

Ф.Ф. Сизов, В.В. Забудський, О.Г. Голенков, С.Л. Кравченко, Б.П. Корнієнко

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ

ДИСТАНЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВТРАТ БУДІВЕЛЬ ТЕПЛОВІЗІЙНИМ МЕТОДОМ



Розглянуто можливості ефективного тепловізійного неруйнівного контролю будівель та споруд із застосуванням тепловізора, розробленого та виготовленого в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

К л ю ч о в і с л о в а: тепловізор, тепловізійний неруйнівний контроль, тепловтрати, теплобачення.

Стійка тенденція зростання цін на енергоносії стимулює розвиток енергозберігаючих технологій у будівництві та експлуатації споруд. Технологічні вимоги, що висуваються до сучасних споруд з метою забезпечення енергоефективності, направлені на пошук технічних рішень, які дали б можливість підвищити рівень теплового захисту будівель і зменшити витрати на їх обігрівання. Однак незалежно від того, наскільки сучасна та чи інша конструкція та як обране технічне рішення відповідає необхідному теплозахисту будівлі, споруда не буде енергоефективною, якщо якість виконаних будівельних робіт не задовольнятиме належних вимог. Для їх дотримання необхідно провести ряд додаткових робіт, головна мета яких полягає у проведенні перевірки реального стану всіх елементів і конструкції будівлі. Обов'язковий контроль підвищує відповідальність виконавців на всіх етапах будівництва і, відповідно, якість робіт.

Тепловізійні дослідження допомагають вирішити задачу контролю. У деяких регіонах Росії, наприклад, введено обов'язковий, закріплений

на законодавчому рівні, тепловізійний контроль нових та реконструйованих будівель [1, 2]. Цей метод наглядно показує наявність або відсутність прихованих конструктивних, технологічних, будівельних та експлуатаційних дефектів теплозахисту будівель.

Основою методу тепловізійного контролю є зйомка за допомогою спеціального обладнання — тепловізора. Тепловізор, або інфрачервона камера, — це пристрій для отримання зображень в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль. Саме у цьому діапазоні знаходиться максимум випромінювальної здатності тіл, що мають звичні для нас температури ($-20 \div +40$ °С). За допомогою тепловізора можна миттєво виміряти тепловий потік від десятків тисяч точок об'єкту, або, інакше кажучи, отримати його температурне поле (термограму). Термограми є основою для аналізу отриманої інформації щодо теплового стану об'єкта.

Суттєвою перевагою тепловізійного обстеження є: *а)* швидкість проведення; *б)* відсутність необхідності підготовчих робіт; *в)* дистанційність обстеження; *г)* можливість проведення тепловізійного дослідження усієї поверхні стін і даху з метою виявлення основних місць теплових втрат з наступною деталізацією.

Тепловізійне обстеження дає можливість визначити характеристики теплового поля об'єкта, оцінити й визначити числові характеристики його неоднорідності. На нерівномірність теплових властивостей об'єкта перш за все впливають теплопровідність матеріалу та його густина і вологість.

Під дією різниці зовнішньої та внутрішньої температур і вітру будівля втрачає тепло через стіни та дах взимку і нагрівається влітку під дією сонячного опромінення. Гравітаційні сили, дія вітру і вентиляція створюють перепади тиску, що призводять до перетікання повітря між сполученими будівлями і до його фільтрації (інфільтрації) через пори матеріалу і нещільності зовнішніх огорожень. Крім того, атмосферні осадки, вологовиділення у будівлі, різниця вологості внутрішнього та зовнішнього повітря призводять до вологообміну через огороження, під дією якого можливе зволоження матеріалів й погіршення захисних властивостей і довговічності зовнішніх стін та перекриттів. Надмірна фільтрація (інфільтрація) повітря й зволоження конструкції можуть збільшити у кілька разів тепловтрати будівель взимку, адже вологість сприяє підвищенню теплопровідності.

Області підвищеної температури стін та даху житлових та промислових будівель при їх натурній зовнішній тепловізійній зйомці відповідають зонам втрат тепла. В осінньо-зимовий період наявність таких зон призводить до зниження середньої температури всередині будівель і, як наслідок, до збільшення витрат енергоносіїв, необхідних для підтримки комфортної внутрішньої температури.

