

*к.т.н. Симонов С. І.,
к.т.н. Симонова І. М.,
Сова І. О.*

(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті наведено результати визначення похибки тепловізійних вимірювань зовнішніх огорожень на прикладі експериментальних досліджень житлового будинку серії 1-480А.

Ключові слова: *теповізійне вимірювання, опір теплопередачі, тепловізійна зйомка, коефіцієнт випромінювання, градування тепловізора, реперні ділянки.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Останнім часом популярність тепловізійних досліджень зростає, як для нового будівництва, так і для визначення тепловтрат огорожувальних конструкцій вже побудованих житлових будинків.

Для вирішення проблеми нераціональних витрат тепла необхідне проведення ретельних обстежень будівель на предмет виконання норм з теплового захисту будівель.

Одним з необхідних етапів робіт на цьому шляху є проведення теплового контролю та визначення фактичних теплотехнічних характеристик будівельних конструкцій в умовах їх експлуатації.

Способи його визначення засновані на лабораторних випробуваннях зразків матеріалів, або фрагментів будівельних конструкцій в кліматичних камерах, або дослідження проводяться безпосередньо в натурних умовах експлуатації будівлі.

Однак проведення експериментальних досліджень і виявлення втрат тепла це половина шляху. Для виявлення всієї картини та отримання результатів експерименту, необхідно правильно розрахувати та отримати ці результати з необхідною точністю. У багатьох джерелах, зокрема [1], тепловізійні дослідження називають неточними, з великою похибкою вимірювання і використовують їх тільки для виявлення втрат тепла, отримують тільки картинки

зображень з тепловтратами, без температурних полів і без обробки експериментальних даних.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. В якості державного стандарту, що встановлює методи визначення опору теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій, в натурних (експлуатаційних) зимових умовах використовується ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций».

Методи визначення опору теплопередачі в натурних умовах експлуатації будівель засновані на створенні в огорожувальній конструкції умов стаціонарного теплообміну та вимірюванні температури внутрішнього і зовнішнього повітря, температури поверхонь огорожувальної конструкції, а також щільності теплового потоку, що проходить скрізь неї.

Для визначення фактичного значення термічного опору огорожувальних конструкцій згідно з нормативними документами ці два методи доцільно використовувати комплексно, тому що натурні випробування дадуть повну картину розподілу температури в товщі огороження, а тепловізійний контроль дозволить обстежити усю будівлю, а не окремі її елементи, виявити області аномальних температур.

Найбільш цікава методика визначення приведенного опору теплопередачі зовнішнього огороження безконтактним способом наведена на рисунку 1, [2].

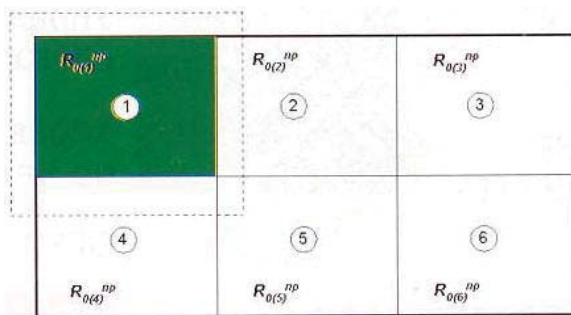


Рисунок 1 - Послідовність і обробка результатів термографування автоматизованим безконтактним способом [2]

1. Обстежувані огорожувальні конструкції розбиваються на ділянки (наприклад, на рис. 1 їх шість), зручні для термографування, з тим, щоб при подальшій обробці можна було відтворити цілісну картину зовнішнього огороження.

2. Послідовна тепловізійна зйомка кожної ділянки дає зображення, показане на рис. 1 пунктирною лінією з N -ою кількістю точок.

3. Виділивши на термограмі ділянку з відповідною кількістю точок (наприклад, на рис. 1, ділянка зображена зеленим кольором), вводяться вихідні дані, необхідні для обчислення приведенного опору теплопередачі $R_{0(1)}^{np}$: температури внутрішнього і зовнішнього повітря та коефіцієнт теплосприйняття у внутрішній поверхні.

4. ЕОМ для кожної ділянки обчислює приведенний опір теплопередачі:

$$R_{0(1)}^{np}, R_{0(2)}^{np}, \dots, R_{0(6)}^{np}.$$

5. Приведений опір теплопередачі всього зовнішнього огороження визначається таким чином:

$$\left[R_{0(1)}^{np} + R_{0(2)}^{np} + \dots + R_{0(N)}^{np} \right] / n, \quad (1)$$

де n – кількість ділянок, зручних для термографування.

