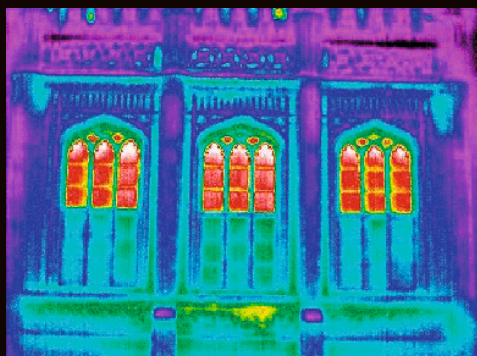
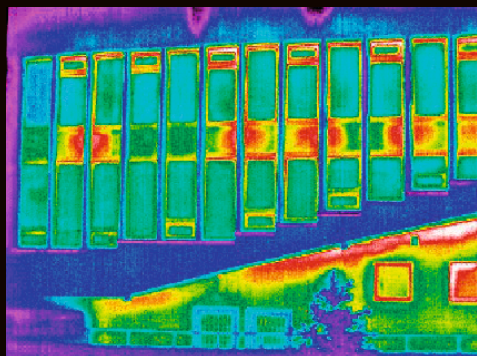
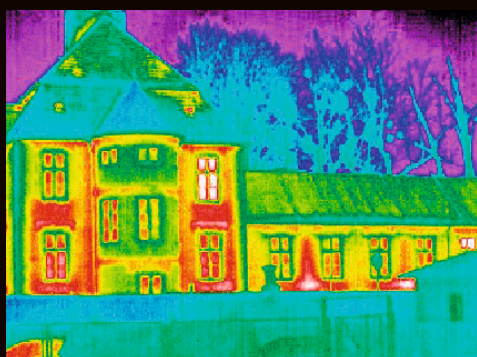
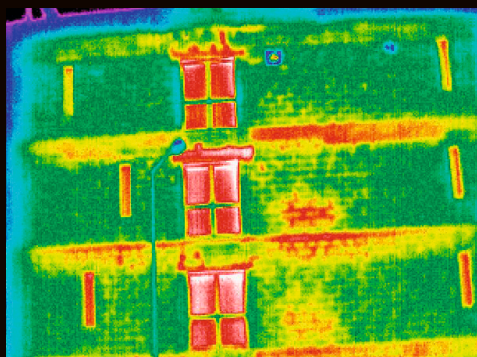


Henryk NOWAK

ZASTOSOWANIE BADAŃ TERMOWIZYJNYCH W BUDOWNICTWIE



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

Henryk NOWAK

**ZASTOSOWANIE BADAŃ
TERMOWIZYJNYCH
W BUDOWNICTWIE**



**Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2012**

Recenzenci

Wojciech MARKS

Lech Z. ŚLIWOWSKI

Opracowanie redakcyjne

Alina KACZAK

Korekta

Hanna JUREK

Projekt okładki

Marcin ZAWADZKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

wyb. Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>; e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-676-7

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej.

*Dedykuję mojej żonie Halinie i córce Weronice
z podziękowaniem za cierpliwość i wyrozumiałość*

Spis treści

Przedmowa	7
Wykaz ważniejszych oznaczeń	11
1. Wprowadzenie	13
1.1. Wstęp	13
1.2. Cel i zakres książki	25
2. Podstawy wymiany ciepła przez przegrody budowlane	29
2.1. Właściwości cieplno-fizyczne materiałów budowlanych	29
2.2. Pojęcia podstawowe wymiany ciepła	38
2.2.1. Wymiana ciepła przez konwekcję	39
2.2.2. Wymiana ciepła przez promieniowanie	42
2.2.3. Wymiana ciepła przez przewodzenie	44
2.2.4. Złożona wymiana ciepła	45
2.3. Podstawy teorii przewodnictwa cieplnego	47
2.3.1. Pole temperatury	47
2.3.2. Nieustalone przewodzenie ciepła w ciałach stałych	51
2.3.3. Dynamika cieplna przegród budowlanych – masa termiczna przegród	56
2.4. Jednokierunkowe ustalone przenikanie ciepła przez ściankę płaską	61
2.4.1. Przenikanie ciepła przez przegrody	61
2.4.2. Rozkład temperatury w przegrodzie	66
2.4.3. Wpływ usytuowania warstwy izolacji termicznej na właściwości cieplno- -wilgotnościowe przegrody budowlanej	67
3. Mostki cieplne w budynkach	71
3.1. Wstęp	71
3.2. Mostki cieplne	73
3.3. Błędy projektowe i wykonawcze realizacji termicznej obudowy budynków	98
4. Podstawy teoretyczne badań termowizyjnych – wymiana ciepła przez promieniowanie..	103
4.1. Odkrycie promieniowania cieplnego	103
4.2. Widmo promieniowania elektromagnetycznego	105
4.3. Podstawowe prawa promieniowania ciała czarnego	108
4.4. Promieniowanie cieplne obiektów rzeczywistych	112
4.4.1. Radiacyjne właściwości powierzchni ciał stałych	112
4.4.2. Współczynnik emisyjności powierzchni ciał stałych	114
4.4.3. Powierzchnie spektralnie selektywne	120
4.5. Wymiana ciepła przez promieniowanie między dwiema powierzchniami	129

5. Radiacyjna wymiana ciepła budynku z otoczeniem	133
5.1. Promieniowanie ciepłe środowiska zewnętrznego	133
5.2. Chłodzenie radiacyjne zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych	140
5.3. Średnia temperatura promieniowania nieboskłonu	144
5.3.1. Kalorymetryczna temperatura promieniowania nieboskłonu	144
5.3.2. Spektralna temperatura promieniowania nieboskłonu	148
5.4. Bilans promieniowania ciepłego zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej ...	152
5.5. Poprawka temperaturowa do obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego ..	155
6. Badania termowizyjne w budownictwie	161
6.1. Diagnostyka termiczna budynków	161
6.2. Badania termowizyjne a badania nieniszczące	166
6.2.1. Wstęp	166
6.2.2. Termografia pasywna	168
6.2.3. Termografia aktywna	170
6.3. Istota badań termowizyjnych	175
6.3.1. Wstęp	175
6.3.2. Podstawa pomiaru termowizyjnego	181
6.3.3. Zalety i ograniczenia badań termowizyjnych	184
6.3.4. Procedura wykonywania badań termowizyjnych	186
6.3.5. Zasady wykonywania badań termowizyjnych	189
6.3.6. Termowizyjne badania ilościowe	193
6.4. Czynniki wpływające na dokładność pomiarów termowizyjnych	202
6.4.1. Czynniki środowiskowe oraz związane z kamerą i z obiektem badań	202
6.4.2. Współczynnik emisyjności powierzchni	209
6.5. Przyczyny błędów pomiarowych	216
6.6. Interpretacja termogramów	218
6.7. Badania termowizyjne w budownictwie	232
6.7.1. Zakres termowizyjnych badań w budownictwie	232
6.7.2. Badania budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej	235
6.7.3. Badania okien, drzwi balkonowych i fasad przeszklonych	249
6.7.4. Balkony	267
6.7.5. Połacie dachowe	271
6.7.6. Stropodachy	275
6.7.7. Instalacje centralnego ogrzewania, posadzki z ogrzewaniem podłogowym	277
6.7.8. Przykłady różne	281
6.7.9. Jak nie należy wykonywać badań termowizyjnych	288
6.7.10 Termografia lotnicza	290
6.7.11. Badania obiektów mostowych	296
6.8. Zakres raportu termograficznego	303
6.9. Czy zawsze badania kamerą termowizyjną	308
6.10. Standaryzacja kwalifikacji zawodowych personelu termograficznego	311
7. Podsumowanie.....	315
Literatura	319
Streszczenie w języku angielskim	331