Теплові втрати в основному залежать від різниці температур у приміщенні і на вулиці та теплозахисних властивостей стін, вікон, перекриттів, покриттів (огороджувальні конструкції). Теплозахисні властивості огороджувальних конструкцій оцінюють величиною, що називається *опором теплопередачі*. Опір теплопередачі показує, який перепад температур виникає при проходженні теплового пото-

ку величиною 1 Вт/м^2 через одиницю площі огорожень. Опір теплопередачі складається з трьох складових [3, 4]:

- ✦ опір при переході тепла від внутрішнього повітря до внутрішньої поверхні огороджувальної конструкції, який викликає температурний перепад $t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}} (R_{\text{в}})$;
- ✦ опір при проходженні тепла через товщу самої огороджувальної конструкції, який викликає температурний перепад $\tau_{\text{в}} - \tau_{\text{н}} (R)$;
- ✦ опір при переході тепла від зовнішньої поверхні до зовнішнього повітря, який викликає температурний перепад $\tau_{\text{н}} - t_{\text{н}} (R_{\text{н}})$.

Тут $t_{\text{в}}$ – температура внутрішнього повітря; $\tau_{\text{в}}$ – температура внутрішньої поверхні стіни; $\tau_{\text{н}}$ – температура зовнішньої поверхні стіни; $t_{\text{н}}$ – температура повітря ззовні.

Таким чином, опір теплопередачі огороження виражається як сума цих опорів:

$$R_0 = R_{\text{в}} + R + R_{\text{н}}. \quad (1)$$

Величина, обернена опору теплопередачі, є коефіцієнтом тепловіддачі.

Оскільки при тепловізійній зйомці досліджувалися будівлі тільки ззовні, то при розрахунку теплових втрат слід враховувати, що віддача тепла поверхнею огороження відбувається випромінюванням і конвекцією з повітрям [3], тобто загальну кількість тепла, що передається, можна виразити формулою

$$Q = Q_{\text{в}} + Q_{\text{к}}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{в}}$ – кількість тепла, що передається випромінюванням; $Q_{\text{к}}$ – кількість тепла, що передається конвекцією.

Кількість тепла (тепловий потік), що передається випромінюванням, визначається таким чином:

$$Q_{\text{в}} = \sigma \cdot S \cdot (T^4 - T_0^4), \quad (3)$$

де $\sigma = 5,65 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(К}^4 \cdot \text{м}^2)$ – стала Стефана–Больцмана; S – площа поверхні, що випромінює; T – температура поверхні, що випромінює; T_0 – температура оточуючого середовища.

Тепловізор як вимірювальний прилад реєструє потік випромінювання від досліджуваного об'єкта. При умові його калібрування по еталонному джерелу (абсолютно чорному тілу) можна виконати розрахунок температури по вимірюваному потоку. Потік випромінювання R з 1 м^2 поверхні з урахуванням спектрального діапазону, в якому працює тепловізор [5], визначається як

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda, \quad (4)$$

де $C_1 = 2\pi h c^2$ і $C_2 = hc/k$; c – швидкість світла; h – стала Планка; k – стала Больцмана; λ – довжина хвилі випромінювання; $\lambda_1 = 3 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 12 \text{ мкм}$.

Кількість тепла (тепловий потік), що передається конвективним механізмом, визначається як

$$Q_k = \alpha \cdot S \cdot (T - T_0), \quad (5)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі.

Для зовнішніх поверхонь огорожень коефіцієнт тепловіддачі обраховується за емпіричною формулою Франка [3]:

$$\alpha = 7,339 \cdot v^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91v}, \quad (6)$$

де v – швидкість вітру. Другий член цього рівняння означає величину віддачі тепла природною конвекцією.

Тепловізійні обстеження проводилися з використанням тепловізора, розробленого та виготовленого в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, з температурною роздільною здатністю $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ і форматом кадру 256×320 пікселів. Для узгодження роботи тепловізора з персональним комп'ютером використовується оригінальне програмне забезпечення, що дає змогу візуалізувати термограми у різних палітрах псевдоколірів, отримувати графіки розподілу температур уздовж вибраних ліній. Для визначення неоднорідності температури по поверхні тепловізор відкалібрований за допомогою абсолютно чорного тіла у діапазоні $-5 \div +60 \text{ }^\circ\text{C}$.