В наш час на пострадянському просторі зовнішні огорожувальні конструкції більшості будівель і споруд не відповідають сучасним нормативним вимогам до опору теплопередачі. Тому дуже важливим є проведення масового та оперативного обстеження фактичного теплотехнічного стану будівель або, інакше кажучи, фактичного розподілу температурних полів на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель і споруд. Це можливо тільки проведенням тепловізійного обстеження будівлі.

Постановка завдань. Метою досліджень є виявлення особливостей проведення тепловізійних досліджень та визначення похибки визначення опорів теплопередачі зовнішніх огорожень.

Представлення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Тепловізійні дослідження проводимо на прикладі житлового будинку серії 1-480 А в м. Алчевську, рисунок 2.

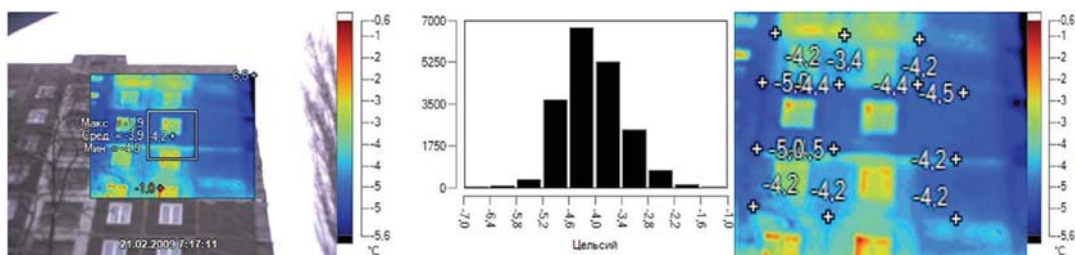


Рисунок 2 - Максимальна, середня і мінімальна температури виділеної ділянки будівлі з гистограмою та температурним полем досліджуваного фрагмента будівлі

Тепловізійне обстеження зовнішніх огорожувальних конструкцій, проводиться відповідно до ГОСТ 26629-85.

Теплотехнічні параметри базових ділянок для обстеження, визначаються відповідно до ГОСТ 26253-84 і ГОСТ 26254-84.

Тепловізійне вимірювання зовнішніх поверхонь огорожувальних конструкцій проводять в зимовий або перехідні періоди року при температурному перепаді між внутрішнім та зовнішнім повітрям (15°C), що перевершує мінімальне допустиме значення Δt_{\min} , $^{\circ}\text{C}$, визначуване відповідно до ГОСТ 26629-85 згідно формули:

$$\Delta t_{\min} = \frac{\Theta \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot r}{1 - r}, \quad (2)$$

де Θ – межа температурної чутливості тепловізора ($^{\circ}\text{C}$), який працює в заданому діапазоні температур з чутливістю $0,05 \dots 0,1^{\circ}\text{C}$ (згідно паспорту);

R_0 – значення опору теплопередачі, що приймається за проектною технічною документацією на будівлю, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,4}{0,44} + \frac{1}{23} = 1,068 \frac{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}};$$

де α – розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі, що приймається рівним:

– для внутрішньої поверхні стін за нормативно-технічною документацією на будівлю 1, 3, 6 м/с (що приймаються за СНІП 23-01-99);

– для регіону будівництва, відповідно – 11, 20, 30 $\text{Вт}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$;

r – відносний опір теплопередачі вибраної ділянки огорожувальної конструкції, що приймається рівним відношенню прогнозованого значення до проектного значення опору теплопередачі, але не більше 0,85.

$$\Delta t_{\min} = \frac{0,05 \cdot 1,068 \cdot 20}{1 - 0,84} = 6,7^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{\min} = \frac{0,1 \cdot 1,068 \cdot 20}{1 - 0,84} = 13,35^{\circ}\text{C}.$$

За відсутності проектно-технічної документації на будівлю тепловізійна зйомка повинна проводитися при перепаді темпе-

ратур між внутрішнім і зовнішнім повітрям не менше 15°C . При цьому температура зовнішнього повітря повинна бути нижче 0°C .