Przedmowa

Termowizyjne badania budynków w Polsce po raz pierwszy zastosowano z początkiem lat 70. ubiegłego stulecia, a więc blisko 40 lat temu, niewiele ponad 10 lat od momentu wyprodukowania pierwszej kamery termowizyjnej w roku 1960. Z pierwszą kamerą termowizyjną AGA Thermovision 680 Autor zetknął się w roku 1978 i ten rok można uznać za początek jego doświadczeń pomiarowych. Książka jest próbą podsumowania blisko 33-letniego doświadczenia Autora w wykonywaniu termowizyjnych badań w budownictwie, przede wszystkim badań budynków o różnym przeznaczeniu oraz próbą kompleksowego przedstawienia i uporządkowania zagadnień związanych z podstawami teoretycznymi wykonywania pomiarów, przedstawienia ważniejszych zasad wykonywania badań w budownictwie, identyfikacji i klasyfikacji uszkodzeń badanych elementów oraz zasad poprawnej interpretacji termogramów.

Od roku 2000 nastąpił intensywny rozwój technologiczny w produkcji kamer termowizyjnych, zdecydowanie wzrosły ich możliwości pomiarowe z jednoczesnym obniżaniem ceny, przez co kamery stały się, również w Polsce, bardziej dostępne. Z doświadczenia Autora wynika, że obecnie bardzo często operatorzy kamer termowizyjnych nie są zupełnie przygotowani do wykonywania pomiarów w budownictwie i że najczęściej są to „specjaliści” spoza branży budowlanej. Niestety zdarza się również, że osoby z wieloletnim doświadczeniem w wykonywaniu termowizyjnych badań budynków także popełniają błędy w interpretacji termogramów. Te przyczyny spowodowały m.in., że Autor podjął się trudu napisania tej książki, która w zamierzeniach całościowo obejmowałaby zagadnienia związane z wykonywaniem i interpretacją badań termowizyjnych w budownictwie.

Ideą merytorycznego układu książki było, aby zawierała ona niezbędną wiedzę do poprawnego wykonywania termowizyjnych badań w budownictwie, głównie budynków o różnym przeznaczeniu, od momentu przygotowania do pomiarów, poprzez ich prawidłową realizację aż do interpretacji termogramów i opracowania raportu z badań. Autor ma nadzieję, że Czytelnik znajdzie w niej informacje niezbędne do wykonywania badań, ale jednocześnie zdaje sobie sprawę, że książka nie wyczerpuje wszystkich problemów związanych z wykonywaniem badań termowizyjnych w budownictwie. W związku z tym będzie bardzo wdzięczny wszystkim Czytelnikom, którzy prześlą swoje uwagi, komentarze i sugestie (henryk.nowak@pwr.wroc.pl).

Zasadniczą treść książki przedstawiono w czterech głównych blokach tematycznych, a mianowicie – w części pierwszej przedstawiono podstawy wymiany ciepła przez przegrody budowlane, w tym opisano mostki cieplne i ich wpływ na termiczną obudowę budynków. W części drugiej omówiono podstawy teoretyczne badań termowizyjnych, to znaczy wymianę ciepła przez promieniowanie, podstawowe prawa promieniowania ciała czarnego oraz promieniowanie cieplne ciał rzeczywistych. Część trzecia zawiera omówienie radiacyjnej wymiany ciepła budynku z otoczeniem, z przedstawieniem cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego, zjawiska chłodzenia radiacyjnego przegród, średniej temperatury promieniowania niebosłonu i radiacyjnej wymiany ciepła między budynkami. W części czwartej omówiono zasadnicze problemy związane z wykonywaniem badań termowizyjnych w budownictwie, w tym między innymi: istotę badań termowizyjnych, zalety i ograniczenia metody badawczej, zasady wykonywania pomiarów, czynniki wpływające na dokładność badań, przyczyny błędów pomiarowych, problemy związane z interpretacją termogramów oraz liczne przykłady zastosowania badań termowizyjnych w budownictwie z odpowiednim komentarzem. Przedstawiono również szczegółowy układ sugerowanego raportu z badań.

Zawarty w książce materiał merytoryczny jest wynikiem zarówno szerokich studiów literatury specjalistycznej, jak i wieloletniego doświadczenia w zakresie uprawianej dziedziny wiedzy, tj. fizyki budowli, z ukierunkowaniem między innymi na oddziaływanie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynki i radiacyjnej wymiany ciepła przegród budowlanych (rozprawa habilitacyjna, 1999 [126]). Wpływ na zawartość książki miało oczywiście również wieloletnie doświadczenie praktyczne w wykonywaniu badań termowizyjnych oraz doświadczenie dydaktyczne w prowadzeniu seminariów i szkoleń w zakresie zastosowania badań termowizyjnych w budownictwie.

Wyjaśnienia wymaga również kwestia nazewnictwa – w literaturze tematu oprócz pojęcia *termowizja* (ang. *thermovision*) spotyka się również pojęcie *termografia* (ang. *thermography*). Pojęcie termografia stosowane było od samego początku produkcji kamer termowizyjnych, co prawdopodobnie miało związek z ówczesnym sposobem rejestracji obrazu na papierze ciepłoczułym – najpierw rejestrowano obraz, a dopiero po wywołaniu można go było obserwować. Termin termowizja zaczęto stosować później i prawdopodobnie miało to związek z nazwą pierwszych kamer serii AGA Thermovision. Obecnie wszystkie systemy obrazowania termalnego są nazywane kamerami termowizyjnymi. Pojęcia termografia i termowizja można zatem stosować wymiennie, przy czym to drugie pojęcie w niniejszej książce jest bardziej preferowane.

