УДК 699.86:620.179.13:692.4

**Є. М.Опря**
**О. Г. Лялюк**

# МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО АУДИТУ ПОКРИТТЯ ІСНУЮЧИХ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Вінницький національний технічний університет

**Анотація**

*У тезах розглянуто сучасні підходи та методологічні особливості проведення неруйнівного тепловізійного аудиту суміщених і горищних покриттів існуючих будівель різного функціонального призначення. Проаналізовано фізичну природу та основні причини виникнення теплових аномалій у багатошарових конструкціях покрівель, зокрема порушення цілісності гідроізоляційного килима, локальне та площинне перезволоження теплоізоляційного шару, дефекти пароізоляції та наявність конструктивних містків холоду у вузлах примикання. Систематизовано методичні вимоги до умов проведення інфрачервоної термографії відповідно до чинних національних та європейських стандартів. Запропоновано комплексний алгоритм якісної та кількісної інтерпретації термограм у поєднанні з неруйнівною вологометрією для оцінки прихованих дефектів та обґрунтування технічних рішень із термомодернізації покриття.*

***Ключові слова:*** *тепловізійний аудит, інфрачервона термографія, покриття будівлі, трансмісійні тепловтрати, перезволоження утеплювача, енергоефективність.*

***Abstract.*** *The conference paper examines modern approaches and methodological features of conducting non-destructive thermal imaging audits of flat and pitched roofs in existing buildings of various functional purposes. The physical nature and main causes of thermal anomalies in multilayer roof structures are analyzed, including breaches in the integrity of the waterproofing membrane, local and planar moisture accumulation in the thermal insulation layer, vapor barrier defects, and the presence of structural thermal bridges at junction nodes. Methodological requirements for performing infrared thermography in accordance with current national and European standards are systematized. A comprehensive algorithm for qualitative and quantitative interpretation of thermograms combined with non-destructive moisture metering is proposed to assess hidden defects and substantiate technical solutions for roof thermal modernization.*

***Keywords:*** *thermal imaging audit, infrared thermography, building roof, transmission heat loss, insulation moisture, energy efficiency.*

**Вступ.** Підвищення енергетичної ефективності житлового, громадського та промислового будівельного фонду є одним із ключових стратегічних пріоритетів сталого розвитку будівельної галузі України та країн Європейського Союзу [1-3]. Переважна більшість експлуатованих будівель, зведених у другій половині XX століття, проєктувалася за застарілими теплотехнічними нормами, внаслідок чого їхні зовнішні огороджувальні конструкції характеризуються критично низьким опором теплопередачі та значним рівнем трансмісійних тепловтрат. Особливе місце у загальному тепловому балансі будівлі займає покриття (суміщена покрівля або горищне перекриття), через яке, залежно від поверховості, площі забудови та об'ємно-планувального рішення споруди, може втрачатися від 15 % до 35 % теплової енергії в опалювальний період [3].

Окрім виконання теплозахисної функції, покриття будівлі зазнає найбільш інтенсивного комплексного впливу кліматичних та експлуатаційних чинників: атмосферних опадів у вигляді дощу та снігу, прямої сонячної радіації, ультрафіолетового випромінювання, вітрових навантажень, а також циклічних знакозмінних температурних деформацій. Поступове старіння покрівельних матеріалів та накопичення експлуатаційних пошкоджень призводять до втрати герметичності гідроізоляційного килима та деградації теплоізоляційного шару.

Традиційні методи візуального та вибіркового інструментального обстеження дають змогу зафіксувати лише явні поверхневі дефекти покрівельного килима (тріщини, здуття, розходження швів, механічні пробої), тоді як приховані зони перезволоження утеплювача залишаються

непоміченими до моменту масового протікання води в приміщення верхніх поверхів або корозійного руйнування несучих залізобетонних чи металевих елементів. У зв'язку з цим актуальним науково-прикладним завданням будівельної фізики та інженерної діагностики є вдосконалення методики дистанційного неруйнівного контролю, серед інструментів якого найбільшу інформативність, оперативність та економічну доцільність забезпечує тепловізійний аудит.

**Основна частина.** Фізичною основою тепловізійного методу діагностики будівельних конструкцій є дистанційна реєстрація власного електромагнітного випромінювання поверхонь в інфрачервоному діапазоні спектра (довжина хвилі 8–14 мкм), інтенсивність якого згідно із законом Стефана - Больцмана пропорційна четвертому степеню термодинамічної температури поверхні та її коефіцієнту випромінювальної здатності [5-6]. За наявності стаціонарного або квазістаціонарного теплового потоку крізь багатошарове покриття локальні ділянки зі зниженим термічним опором або підвищеною теплоємністю проявляються на термограмі у вигляді характерних температурних аномалій.