Важливе значення має налаштування коефіцієнту випромінювання і температури фону. Встановлення правильних значень коефіцієнта випромінювання і температури фону у край важлива для точних вимірювань температури. Значення коефіцієнта випромінювання на даній камері і збережених зображеннях регулюються в діапазоні від 0,01 до 1,00 з величиною кроку 0,01. Дане значення, разом з температурою фону і випромінюванням об'єкту зйомки, вимірюваними камерою, використовується для розрахунку температур об'єкту зйомки. Значення коефіцієнта випромінювання визначаємо за допомогою таблиці в інструкції до використання тепловізора, в якій перераховані значення коефіцієнта випромінювання деяких поширених матеріалів, як посібник при встановленні коректних значень коефіцієнта випромінювання.

Відстань місця установки тепловізора L в метрах від поверхні об'єкта визначають за формулою:

$$L \leq \frac{\Delta H \cdot N_c}{10\varphi}, \quad (3)$$

де φ – кутовий вертикальний розмір поля огляду тепловізора, рад; 30 градусів = $0,524$;

ΔN – лінійний розмір ділянки захисної конструкції з порушеними теплозахисними властивостями, яка підлягає виявленню, що приймається при контролі внутрішньої поверхні від 0,01 до 0,2 м; при контролі зовнішньої поверхні – від 0,2 до 1 м;

N_c – число рядків розгортки в кадрі тепловізора; число елементів розкладання за рядком не менше 100 (в нашому випадку 480).

$$L \leq \frac{1 \cdot N_c}{10 \cdot 0,524} = 1 \cdot 480 / 10 \cdot 0,524 = 91,6 \text{ м.}$$

Для енергетичного обстеження будівель кут візування обстежуваної поверхні приймається до 45° від нормалі до неї, поле зору об'єктива – не більше 20° , дистанція до обстежуваної поверхні – до 50 м.

Градування тепловізора проводять пе-

ред виміром температурних полів кожного фрагмента поверхні об'єкта з постійним коефіцієнтом випромінювання, а також при зміні об'єкта або зміні відстані.

Градування тепловізора проводиться для встановлення залежності між значенням його вихідного сигналу і температурою обстежуваної поверхні захисної конструкції.

Для градування тепловізора на обстежуваній поверхні конструкції вибирають дві, так звані реперні ділянки, доступних для вимірювання на них температур τ_1 і τ_2 в °С контактним методом.

Реперні ділянки на поверхні досліджуваного фрагменту вибирають за його тепловим зображенням на екрані тепловізора як ізотермічні ділянки, яким відповідають мінімальний і максимальний вихідні сигнали тепловізора. Лінійні розміри реперних ділянок повинні становити не менше 10% лінійних розмірів досліджуваного фрагмента. Контури реперних ділянок на фрагменті відзначають крейдою за вказівкою оператора, який спостерігає за екраном. В якості реперних допускається вибирати ділянки фрагмента, яким відповідають значення вихідних сигналів, що відрізняються від екстремальних значень не більш, ніж на 20%.

Значення вихідних сигналів тепловізора для реперних ділянок встановлюють за шкалою ізотерм тепловізора відповідно до інструкції з його експлуатації.

Для визначення похибки вимірювання використовувалися таблиці 3.1 і 3.2 [2]. Визначалася похибка методом «двох реперів».

Коефіцієнти градувальної характеристики обчислюють за формулами:

$$A = \frac{\tau_2 - \tau_1}{L_2 - L_1}, \quad (4)$$

$$B = \tau_1 - AL_1. \quad (5)$$

Значення випадкової абсолютної похибки визначення температури $\delta\tau_{\epsilon(\delta)}$ в °С ділянки захисної конструкції розраховують за формулою:

$$\begin{aligned} \delta\tau &= \sqrt{(\delta\tau_p)^2 + 2(A\delta L)^2} = \\ &= \sqrt{(0,1)^2 + 2(1,5 \cdot 0,02)^2} = \end{aligned}$$

$$= \sqrt{0,01 + 0,0018} = 0,109,$$

де $\delta\tau_p$ – абсолютна похибка вимірювання температур реперних ділянок, яка приймається за половину ціни ділення шкали вимірювального приладу, °С;

δL – похибка вимірювання вихідного сигналу тепловізора, що береться за половину ціни поділки шкали ізотерм тепловізора.