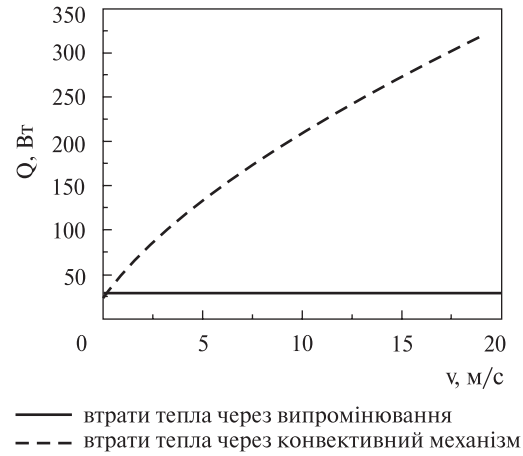


Рис. 5. Тепловтрати через вікно у залежності від швидкості вітру

На рис. 1–3 (див. кольорову вклейку) наведені термограми (а) та фотографії фрагментів у видимому діапазоні спектра (з) фасадів корпусів Міжнародного виставочного центру, отримані при їх тепловізійному обстеженні. Також на рисунках наведені графіки розподілу температури уздовж вертикальної (б) та горизонтальної (в) ліній на термограмах.

Обстеження проводилися в похмурий день при температурі зовнішнього середовища $+1 \text{ }^\circ\text{C}$ (274 K). Температура всередині приміщення була $+16 \text{ }^\circ\text{C}$ (289 K). При швидкості вітру $v = 5 \text{ м/с}$ та при різниці температури між повітрям ззовні та зовнішньою поверхнею стіни 5 K (рис. 1) кількість тепла, що втрачається конвективним механізмом, становить $105,47 \text{ Вт}$ з 1 м^2 площі, а шляхом випромінювання – близько 24 Вт з 1 м^2 площі. Разом це складає $129,47 \text{ Вт}$ з 1 м^2 або $111,34 \text{ ккал/год}$. Якщо ж різниця температури між повітрям ззовні та зовнішньою поверхнею стіни складає 13 K (рис. 1, область підвищених тепловтрат), то кількість тепла, що втрачається конвективним механізмом, складає $235,8 \text{ Вт}$ з 1 м^2 площі, шляхом випромінювання – 65 Вт з 1 м^2 площі. Сумарні тепловтрати складають $300,8 \text{ Вт}$ з 1 м^2 площі або $258,7 \text{ ккал/год}$. Таким чином, через неякісне виконання будівельних робіт маємо

додаткові тепловтрати 147,36 ккал/год з 1 м² площі (тобто більше приблизно у 2 рази).

Тепловтрати через окремі зовнішні елементи будівель різні і багато у чому залежать від теплоізоляційних якостей окремих конструкцій та їх розмірів. Вікна в загальній площі зовнішніх огорожень складають значно менший відсоток у порівнянні зі стінами, але опір теплопередачі віконного блоку значно менший, ніж у зовнішніх стін. Тому через вікна втрачається значна кількість тепла. Але сучасні склопакети дають можливість значно зменшити тепловтрати вікна (див. рис. 4 на кольоровій вклейці). На рис. 4 наведено термограму житлового будинку (а) та його зображення у видимому діапазоні спектра (б). Тепловізором зафіксована різниця температур 3 °С між звичайним вікном та склопакетом. На рис. 5 наведено тепловтрати через вікно в залежності від швидкості вітру.

При швидкості вітру 5 м/с через вікно старого зразка площею 2,1 м² втрачається на 162,22 Вт за годину більше, ніж через сучасний склопакет. У невеликому п'ятиповерховому будинку таких вікон близько п'ятидесяти. Таким чином додаткові тепловтрати складуть 8,11 кВт на годину або ж 194,67 кВт на добу. За опалювальний сезон це складає близько 35,04 МВт·год або 8,37 Мкал.

Тепловізійна зйомка наглядно показує наявність чи відсутність скритих дефектів теплозахисту будівель [6], які можна умовно розділити на два типи. В першу чергу — це підвищена фільтрація (інфільтрація) через щілини й нещільності в стиках елементів огорожувальних конструкцій. При зовнішній тепловізійній зйомці ділянки з підвищеною фільтрацією відображаються у вигляді "гарячих" зон. Другий тип дефектів пов'язаний з порушенням теплоізоляції огорожувальних конструкцій. Основною задачею обстеження є виявлення всіх температурних аномалій. Таким чином, здійснення контролю із застосуванням сучасних технологій за дотриманням нормативних вимог до теплозахисту будівель, якості матеріалів і монтажу на різних етапах будівництва дасть можливість ефективно боротися

з надлишковими втратами тепла і сприятиме подальшому підвищенню енергоефективності будівель і споруд.