Na ostateczną formę i układ książki niewątpliwie miały wpływ cenne uwagi i zalecenia merytoryczne zawarte w opiniach Panów recenzentów: prof. dr. hab. inż. Wojciecha Marksa z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii

Nauk w Warszawie oraz prof. dr. hab. inż. Lecha Śliwowskiego z Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, za co im bardzo dziękuję. Dziękuję również za wyjątkową życzliwość w trakcie całego procesu wydawniczego pracownikom Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej oraz Panu dr. inż. Jackowi Barańskiemu za wykonanie większości rysunków.

Wrocław, 2012 r.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

Symbole łacińskie

- a – współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna), $[\text{m}^2/\text{s}]$,
 a_s – współczynnik absorpcji zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej w odniesieniu do promieniowania słonecznego,
 c_p – ciepło właściwe, $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$,
 C – pojemność cieplna przegrody budowlanej, $[\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})]$,
 $f(\tau)$ – zależność funkcyjna od czasu (wartość w chwili τ),
 h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$,
 h_{ci} – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na powierzchni przegrody strony pomieszczenia, $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$,
 h_{ce} – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na zewnętrznej powierzchni przegrody, $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$,
 h_r – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie, $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$,
 h_{ri} – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$,
 h_{re} – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie na zewnętrznej powierzchni przegrody, $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$,
 h_e – współczynnik przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej, $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$,
 h_i – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$,
 I_s – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego docierającego do przegrody, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 q_c – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 q_{ci} – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję przez powierzchnię przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 q_{ce} – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję przez zewnętrzną powierzchnię przegrody, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 q_i – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez powierzchnię przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 q_e – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 q_r – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła emitowanego przez daną powierzchnię, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 q_{ri} – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła emitowanego przez powierzchnię przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 q_{re} – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

- q_s – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego absorbowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 R – opór cieplny przegrody, $[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$,
 R_T – całkowity opór cieplny przegrody, $[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$,
 R_{net} – natężenie długofalowego promieniowania różnicowego między zewnętrzną powierzchnią przegrody a otaczającym ją środowiskiem zewnętrznym, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 t_e – temperatura powietrza zewnętrznego, $[\text{°C}]$,
 T_e – temperatura powietrza zewnętrznego, $[\text{K}]$,
 t_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, $[\text{°C}]$,
 T_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, $[\text{K}]$,
 t_r – średnia temperatura promieniowania nieboskłonu, $[\text{°C}]$,
 T_r – średnia temperatura promieniowania nieboskłonu, $[\text{K}]$,
 T_r^* – spektralna temperatura promieniowania nieboskłonu, $[\text{K}]$,
 U – współczynnik przenikania ciepła przegrody budowlanej, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,
 Δt – poprawka temperaturowa do wartości obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego dla warunków ustalonego przenikania ciepła, $[\text{°C}]$,
 z – kąt zenitalny.

Symbole greckie

- β – kąt pochylenia rozważanej płaszczyzny do poziomu,
 ε – współczynnik emisyjności danej powierzchni,
 λ – długość fali promieniowania, $[\mu\text{m}]$,
 λ – przewodność cieplna właściwa, $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$,
 ρ – gęstość pozorna materiału (masa objętościowa materiału), $[\text{kg}/\text{m}^3]$,
 σ – stała Stefana–Boltzmann, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$,
 τ – czas, (s),
 v_s – temperatura rozważanej powierzchni, $[\text{°C}]$,
 v_i – temperatura powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{°C}]$,
 v_e – temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody, $[\text{°C}]$,
 Θ_e – temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody, $[\text{K}]$,
 Q – ilość ciepła, $[\text{J}]$,
 Φ – strumień ciepła, moc cieplna, $[\text{W}]$.

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Racjonalne ograniczenie zużycia energii w głównych działach gospodarki, tj. w budownictwie, transporcie i przemyśle, w skali globalnej, jest obecnie zadaniem priorytetowym uzasadnionym względami ekonomicznymi i ekologicznymi. Obecnie, z uwagi na prowadzoną politykę ogólnoswiatową, konieczne jest poszukiwanie nowych technologii i nowych źródeł energii w celu ograniczenia energetycznego obciążenia środowiska i zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Spośród trzech głównych działów gospodarki budownictwo ma największy udział w zużyciu energii na świecie, szacowany na około 40% całej wyprodukowanej energii (pozostałe sektory, tj. transport i przemysł, mają udział po około 30%). W ostatnich latach w Polsce zastrzono wymagania stawiane przegrodom budowlanym i budynkom w zakresie ochrony cieplnej, podyktowane przede wszystkim względami ekonomicznymi, ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju. Jest to związane zarówno z ogromną presją na oszczędzanie energii, jak i ze wzrostem oczekiwań użytkowników budynków względem komfortu cieplnego, wizualnego i akustycznego pomieszczeń oraz wobec ogółu warunków panujących w budynku. Wymagania ochrony cieplnej przegród budowlanych i budynków są obecnie porównywalne z wymaganiami obowiązującymi w krajach europejskich na tej samej co Polska szerokości geograficznej. Główny problem polega na tym, że wymagania te wprowadzono w naszym kraju z opóźnieniem około 25 lat w stosunku do krajów zachodnich. Stąd pojawiła się konieczność wprowadzenia systemu termomodernizacji istniejących budynków, który obowiązuje od grudnia 1998 roku, z nowelizacją w 2000 i 2008 roku.

Od 1 stycznia 2009 roku obowiązują w naszym kraju postanowienia Dyrektywy EPBD (ang. *Energy Performance Building Directive*, EPBD [200]), wdrożone przepisami o zmianie Prawa Budowlanego (DzU nr 192/2007, poz. 1373) oraz zmianami wprowadzonymi w rozporządzeniach *Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [203] oraz *Szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego* [204]. Wprowadzono również stosowne rozporządzenie w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynków i lokali mieszkalnych oraz sposo-

bu sporządzania świadectw ich charakterystyki energetycznej [202]. W połowie maja 2010 roku znowelizowano Dyrektywę EPBD (tzw. Recast EPBD 2010/31/UE, [201]), zaostreżając wymagania w zakresie ograniczenia całorocznego zużycia energii w budynkach oraz nakazując wprowadzenie niezależnych systemów kontroli świadectw charakterystyki energetycznej i sprawozdań z technicznych przeglądów budynków.

Jednak żaden z wymienionych dokumentów nie narzuca sposobu kontroli jakości prac budowlanych związanych z ochroną cieplną budynków, w tym zwłaszcza kontroli związanej z realizacją i stanem termicznej obudowy budynków. W celu sprawdzenia poprawności i jakości wykonanych prac należy zastosować jedną z metod diagnostyki termicznej budynków – metodą tą z pewnością jest sprawdzona i skuteczna metoda badań termowizyjnych, stosowana w Polsce już od połowy lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, czyli od ponad 35 lat. Należy wyraźnie zaznaczyć, że diagnostyki termicznej budynku nie należy utożsamiać jedynie z badaniami termowizyjnymi, ponieważ jest to pojęcie znacznie szersze, a pomiary termowizyjne stanowią jej zasadniczy element (patrz rozdz. 6.1).