Значення випадкової відносної похибки визначення відносного опору теплопередачі δr розраховують за формулою:

$$\delta r = \frac{1}{t_\epsilon - \tau_\epsilon} \sqrt{(\delta t_\epsilon)^2 + (\delta\tau_\epsilon)^2 + (\delta\tau_\delta)^2}, \quad (6)$$

де t_ϵ , τ_ϵ – температури відповідно повітря і поверхні, °С;

δt_ϵ , $\delta\tau_\delta$, $\delta\tau_\epsilon$ – значення абсолютних випадкових значень похибки визначення температури відповідно повітря, базової ділянки, контрольованої ділянки, °С.

Для визначення похибки при кожному температурному режимі випромінювача (у нижній, середній і верхній точках діапазону тепловізора) виконують не менше 10 вимірів.

За похибку тепловізора беруть межі сумарної похибки Δ , вираженої в градусах Цельсія, оцінюваної для кожного температурного режиму випромінювача.

За отриманими результатами вимірювань для кожного температурного режиму розраховують середнє арифметичне значення температури, \bar{T} , °С, за формулою:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (7)$$

де T_i – i -й результат вимірювань температури, °С;

n – число вимірювань.

Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного результатів вимірювань S , °С, обчислюють за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}}. \quad (8)$$

Довірчі межі випадкової похибки ε , °C, оцінюють за формулою:

$$\varepsilon = t \cdot S, \quad (9)$$

де t – коефіцієнт Стюдента (при $n = 10$ і довірчої ймовірності 0,95 $t = 2,262$).

Різниця отриманого середнього арифметичного значення температури \bar{T} і значення температури еталонного (зразкового) протяжного випромінювача, $\bar{T} - T_{э(о)}$, °C, обчислюють за формулою:

$$\Delta T = \bar{T} - T_{э(о)}. \quad (10)$$

Межу не виключення систематичної похибки тепловізора Θ , °C, оцінюють за формулою:

$$\Theta = k \sqrt{\Delta T^2 + \Delta_{э(о)}^2}, \quad (11)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від обраної довірчої ймовірності; при довірчій ймовірності 0,95 $k = 1,1$;

$\Delta_{э(о)}$ – межа похибки еталонного (зразкового) випромінювача.

Межу сумарної похибки тепловізора Δ для кожного температурного режиму обчислюють за формулою:

$$\Delta = k \sqrt{S^2 + 1/3(\Delta T^2 + \Delta_{э(о)}^2)}, \quad (12)$$

де k – коефіцієнт, відносно величину, обчислюють за формулою:

$$k = \frac{\varepsilon + \Theta}{S + \sqrt{1/3(\Delta T^2 + \Delta_{э(о)}^2)}}. \quad (13)$$

Межа сумарної похибки Δ , що визначена при кожному температурному режимі, не повинна перевищувати межі допустимої похибки, зазначеної в ТУ на тепловізор, що становить для даного виду тепловізора 2°C.

Розрахунок випадкової відносної похибки проводився для кожного кадру. Для одного з кадрів наведемо приклад розрахунку.

Значення випадкової відносної похибки визначення відносного опору теплопередачі δr розраховують за формулою (6):

$$\delta r = \frac{1}{21-17,9} \sqrt{(0,102)^2 + (0,1602)^2 + (0,109)^2} =$$

$$= \frac{\sqrt{0,01 + 0,026 + 0,012}}{3,1} = 0,07.$$

Значення відносної похибки не перевищили 15%. Результати вимірювань визнають достовірними, якщо відносна похибка δr не перевищує 15%.

Критичне значення відносного опору теплопередачі $r_{кр}$ захисної конструкції по лінії ізотерми визначають за формулою:

$$r_{кр} = \frac{R_0^{mp}}{R_0^{\delta}}, \quad (14)$$

де R_0^{mp} – необхідний опір теплопередачі, який визначається за нормативно-технічною документацією, м²·°C/Вт;

R_0^{δ} – опір теплопередачі базової ділянки захисної конструкції визначають за результатами натурних вимірювань відповідно до ГОСТ 26254-84.

Розрахунки необхідного опору теплопередачі зовнішньої стіни наведеної серії проводимо згідно діючого на той момент СНіП II-A.6-62, який потім змінили на СНіП II-3-79* «Строительная теплотехника». В 1995 році в цей СНіП вносилися зміни. Пізніше в Україні ці нормативні документи були скасовані та замінені на ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель».