Залежно від конструктивного типу покриття та умов доступу тепловізійна зйомка може виконуватися з внутрішнього боку приміщень (обстеження стелі верхнього поверху або конструкцій горища) або зовні з поверхні покрівлі чи з повітря із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених радіометричними інфрачервоними камерами. Під час внутрішньої термографії в зимовий період дефектні ділянки зі зниженим опором теплопередачі фіксуються як зони локального зниження температури поверхні. При зовнішньому обстеженні ділянки підвищених тепловтрат мають вищу температуру порівняно з бездефектним фоном конструкції.

Систематизація результатів практичних енергетичних аудитів існуючих будівель дозволяє виділити три основні групи дефектів покриттів, які ефективно виявляються за допомогою інфрачервоної термографії:

1. Перезволоження теплоізоляційного шару. Порушення герметичності рулонного бітумно-полімерного або полімерного мембранного гідроізоляційного килима призводить до проникнення атмосферної вологи в товщу пористого утеплювача (мінераловатних плит, екструдованого або спіненого пінополістиролу, керамзитового гравію). Оскільки коефіцієнт теплопровідності води (близько 0,60 Вт/(м·К)) приблизно у 15–20 разів перевищує теплопровідність сухого утеплювача (0,032–0,042 Вт/(м·К)), термічний опір зволоженої ділянки різко знижується. Крім того, вода має значно вищу питому теплоємність (4,19 кДж/(кг·К)), внаслідок чого перезволожені зони акумулюють сонячну енергію вдень і повільніше охолоджуються після заходу сонця, формуючи чіткий тепловий контраст у вечірній час.

2. Конструктивні та технологічні містки холоду. Лінійні та точкові теплопровідні включення виникають у вузлах примикання покриття до парапетів, вентиляційних шахт, зенітних ліхтарів, димових труб, деформаційних швів, а також у місцях встановлення покрівельних аераторів, водоприймальних воронок та кріплень інженерного обладнання. Технологічні дефекти укладання теплоізоляції - нещільне стикування плит утеплювача, утворення повітряних порожнин або відсутність розбіжки швів при двошаровому монтажі - також створюють канали інтенсивного витоку теплоти та конвективного перенесення повітря.

3. Порушення цілісності пароізоляційного бар'єра. Пошкодження або негерметичне проклеювання швів пароізоляційного шару з боку опалюваних приміщень спричиняє дифузію та конвективне надходження водяної пари всередину покрівельного пирога. При досягненні площини конденсації (точки роси) відбувається внутрішнє зволоження утеплювача навіть за абсолютно цілого зовнішнього гідроізоляційного килима. Це призводить до втрати теплоізоляційних властивостей матеріалу, корозії металевих елементів профільованого настилу й кріплення, а також розвитку плісняви та грибка на внутрішній поверхні перекриття.

Достовірність та відтворюваність результатів тепловізійного аудиту покриття критично залежать від дотримання регламентованих умов вимірювань, встановлених національним стандартом ДСТУ Б EN 13187:2011 та міжнародним стандартом ISO 6781 [2]. Ключовою вимогою є забезпечення достатнього перепаду температур між внутрішнім та зовнішнім повітрям, який повинен становити не менше 10–15 °C протягом щонайменше 24 годин до початку обстеження та безпосередньо під час зйомки. Дотримання цього градієнта забезпечує формування сталого теплового потоку крізь товщу огородження, необхідного для надійної візуалізації прихованих неоднорідностей.

Під час планування та проведення термографічного обстеження покриття необхідно враховувати та мінімізувати вплив низки зовнішніх метеорологічних і радіаційних завад, здатних суттєво спотворити температурне поле поверхні:

- вплив прямої та розсіяної сонячної радіації, яка нерівномірно нагріває темні бітумні або сірі ПВХ/ТПО мембрани, створюючи хибні температурні градієнти та маскуючи реальні трансмісійні тепловтрати зсередини будівлі;
- наявність на поверхні покрівлі снігового покриву, крижаної кірки, інею або стоячої дощової води, які екранують власне теплове випромінювання конструкції та змінюють її оптичні характеристики;
- підвищена швидкість вітру (понад 5 м/с), що посилює конвективний теплообмін на зовнішній поверхні покрівлі та згладжує температурні контрасти між дефектними і бездефектними ділянками;
- відбиття низькотемпературного випромінювання безхмарного неба або сусідніх вищих будівель від поверхонь із низьким коефіцієнтом емісії (оцинкована сталь, алюмінієві фартухи, блискучі полімерні покриття).