Termowizyjne badania budynków, coraz częściej wykonywane w naszym kraju, są jednym z najbardziej skutecznych nieinwazyjnych narzędzi diagnostyki cieplnej budynków, obejmującej badania:

- termicznej obudowy budynków,
- zawilgocenia przegród,
- infiltracji powietrza przez nieszczelności przegród,
- instalacji wewnętrznych,
- lokalnych źródeł ciepła.

Termiczną obudowę budynku stanowią przegrody budowlane ograniczające ogrzewaną kubaturę budynku, przez które następują straty ciepła, tj. ściany zewnętrzne, połacie dachowe, stropodachy (pełne i wentylowane), okna i drzwi balkonowe, drzwi zewnętrzne, stropy nad nieogrzewaną piwnicą, stropy pod nieogrzewanym poddaszem, stropy nad przejazdem, podłogi na gruncie, ściany stykające się z gruntem itp. Oczywiście, w przypadku budynków całorocznie chłodzonych (magazyny przechwalnicze, magazyny do składowania mięsa) termiczna obudowa tego typu budynków chroni je przed całoroczną stratą chłodu. Badania termowizyjne w tym wypadku, wykonywane w okresie lata, umożliwiają identyfikację mostków termicznych powodujących nadmierne zyski ciepła. Badania termowizyjne pozwalają zbadać stan izolacji cieplnej przegród, zlokalizować mostki cieplne, wady instalacji (ogrzewczej, ciepłej wody użytkowej, kanalizacyjnej), zlokalizować miejsca zawilgocenia przegród i nadmiernej infiltracji powietrza, zweryfikować jakość wykonanych prac izolacyjnych oraz określić zakres koniecznych prac termomodernizacyjnych. Według Autora, metoda badań termowizyjnych powinna być obowiązkowo stosowana przy technicznych odbiorach robót budowlanych i przed formalnym oddaniem budynku do użytkowania.

Na wstępie trochę historii – można założyć, że początki termowizji pojawiły się w roku 1800, kiedy to angielski astronom, pochodzenia niemieckiego, sir Frederick

William Herschel (1738–1822) odkrył promieniowanie ciepłe, zwane również podczerwonym, długofalowym lub temperaturowym (patrz rozdz. 4.1). Powszechnie znane prawa promieniowania ciała (doskonale) czarnego, leżące u podstaw współczesnej termografii i pirometrii, sformułowali [74], [160], [169], [187] (w nawiasach podano daty sformułowania tych praw): Gustaw Robert Kirchhoff (1860), Josef Stefan (1879), Ludwig Boltzmann (1884), Heinrich Hertz (1887), Wilhelm Wien (1896) oraz Max Planck (1900). Następnie, w okresie od I wojny światowej do końca lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia badania nad zastosowaniem urządzeń na podczerwień prowadzono praktycznie jedynie na potrzeby zastosowań wojskowych.

Pierwszą kamerę termowizyjną wyprodukowała w roku 1960 szwedzka firma AGA (pełna nazwa firmy AGA Infrared Systems AB) na zamówienie wojska – była to kamera AGA Thermovision 600, a nazwa kamery nawiązywała do roku produkcji. Niestety, najważniejsze parametry tej kamery dyskwalifikowały jej wykorzystanie w warunkach bojowych, np. kilkuminutowy czas tworzenia obrazu, kamera musiała być chłodzona ciekłym azotem, cały system ważył ponad 60 kg i co również było istotne – obraz termalny badanego obiektu można było zobaczyć dopiero po wywołaniu zdjęć. Po kilku latach od wyprodukowania pierwszej kamery termowizyjnej wyprodukowano kamerę AGA Thermovision 660, a następnie AGA Thermoovision 680. Ta ostatnia była dosyć popularna pod koniec lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, w tym czasie w Polsce było kilka egzemplarzy tej kamery (przypomnijmy, ówczesna cena kamery wahała się w granicach od około 90 do około 95 tys. dolarów, w zależności od dodatkowego wyposażenia), a stosowano je głównie w medycynie, w przemyśle i w budownictwie. W tym czasie producent kamer termowizyjnych borykał się z wieloma problemami technicznymi, dotyczącymi:

- rozmiarów kamery (cały osprzęt mieścił się w kilku skrzyniach, do których przewozu należało używać małego samochodu dostawczego),
- systemu chłodzenia (obiektyw kamery był chłodzony ciekłym azotem, w trakcie badań należało uzupełniać ciekły azot ze specjalnego termosu o pojemności 10 litrów),
- rozdzielczości temperaturowej,
- rozdzielczości geometrycznej obrazu,
- sposobu rejestracji obrazu – obrazy termalne badanej powierzchni były rejestrowane przez wykonywanie zdjęcia małego ekranu 9×9 cm za pomocą specjalnej przystawki z aparatem fotograficznym wyposażonym w odpowiednią tarczę obrotową z 10 filtry do wykonywania zdjęć kolorowych.

Należy zauważyć, że poprzedzające wieloletnie intensywne prace badawczo-rozwojowe nad wyprodukowaniem pierwszej kamery termowizyjnej spowodowały, że w przeciągu kilku następnych lat po wyprodukowaniu pierwszej kamery były one już dostępne w wielu dziedzinach pozawojskowych, tam gdzie decydującą rolę odgrywała znajomość wartości i rozkładu temperatury na obserwowanej powierzchni do identyfikacji występujących nieprawidłowości w badanym obiekcie. Bardzo szybko

badania termowizyjne znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach, a w tym między innymi w:

- medycynie – do identyfikacji chorób nowotworowych, wieńcowych, odmrożeń, zaburzeń krążenia naczyniowego, schorzeń reumatycznych, neurologicznych i pourazowych oraz w chirurgii oparzeń, kardiochirurgii, stomatologii, okulistyce, dermatologii itp.,
- przemyśle – hutniczym, chemicznym, szklarskim, drzewnym, samochodowym itp., głównie do kontroli procesów technologicznych, wykrywania awarii maszyn i diagnostyki cieplnej maszyn elektrycznych i elektromechanicznych, do badania przegrzewania się poszczególnych podzespołów silników samochodowych, elektrycznych itp.,
- energetyce – do lokalizacji przegrzania przewodów elektrycznych niskiego i wysokiego napięcia, uszkodzeń izolacji różnego typu pieców, suszarni, kotłów, do badania stacji rozdzielczych, transformatorów, złączy elektrycznych, zacisków prądowych itp.,
- ciepłownictwie – do bezwykopowej lokalizacji podziemnych sieci ciepłowniczych w przypadku braku dokumentacji technicznej, do kontroli napowietrznych sieci ciepłowniczych, węzłów i komór ciepłowniczych itp.,
- elektronice – do badania prawidłowości przebiegu i oceny procesów chłodzenia układów elektronicznych, do oceny sprawności cieplnej radiatorów, badania obwodów elektronicznych pod względem rozkładu temperatury itp.,
- weterynarii – do diagnozowania schorzeń u zwierząt, takich jak psy, koty, bydło i konie, do wykrywania i monitorowania procesów leczenia zwierząt, kontrolowania działania leków, środków przeciwzapalnych, lokalnych znieczuleń, do diagnostyki stanów kulawizny, uszkodzenia więzadeł i nerwów, zapalenia kości stawów, ropnego zapalenia kopyt, ukrwienia dolnych kończyn itp.,
- gazownictwie – do wykrywania nieszczelności i uszkodzeń izolacji, do kontroli sieci napowietrznych,
- ochronie środowiska – do badania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w rzekach, jeziorach i morzach itp.,
- ratownictwie (morskim, górskim, wodnym śródlądowym, pożarowym),
- policji i służbie ochrony granic,
- budownictwie (zakres możliwości pomiarowych podano w rozdz. 6.7.1).

Następował ciągle, ale jednak powolny rozwój technologiczny w produkcji kamer termowizyjnych, które nadal musiały być chłodzone ciekłym azotem. Ogromny postęp technologiczny nastąpił dopiero w latach 90. ubiegłego stulecia, dzięki intensywnemu rozwojowi technologii mikrosystemów, co umożliwiło produkcję kamer termowizyjnych bez konieczności chłodzenia ciekłym azotem. Największy rozwój technologiczny w produkcji kamer termowizyjnych nastąpił około roku 2000, co oznacza, że od tego właśnie czasu datuje się kolejny olbrzymi krok w rozwoju możliwości pomiarowych kamer termowizyjnych. Rok 2000 był przełomowy i właśnie wtedy kamery

termowizyjne stały się bardziej dostępne cenowo dla coraz większego kręgu odbiorców oraz umożliwiały wykonywanie znacznie większego zakresu badań, w tym również w budownictwie.

Można zauważyć, że historia rozwoju obrazowania w podczerwieni rozkładu temperatury badanej powierzchni sięga ponad 200 lat i że przełomowe kroki w tym rozwoju nastąpiły w przedziałach 100-letnich. W roku 1800 sir William Herschel odkrył promieniowanie podczerwone, w roku 1900 Max Planck podał fundamentalne w fizyce prawo promieniowania ciała czarnego, które wraz z wymienionymi prawami stały się podstawą współczesnej termografii i pirometrii, i wreszcie rok 2000 został uznany za przełomowy w rozwoju technologii produkcji kamer termowizyjnych.

Obniżanie cen kamer termowizyjnych i zwiększanie dostępu do nich spowodowało inne dosyć niekorzystne zjawisko – jak zauważyli Vollmer i Moller [191], gwałtowny rozwój technologiczny, zdecydowane zwiększenie technicznych możliwości pomiaru, rejestracji, wizualizacji i przetwarzania termogramów oraz, co jest bardzo istotne, obniżanie cen kamer termowizyjnych doprowadziło do paradoksalnej sytuacji w skali globalnej, a mianowicie sprzedano więcej kamer termowizyjnych niż było i jest osób, które opanowały niezbędną wiedzę i rozumieją podstawy fizyczne wykonywania pomiarów oraz potrafią prawidłowo zinterpretować termogramy. Innymi słowy – im niższa cena kamery termowizyjnej, tym mniej doświadczeni i mniej wyszkoleni operatorzy kamer będą ich częściej używać i w tym mniejszym stopniu będą zainteresowani kursami i szkoleniami, których koszt może stanowić znaczną część kosztów kamery termowizyjnej. I jest to dosyć duży problem również w naszym kraju – w ostatnich kilku latach Autor był opiniodawcą kilkunastu raportów z termowizyjnych badań budynków, które były wykonane przez „specjalistów” spoza branży budowlanej i które z powodów merytorycznych należało zanegować.

Termogramy jest bardzo łatwo wykonać, ale niestety często jest bardzo trudno, nawet dla doświadczonych specjalistów, właściwie je zinterpretować. Niestety, z doświadczenia Autora z ostatnich około 10 lat jednoznacznie wynika, że opisana sytuacja występuje również w Polsce. W związku z obniżaniem cen kamer termowizyjnych zwiększyła się ich dostępność na rynku, co oczywiście należy ocenić pozytywnie. Znaczna część operatorów kamer termowizyjnych, która wykonuje pomiary w budownictwie (najczęściej pomiary budynków), jest zupełnie do tego nieprzygotowana – są to najczęściej „specjaliści” spoza branży budowlanej i bez podstawowego przygotowania teoretycznego, którzy wykonują takie pomiary tylko dlatego, że mają kamerę termowizyjną, która stanowi źródło dochodów. A z drugiej strony, niepokojący jest również fakt, że osoby z wieloletnim doświadczeniem w wykonywaniu termowizyjnych badań budynków również popełniają błędy w interpretacji termogramów, zwłaszcza w zakresie radiacyjnego cieplnego oddziaływania środowiska zewnętrznego na budynki, co można spotkać w artykułach technicznych czy też na wystąpieniach konferencyjnych. Te fakty m.in. spowodowały, że Autor podjął się tru-

du napisania książki, która całościowo obejmowałaby zagadnienia związane z wykonywaniem badań termowizyjnych w budownictwie i z interpretacją termogramów.