Необхідний опір теплопередачі огорожувальних конструкцій (за винятком світлопрозорих), що відповідають санітарно-гігієнічним і комфортним умовам, визначають за формулою:

$$R_0^{mp} = \frac{n \cdot (t_e - t_n)}{\Delta t_n \cdot \alpha_s} \quad (15)$$

$$R_0^{mp} = \frac{1 \cdot [18 - (-25)]}{6,0 \cdot 8,7} = 0,843 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}.$$

При неможливості його визначення значення опору теплопередачі обчислюють згідно з нормативно-технічною документацією за даними проекту захисної конструкції. Приймаємо

$$R_0^{\delta} = 1,068 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт};$$

$$r_{кр} = \frac{R_0^{mp}}{R_0^{\delta}} = \frac{0,843}{1,068} = 0,789,$$

але не більше 0,85.

Висновки і перспективи подальшого розвитку. З вищесказаного можна зробити висновок, що точність тепловізійних випробувань відповідає вимогам ГОСТу. Звичайно ж тепловізійні дослідження мають цілий ряд особливостей: це величезна кількість кадрів та обробка великої кількості температурних точок. Дослідження необхідно проводити з урахуванням коефіцієнта випромінювання матеріалів і проводити обов'язкове градування тепловізора. Температура поверхонь будівельних конструкцій залежить від теплофізичних властивостей їх матеріалів, наявності теплопровідних включень, як конструктивно обумовлених, так і випадкових, таких, що є технологічними або конструктивними дефектами. Якщо користуватися традиційними методами, то для визначення теплофізичного стану огорожувальних конструкцій будівлі необхідно встановити декілька сотень або тисяч термодатчиків. Звісно, велика трудомісткість і висока вартість такої роботи затрудняє здійснення необхідного контролю теплофізичних властивостей під час приймання будівель в експлуатацію і, особливо, перед капітальним ремонтом або реконструкцією. Тепловізор дозволяє не лише одночасно зареєст-

рувати більше 65000 значень температур, усереднених на площі в декілька квадратних сантиметрів (див. гістограми до кожного кадру), але й отримати тепловий «портрет» огорожувальної конструкції будівлі, проаналізувати зображення на комп'ютері та прийняти експертний висновок за способом теплоізоляції будівлі, а після виконання робіт по утепленню – знов зняти тепловий «портрет» огорожувальної конструкції та перевірити якість виконаних робіт. Після комп'ютерної обробки зображення і роздрукування на кольоровому принтері теплові «портрети» можуть бути офіційними документами стану конструкції будівлі.

Звичайно, краще було б використовувати відразу ж два методи одночасно, особливо для нового будівництва, де необхідно визначити тепловий потік, що проходить через конструкції.

Проведені тепловізійні експериментальні дослідження дозволяють швидко, масово й оперативно, в режимі реального часу, не руйнуючи конструкцію стіни, визначити фактичні опори теплопередачі конструкції, виявити її дефекти, а також неякісну теплоізоляцію стін.

Бібліографічний список

1. Соколов Н.А. Метрологическое обеспечение теплосащиты зданий в условиях эксплуатации / Н.А. Соколов, Петров С.Г. // СтройПРОФИль. - 2008. - №5(67). - С.122-123.
2. Гурьянов Н.С. Способ оценки фактической величины приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждений / Н.С. Гурьянов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2002. - № 12(47). - С. 20 – 24.

Рекомендована до друку д.т.н., проф. Дроздом Г. Я.

Стаття надійшла в редакцію 18.10.13.

к.т.н. Симонов С. И., к.т.н. Симонова И. Н., Сова И. О. (ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

В статье приведены результаты определения погрешности тепловизионных измерений наружных ограждений на примере экспериментальных исследований жилого дома серии 1-480А.

Ключевые слова: тепловизионные измерения, сопротивление теплопередачи, тепловизионная съемка, коэффициент излучения, градуировка тепловизора, реперные участки.

Simonov S. I., Simonova I. N., Sova I. O. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

DETERMINATION OF MEASUREMENT ERROR OF THE CLADDINGS THERMAL IMAGING

The article presents the results of finding out the error of thermal imaging measurements of claddings on the example of experimental research of a series 1-480A house.

Keywords: thermal measurement, resistance to heat transmission, thermal imaging survey, radiating capacity, thermographic camera calibration, reference areas.