) - U_{\delta}(T_1)}{k_1} \cdot S, \quad (18)$$

де вихідним сигналам дефектної $U_{\delta}(T_2)$ та базової $U_{\delta}(T_1)$ ділянок відповідають конкретні значення їх температури T_2 та T_1 .

Зрозуміло, що $DQ(S, T)$ за випроміненням менше за $DQ(S, T)$ сумарного теплового потоку.

Відповідно грошовий еквівалент додаткових втрат тепла визначаємо так:

$$W = \frac{DQ(S, T)}{1000} \cdot t \cdot P, \quad (19)$$

де W – сума грошей, оплачена за надлишковий тепловий потік, грн; t – час, для якого проводять розрахунок втрат тепла, год; P – вартість 1кВт·год енергії, грн/кВт·год (тариф).

Висновки:

1. На основі проведеного огляду останніх досліджень та публікацій доходимо висновку, що тепловізійне дослідження використовується переважно для візуалізації місць наявності дефектних ділянок, а відповідно і додаткового витоку тепла. Алгоритм розрахунку таких тепловтрат за результатами тепловізійного дослідження відсутній.

2. Розрахунок втрат тепла будинку та окремих приміщень згідно з чинними нормативними документами проводять у ході розрахунку питомих тепловитрат на опалення будинку, що спирається на нормативні значення показників теплопередачі. Ці величини можуть істотно відрізнятися від реальних у результаті експлуатації будинку, впливу кліматичних умов, проведення ремонтних робіт тощо. Окрім того, немає значень показників теплопередачі дефектних ділянок.

3. У роботі запропоновано методику визначення втрат тепла будинку за результатами тепловізійного дослідження, що містить декілька алгоритмів їх розрахунку залежно від доступності необхідних вихідних величин та вимог щодо результатів виконаних розрахунків (точність, врахування складових теплового потоку, визначення приросту чи абсолютного значення тепловтрат тощо).

4. Ця методика дає змогу визначити приріст втрат тепла в грошовому еквіваленті та оцінити окупність робіт з усунення джерел виникнення таких тепловтрат.

1. Vavilov V. P. A Pessimistic View of the Energy Auditing of Building Structures with the Use of Infrared Thermography / V. P. Vavilov // *Russ. J. of Nondestructive Testing*. – 2010. – Vol. 46. – No. 12. – P. 906–910.
2. Vatin N. I. Reconstruction of Administrative Buildings of the 70's: The Possibility of Energy Modernization. *Journal of Applied Engineering Science* / N. I. Vatin, D. V. Nemova, V. Murgul, V. Pukhkal, A. Golik, E. Chizhov // *Istrazivanja i Projektovanja za Privredu*. – 2014. – No. 1. – P. 37–44.
3. Vatin N. I. The Energy-Efficient Heat Insulation Thickness for Systems of Hinged Ventilated Facades / N. I. Vatin, A. S. Gorshkov, D. V. Nemova, A. A. Staritsyna, D. S. Tarasova // *Advanced Materials Research*. – 2014. – No. 941–944. – P. 905–920.
4. Alihodzic R. Renewable Energy Sources Used to Supply Pre-School Facilities with Energy in Different Weather Conditions / R. Alihodzic, V. Murgul, N. Vatin, E. Aronova, V. Nikolić, M. Tanić, D. Stanković // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 624. – P. 604–612.
5. Taylor T. Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building façades / T. Taylor, J. Counsell, S. Gill // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 76. – P. 130–142.
6. Корниенко С. В. Комплексная оценка энергоэффективности и тепловой защиты зданий / С. В. Корниенко // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2014. – № 11 (26). – С. 33–48.

7. Богословский В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.
8. Гончаров Э. И. Строительная теплофизика: учебно-методический комплекс [Электронный ресурс] / сост. Э. И. Гончаров и Е. С. Добросольцева; под общ. ред. Э. И. Гончарова. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – Режим доступа: http://elib.psu.by:8080/bitstream/123456789/11869/2/2_-_teploperedacha_cherez_ograzhdenija.pdf.
9. Олійниченко І. Р. Економія при опаленні приміщення за рахунок використання матеріалів, що відбивають теплове випромінювання [Електронний ресурс] / І. Р. Олійниченко // Вісник КНУТД. – 2013. – № 6. – С. 146–149. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vkntud_2013_6_22.pdf. – Назва з екрана.
10. Линеверг Ф. Измерение температур в технике : справочник / Ф. Линеверг ; под ред. Л. А. Чарихов; [пер. Т. И. Киселева, В. А. Федорович]. — М. : Металлургия, 1980. – 543 с.
11. Więcek B. Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania / B. Więcek, G. De Mey. – F.P. PAK. Krzysztof Przybyła, 2011. – 372 s.

УДК 621

ТОМОГРАФІЧНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАНЬ ОПОРУ ЛІНІЙНИХ РЕЗИСТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Дорожовець Михайло, Бурдега Мар'яна, 2015

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Проаналізовано можливості реконструкції температурного поля на поверхні стінки томографічним методом за результатами вимірювання опорів лінійних резистивних перетворювачів температури.

Опрацьовано модель апроксимації просторового розподілу питомого опору залежно від температури алгебраїчними двовимірними многочленами порядку 4 і 5. Сформовані матриці коефіцієнтів лінійних систем рівнянь, що описують шуканий просторовий розподіл питомого опору чутливих елементів від результатів вимірювань опорів чутливих елементів вздовж лінії їх розміщення на об'єкті дослідження. Моделюванням досліджено якість відтворення просторового розподілу температури томографічним методом з використанням мідних чутливих елементів. Встановлено, що за кількості вимірювань 54 та 96, а також за порядків многочлена 4 і 5 під час відтворення просторового розподілу температури у вигляді косинусної та гауссівської двовимірних моделей середньоквадратична зведена похибка становить від 0.65 % до 1.55 %, а максимальна зведена похибка відтворення – 1.25–9.35 %.

Ключові слова: лінійні резистивні перетворювачі, розподіл температури, томографічний метод.

Проанализировано возможности реконструкции температурного поля на поверхности стенки томографическим методом по результатам измерения сопротивлений линейных резистивных преобразователей температуры. Обработано модель аппроксимации пространственного распределения удельного сопротивления в зависимости от температуры алгебраическими двумерными многочленами порядка 4 и 5. Сформированы матрицы коэффициентов линейных систем уравнений, описывающих искомое пространственное распределение удельного сопротивления чувствительных элементов вдоль линии их размещения на объекте исследования. Путем моделирования исследовано качество воспроизведения пространственного распределения температуры томографическим методом с использованием медных чувствительных элементов. Установлено, что при количестве измерений чувствительных элементов 54 и 96, а также при порядке многочлена 4 и 5 во время воспроизведения пространственного распределения температуры в виде косинусной и гауссовской моделей среднеквадратичная приведенная погрешность составляет от 0.65 % до 1.55 %, а максимальная приведенная погрешность воспроизведения от 1.25 % до 9.35 %.

Ключевые слова: линейные резистивные преобразователи, распределение температуры, томографический метод.