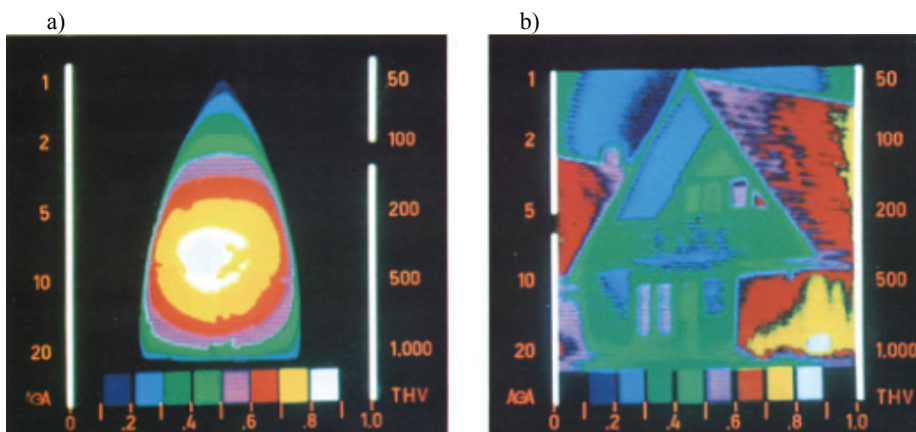
Wraz z pojawieniem się pierwszych kamer termowizyjnych w Polsce pod koniec lat 70. ubiegłego stulecia nastąpiło zainteresowanie i rozwój badań naukowych związanych z radiometryczną metodą pomiarów temperatury badanej powierzchni oraz z radiacyjną wymianą ciepła badanych elementów z otoczeniem, w tym z radiacyjną wymianą ciepła przegród budowlanych i budynków ze środowiskiem zewnętrznym. Badania termowizyjne w budownictwie, w tym głównie badania budynków, w Polsce mają ponad trzydziestoletnią tradycję – pierwsza kamera termowizyjna pojawiła się w naszym kraju z początkiem lat 70. ubiegłego stulecia. Kamera termowizyjna AGA Thermovision 680 (rys. 1.1, chłodzona ciekłym azotem) była na wyposażeniu ówczesnego Zakładu Fizyki Budowli i Środowiska (obecnie Zakład Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania) w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej w roku 1978 (kamera działa do dnia dzisiejszego, obecnie Autor używa nowoczesnej kamery firmy FLIR Systems Inc). To właśnie od tamtego roku Autor niniejszej książki zajmuje się zastosowaniem badań termowizyjnych w budownictwie, zdobywając doświadczenie pomiarowe na różnego rodzaju budynkach i obiektach budowlanych. Przeważająca część badań dotyczyła budynków mieszkalnych wielorodzinnych oraz jednorodzinnych, a w ostatnim okresie badania głównie mieszkań poddaszowych w nowo wznoszonych budynkach wielorodzinnych. Niezależnie od wiodących badań bardzo wielu budynków mieszkalnych o różnej technologii wykonania, Autor wykonywał również badania budynków i pomieszczeń o innym specyficznym przeznaczeniu, a mianowicie: badania obiektów zabytkowych (przede wszystkim ceglanych, w tym badania termowizyjne ścian i stropu w Auli Leopoldina Uniwersytetu Wrocławskiego [59] oraz badania termowizyjne zabytkowego budynku Dworca Głównego PKP we Wrocławiu [138]), magazynów chłodniczych (zamrażalnie mięsa, przechowalnie owoców i warzyw), badania ścian zewnętrznych i bram wjazdowych mroźni składowych, badania połączeń żelbetowych płyt balkonowych ze ścianami zewnętrznymi [132], badania termowizyjne efektywności termoizolacyjnej zagrzejnikowego ekranu aluminiowego, badania ogrzewanych hal produkcyjnych [137], identyfikował awarie ogrzewania podłogowego w szpitalach i budynkach mieszkalnych, badał uszkodzenia płyty dennej w garażu w budynku pasażu handlowego [55], badał instalacje przemysłowe, sieci ciepłownicze, mosty ceglane [1], [19], kominy przemysłowe itp.

Na rysunku 1.1 pokazano zestaw aparatury pomiarowej AGA Thermovision 680, popularny w Polsce pod koniec lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, a na rysunkach 1.2–1.4 przykładowe termogramy wykonane tą kamerą.

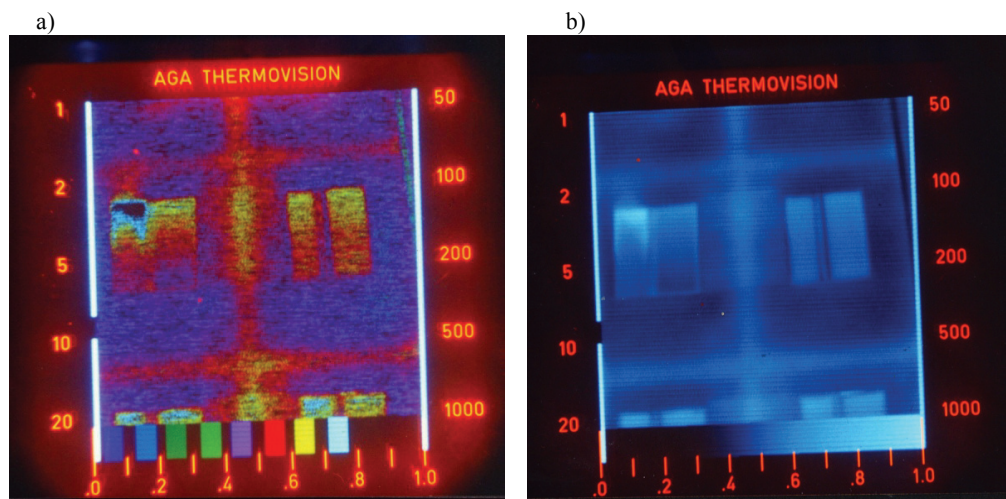
Mniej więcej w tym samym czasie pojawiły się pierwsze w Polsce artykuły na temat możliwości wykorzystania termowizyjnych badań budynków do jakościowej oceny miejsc ucieczki ciepła (Arendarski, Rusjan 1972 [4]). Następne prace wskazy-



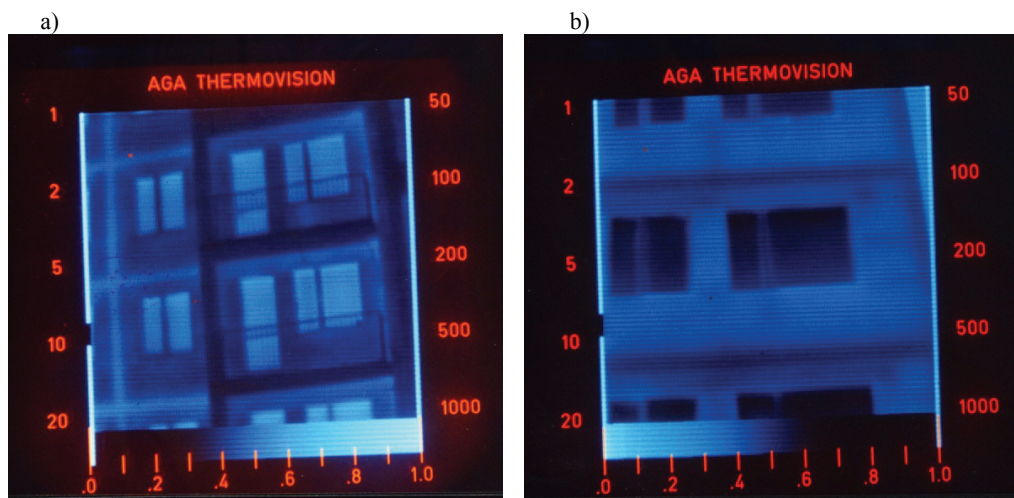
Rys. 1.1. Kamera termowizyjna AGA Thermovision Model 680, popularna w Polsce w latach 70. ubiegłego stulecia, od 1978 r. do dnia dzisiejszego na wyposażeniu Zakładu Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej [92]