З огляду на зазначені чинники, зовнішній тепловізійний аудит суміщених покрівель найбільш доцільно проводити в суху безвітряну погоду в нічний або передсвітанковий час (через 3–4 години після заходу сонця), коли вплив сонячної радіації відсутній, а теплова інерція вологих ділянок утеплювача проявляється найчіткіше. Для підвищення точності вимірювань у налаштуваннях тепловізора обов'язково задаються фактичні значення коефіцієнта випромінювальної здатності матеріалу поверхні (для руберойду та бітумних матеріалів ε = 0,91–0,94, для полімерних мембран ε = 0,88–0,92), відбита уявна температура навколишнього середовища, температура та відносна вологість повітря, а також відстань до об'єкта.

Сучасна методологія проведення тепловізійного аудиту покриттів базується на поєднанні якісного та кількісного аналізу термограм із подальшою верифікацією виявлених аномалій. На етапі якісного аналізу здійснюється сканування всієї площі покрівлі з фіксацією термограм і синхронних фотознімків у видимому спектрі, виявлення температурних аномалій, визначення їхньої геометричної форми й площі та нанесення контурів дефектних зон на план покрівлі.

Для виключення хибної інтерпретації температурних аномалій (наприклад, спричинених локальним потовщенням стяжки, залишками бітумної мастики чи затіненням від парапетів) доцільно застосовувати комплексний підхід, що поєднує інфрачервону термографію з методами неруйнівної вологометрії - діелькометричним (ємнісним) імпедансним скануванням або нейтронною вологометрією. Це дозволяє достовірно підтвердити наявність та відносний рівень вологи в товщі покрівельного пирога без механічного порушення цілісності гідроізоляційного килима.

На етапі кількісного аналізу термограм виконується теплотехнічна оцінка технічного стану покриття. За результатами вимірювань температур внутрішньої і зовнішньої поверхонь та повітря розраховується фактичний приведений опір теплопередачі дефектних та фонових ділянок, визначається температурний індекс внутрішньої поверхні (f_Rsi) для перевірки умови неутворення конденсату, а також обчислюються понаднормові втрати теплової енергії за опалювальний сезон. Застосування спеціалізованого програмного забезпечення та геоінформаційних систем дає змогу автоматично зшивати ортотермоплани покрівель великої площі та формувати цифрові карти теплових дефектів. На основі отриманих даних обґрунтовується оптимальна стратегія санації покриття: локальний ремонт гідроізоляції з влаштуванням додаткових покрівельних аераторів для осушення утеплювача (при зволоженні до 15–20 % площі) або капітальний ремонт із заміною утеплювача та доведенням термічного опору конструкції до сучасних нормативних вимог ДБН В.2.6-31:2021[1].

**Висновки.** Тепловізійний аудит є високоефективним, оперативним та економічно обґрунтованим методом неруйнівного контролю технічного стану і теплозахисних якостей покриттів існуючих будівель. Застосування інфрачервоної термографії дає змогу на ранніх стадіях експлуатації виявити приховане перезволоження теплоізоляційного шару, порушення герметичності гідро- та пароізоляції, а також конструктивні й технологічні містки холоду, які неможливо ідентифікувати під час традиційного візуального огляду. Дотримання нормативних вимог щодо температурного перепаду, метеорологічних умов проведення зйомки та коректного налаштування параметрів тепловізора забезпечує високу точність і достовірність діагностики. Комплексне поєднання інфрачервоної термографії з безконтактною вологометрією та кількісними теплотехнічними розрахунками формує

надійну науково-технічну базу для прийняття раціональних проєктних рішень під час проведення енергоефективної термомодернізації будівель.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ : Мінрегіон України, 2022. 27 с.

2. ДСТУ Б EN 13187:2011. Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових відмов в огороджувальних конструкціях будівель. Інфрачервоний метод (EN 13187:1998, IDT). Київ : Мінрегіон України, 2012. 22 с.

3. Фаренюк Г. Г. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огороджувальних конструкцій. Київ : Гама-Принт, 2009. 216 с.

4. Басок Б. І., Гончарук С. М., Новіков В. Г. Тепловізійний контроль огороджувальних конструкцій будівель та споруд. Промислова теплотехніка. 2017. Т. 39, № 3. С. 48–54.

5. Fox M., Coley D., Goodhew S., De Wilde P. Thermography methodologies for detecting energy related building defects. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 40. P. 296–310.

6. Lucchi E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. P. 3077–3090.

**Опря Євгеній Михайлович** – аспірант, Вінницький національний технічний університет. Eugenopria@gmasl.com

**Лялюк Олена Георгіївна** – к. т. н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету, науковий керівник. e-mail: Lyalyuk74@gmail.com

**Opria Yevgen** - post-graduate studen, post-graduate studen, Vinnitsa National Technical University (VNTU)/ Eugenopria@gmasl.com

**Lyalyuk Elena** - Ph. D., assistant professor of construction of urban economy and architecture VNTU, e-mail: Lyalyuk74@gmail.com