Проведені дослідження показали високу ефективність застосування тепловізійного неруйнівного контролю будівель та споруд. Метою даного дослідження було виявлення причин, з яких у корпус № 2 необхідно подавати значно більшу кількість тепла для його обігріву, ніж в корпус № 1. За результатами тепловізійного обстеження можна назвати основну причину — це погана теплова ізоляція у місцях з'єднання даху з несучими конструкціями. Втрати тепла через стіни, вікна та двері різних корпусів порівнянні між собою і не можуть розглядатися як визначальна причина підвищеного споживання тепла.

Тепловізійні обстеження показують реальний ступінь енергоефективності будівель, сприяють покращенню якості будівельних робіт, технологій і матеріалів. Якість теплозахисту будівель підтверджена тепловізійними дослідженнями і має бути однією із складових формування як ринкової вартості конкретного об'єкта, так і іміджу будівельної компанії.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Лездин Д.Ю.* Практика применения тепловизионного контроля в строительстве // "Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика" (АВОК), 2005. — № 7.
2. *Шубин Л.И.* Современные возможности тепловизионного контроля зданий // "Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика" (АВОК), 2005. — № 4.
3. *Фокин К.Ф.* Строительная теплофизика ограждающих частей зданий. — М: Стройиздат, 1973. — 287 с.
4. *Богословский В.Н.* Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). — М: Высшая школа, 1982. — 415 с.
5. *Козелкин В.В., Усольцев И.Ф.* Основы инфракрасной техники. — М.: Машиностроение, 1974. — 336 с.
6. *Сизов Ф.Ф., Маслов В.П., Кравченко С.Л., Ефременко В.Г., Шустакова Г.В.* Использование тепловизионной техники для дистанционного неразрушающего контроля строительных конструкций // "Техническая диагностика и неразрушающий контроль", 2004. — № 1. — С. 48–49.

Ф.Ф. Сизов, В.В. Забудський, А.Г. Голенков,
С.Л. Кравченко, Б.П. Корниенко

ДИСТАНЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОПOTЕРЬ ЗДАНИЙ
ТЕПЛОВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ

Рассмотрены возможности эффективного тепловизионного неразрушающего контроля зданий и сооружений с использованием тепловизора, разработанного в Институте физики полупроводников им. В.Е. Лашкарьова НАН Украины.

Ключевые слова: тепловизор, тепловизионный неразрушающий контроль, теплотери, тепловидение.

F.F. Sizov, V.V. Zabudsky, A.G. Golenkov,
S.L. Kravchenko, B.P. Kornienko

REMOTE INVESTIGATION OF BUILDINGS'
HEAT LOSSES BY THERMAL
IMAGING TECHNIQUE

The possibilities of thermal imaging nondestructive inspection for buildings and constructions are considered. The imager used for investigations was designed and manufactured by V.E. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine.

Key words: thermal imaging, heat losses, nondestructive inspection.

Надійшла до редакції 14.04.08.

**Європейська Комісія розпочала інформаційну кампанію
Європейського року творчості та інновацій – 2009
із гаслом: "Уявляй. Створи. Оновлюй"**

- ✦ 23 вересня 2008 року на пленарному засіданні в Брюсселі Європейський Парламент підтримав ініціативу Європейської Комісії визнати 2009 рік **Європейським роком творчості та інновацій**.
- ✦ Завданням Року є поширення творчих та інноваційних підходів у різних сферах людської діяльності та сприяння кращій підготовці Європейського союзу до протистояння майбутнім викликам у глобалізованому світі.
- ✦ ЄС запропонує рамки роботи для підвищення обізнаності у питаннях творчих підходів і нововведень та сприяння політичним дебатам про шляхи збільшення творчого та інноваційного потенціалу Європи.
- ✦ Передбачається проведення кампаній, заходів та ініціатив на європейському, національному, регіональному та місцевому рівнях. Події Року стосуватимуться не тільки галузі освіти та культури, але й підприємництва, регіональної та дослідницької політики.
- ✦ Офіційне відкриття Року відбулося у Празі 7 січня 2009 року за участю Президента Європейської Комісії Жузе Мануеля Баррозу та Прем'єр-міністра Чехії Мірка Тополанека.
- ✦ Інформація про всі новини, події, а також звіти про результати всіх заходів протягом Року, інформація про партнерів та заходи в країнах ЄС доступна на веб-сайті Європейського року творчості та інновацій (<http://www.create2009.europa.eu>).