Rys. 1.2. Przykładowe typowe termogramy kolorowe wykonane za pomocą kamery AGA Thermovision 680 – w przeciwieństwie do kamer współczesnych, ówczesne termogramy bezpośrednio nie prezentowały temperatury przyporządkowanej określonej barwie na termogramie. Temperaturę określano na podstawie wskaźnika czułości, zależnego od zakresu pomiarowego mierzonej temperatury, ustawianego podczas badań (wskaźnik 100 (a) oraz 5 (b)) i tzw. krzywych kalibracyjnych dla danego obiektywu. W tym przypadku: a) rozkład temperatury na powierzchni typowego żelazka, kolory od granatowego do białego odpowiadają, odpowiednio, temperaturze: 62°, 66°, 70°, 73,5°, 77°, 80°, 82,5° i 85 °C, b) kolorowy termogram części domu jednorodzinnego w zimie, kolory od granatowego do białego, odpowiednio, temperatura: 14°, 14,5°, 15,5°, 15,5°, 16°, 16,5°, 17° i 17,5 °C [92]



Rys. 1.3. Przykładowe typowe termogramy elewacji budynku wykonane za pomocą kamery AGA Thermovision 680, rok 1994: a) termogram kolorowy, b) termogram w skali szarości – tego typu termogramy były bardzo często wykonywane w badaniach budynków w tym okresie [123]



Rys. 1.4. Przykładowe typowe termogramy budynków wykonane za pomocą kamery AGA Thermovision 680: a) termogram w skali szarości, b) termogram w odwróconej skali szarości [123]

wały na możliwość wykorzystania techniki pomiarów termowizyjnych w budownictwie (Nowak, Stępniewski 1978, [107], Nowak 1979 [108]). Za pomocą aparatury termowizyjnej nie można jednak było dotychczas określić ilościowych cech przegród budowlanych. Jakościowy charakter informacji uzyskiwanej dotychczas

w diagnostycznych badaniach termowizyjnych, niewystarczający do ilościowej analizy przepływu ciepła przez przegrody budowlane, narzucił konieczność kompleksowego rozwiązania badań diagnostycznych z zastosowaniem kamery termowizyjnej wraz z wykonywaniem w tym samym czasie dodatkowych pomiarów pomocniczych. Sposób przeprowadzenia takich badań oraz stosowny algorytm obliczeń w roku 1980 zaproponowali Michalczyk i Nowak [103]. Prawdopodobnie artykuł ten stanowił pierwszą w Polsce próbę ilościowej (a nie jakościowej) oceny cieplnych właściwości przegród budowlanych na podstawie pomiarów termowizyjnych. Niestety ich pomysł i idea rozwiązania tego interesującego oraz ważnego ze względów praktycznych problemu, z uwagi na brak środków finansowych i niezbędnej dodatkowej aparatury badawczej, przez wiele lat nie doczekały się skutecznej kontynuacji. Przez wiele kolejnych lat, zarówno w Polsce, jak i na świecie, zaniechano badań w tym zakresie.

W następnych latach w polskiej literaturze technicznej artykuły na temat termowizyjnych badań budynków ukazywały się sporadycznie (Rymarczyk, 1999 [159]), a taki stan trwał do końca lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Po wprowadzeniu w roku 1994 systemu szkoleń dla audytorów energetycznych oraz po zaostrzeniu wymagań w zakresie ochrony cieplnej budynków w roku 1998 oraz po wprowadzeniu w tym samym roku systemu termomodernizacji budynków, w Polsce wzrastała świadomość społeczna i docenianie znaczenia racjonalnego użytkowania i oszczędności energii cieplnej w budynkach oraz znaczenia diagnostyki termicznej budynków, w tym głównie badań termowizyjnych. Od tego czasu można było zauważyć coraz to częstsze zastosowanie kamer termowizyjnych do badań budynków, co było również związane z coraz to większą dostępnością tych kamer w Polsce.

Pojawiły się również opracowania książkowe popularyzujące tę bardzo ciekawą i przyszłościową metodę pomiarową. Prawdopodobnie pierwszą książką w Polsce na temat termowizji była książka Rudowskiego (1978, [157]). Kolejnymi autorami byli Jaworski (2000 [60], Minkina (2004, [105]), praca zbiorowa pod redakcją Madury (2004, [155]), Wawrzynek (2005, [184]), Oliferuk (2008, [146]), Jaworski (2008, [61]), Minkina i Dudzik (2009, [106]), Wróbel (2010, [192]), Więcek i De Mey (2011, [186]) oraz Wróbel i inni (2011, [193]). Oprócz wymienionych już wcześniej pojawiły się również artykuły omawiające specyfikę termowizyjnych pomiarów budynków (Minkina i inni, 2000 [104], Nowak i inni, 2000 [127], Kruczek 2002 [76], Kisilewicz 2004 [64], Nowak 2007 [133], Górski 2007 [45], Wiśniewski 2007 [188]), obiektów zabytkowych (Więcek i inni, 2006 [185]) oraz próby zastosowania termografii do pomiarów ilościowych, to jest do wyznaczania wartości całkowitego oporu cieplnego ścian zewnętrznych (Kisilewicz, Wróbel 2008 [66], 2009 [67], Wróbel 2010 [192] oraz Wróbel i inni 2011 [193]). W związku z dostępnością na naszym rynku kamer o coraz to większych możliwościach pomiarowych, od pewnego czasu rozwijane są badania przegród budowlanych za pomocą tzw. termografii aktywnej (Rybiński i inni, 2005 [158], Oliferuk 2008 [146], Nowak, Kucypera 2010 [139], 2010 [140],

2011 [141]). Niezależnie od badań budynków metodą termowizyjną bardzo ważna jest analiza i modelowanie radiacyjnej wymiany ciepła przegród budowlanych z najbliższym otoczeniem budynku – prace z tego zakresu przedstawili: Finger i inni (1979 [36]), Kneubühl i inni (1980 [70]), Givoni (1982 [42], 1991 [43]), Berhdal i inni (1982 [16], 1983 [17]), Martin (1989 [100]), Nowak i inni (1980 [109]), Nowak (1984, [110], 1986 [111], 1987 [112], 1989 [113], [114], 1990 [115], 1991 [116], [117], 1992 [118], [119], 1994 [120], [121], 1995 [122], 1999, [126] i 2001 [129]) oraz Zürcher i inni (1983 [199]).

Zagraniczna literatura tematu dotycząca zastosowania pomiarów termowizyjnych w budownictwie jest bardzo bogata i nie sposób jest tutaj wymienić wszystkich najważniejszych pozycji w poszczególnych grupach problemowych. W tym miejscu można przywołać kilka wybranych ważniejszych pozycji książkowych – jednymi z pierwszych autorów, którzy przedstawili możliwości zastosowania badań termowizyjnych w budownictwie, byli Paljak i Petersson, w roku 1974 wydali książkę na ten temat [149]. Książkę na podobny temat w roku 1980 wydali Pettersson i Axen [150], którzy użyli kamery termowizyjnej do sporządzenia katalogu typowych usterek w izolacji termicznej przegród budowlanych w systemie szwedzkich drewnianych domów szkieletowych oraz do sporządzenia tzw. termogramów odniesienia (patrz rozdz. 6.6). Na uwagę zasługują również następujące wybrane pozycje książkowe, których autorami są: Lloyd (1975, [83]), Gaussorgues (1994, [39]), Dereniak i inni (1996, [31], Wolfe (1996, [191]), Caniou (1999, [24]), Maldague (2001, [89]), Henini i inni (2002, [54]), Breiteinstein i inni (2003, [20]), Jacobs (2006, [58]), Kaplan (2007, [63]), Rogalski (2009, [156]), Vollmer i Mollmann (2010, [198]) oraz Breitenstein i inni (2010, [21]).

Pojawiła się również bardzo duża liczba artykułów w czasopiśmie zagranicznych o różnej randze, niektóre z tych artykułów są przywoływane w dalszej części niniejszej książki. Poniżej przedstawiono krótki opis ważniejszych artykułów w kilku charakterystycznych grupach tematycznych. Wiele artykułów dotyczyło klasycznych termowizyjnych badań budynków (patrz również rozdz. 6.7), można tu wymienić prace, których autorami byli: Grot i inni (1982 [50]), Ljunberg (1994 [81]), Sasaki i inni (1997 [162]), Grinzato i inni (1998 [48]), Titman (2001 [180]), Balaras i inni (2002, [14]), Avdelidis (2003 [8]), Ocana i inni (2004 [143]), Guerrero (2005 [51]), Meola (2005 [101]), Prager i inni (2006 [154]), Meola (2007 [102]) oraz Sham i inni (2010 [165]). Problemy związane z badaniami budynków energooszczędnych przedstawili Heinrich i Dahlem (2000 [52]). Pomiary termowizyjne z powodzeniem od dawna są stosowane do badania obiektów zabytkowych: do określania struktury budynków (Gayo i inni, 1996 [40], Colantonio, 1997 [29], Avdelidis i inni 2004 [9], Meola i inni 2005 [101] i Tavukcuoglu i inni 2005 [179]), struktury mostów ceglanych (Clark i inni 2003 [26], [27]), do badania mikroklimatu w pomieszczeniach muzealnych (Grinzato i inni 2002 [49]) oraz do badania fresków i malowideł (Ambrosini 2010 [3]). Możliwe jest również stosowanie termowizyjnej detekcji zawilgocenia murów, spowodowanych

podciąganiem kapilarnym: Sandrolini i in. (2006 [161]), Barreira i inni (2007 [18]) oraz Kandemir-Yucel i inni (2007 [62]). Do wykrywania wad w strukturach różnych obiektów szeroko jest stosowana tzw. termografia aktywna (patrz rozdz. 6.2.3). Można tu wymienić prace, których autorami są: Shepard (1997 [166]), Vavilov i inni (1997 [196]), Grinzato (1998 [48]), Maldague i inni (1998 [88], 2001 [89], 2002 [90], 2002 [91]), Defer i inni (2002 [30]), Avdelidis i inni (2003 [11], 2004 [10], 2004 [12]), Maierhoffer i inni (2004 [85], 2005 [86] i 2006 [87]), Omar i inni (2005 [147]) oraz Arndt (2006 [5], 2010 [6]). Badania termowizyjne mogą być również stosowane do badania ogniw fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkiem, tzw. BIPV (ang. *Building Integrated Photovoltaics*), (patrz również rozdz. 6.7.8) (Bazilian i inni 2002 [15], Krenzinger i inni 2007 [75]) czy też do badania kominów przemysłowych (patrz również rozdz. 6.7.8) (Vavilov i inni 2002 [197]). Ciekawym i przyszłościowym zagadnieniem jest również szukanie relacji (sprzężenia) między wynikami skanowania laserowego 3D elewacji budynków z termogramami tych elewacji (Laguela i inni 2011 [78]). Ponadto dosyć interesującą i osobną grupę zagadnień stanowi tak zwana termografia lotnicza (ang. *aerial tehermography*), która pozwala na badania, między innymi, dachów i stropodachów budynków (patrz rozdz. 6.7.9) – można tu przywołać prace: Goldstein (1978 [44]), Schmer i inni (1979 [163]), Burch (1980 [22]), Treado i inni (1981 [182]), Scott i inni (1982 [164]), Ljunberg (1987 [82]), Tobiasson (1988 [181]) i Stockton 2006 [171], 2007 [172] i [173].

Badania termowizyjne służą głównie do *jakościowej* oceny przegród budowlanych w zakresie poprawności doboru izolacji cieplnej w przegrodach, tj. do wskazania miejsc nieciągłości lub braku izolacji cieplnej (mostki cieplne), poprzez pomiar wartości temperatury na powierzchni przegrody oraz wskazania zasięgu (obszaru) jej występowania. Badania termowizyjne są również bardzo pomocne do identyfikacji zawilgocenia przegród budowlanych oraz nadmiernej infiltracji powietrza przez przegrody i przez ich złącza. Możliwa jest również ocena *ilościowa* przegród budowlanych, np. określenie współczynnika przenikania ciepła dla ściany zewnętrznej, ale jedynie dopiero po wykonaniu w tym samym czasie dodatkowych pomiarów innych wielkości związanych z przenikaniem ciepła przez badane przegrody. W badaniach usługowych praktycznie niemal zawsze wykonuje się pomiary termowizyjne mające na celu jakościową ocenę przegród budowlanych.

Śledząc aktualne krajowe publikacje na temat zastosowania badań termowizyjnych w budownictwie, tj. artykuły, które ukazały się w Polsce na przestrzeni ostatnich 8–10 lat, można zauważyć i zasygnalizować następujące znamienne zjawiska:

1. Obecnie, w wyniku intensywnego postępu technologicznego produkcji oraz obniżania cen kamer termowizyjnych, są one zdecydowanie bardziej dostępne, co oczywiście jest zjawiskiem korzystnym, a w konsekwencji:

- przy większej liczbie użytkowników (operatorów) kamer termowizyjnych badania w budownictwie wykonują często osoby nieprzygotowane merytorycznie do

tego typu badań (np. wykonywanie badań przy niesprzyjających warunkach meteorologicznych, błędna interpretacja wpływu oddziaływania cieplnego promieniowania nieboskłonu na budynki i interpretacji tzw. średniej temperatury promieniowania nieboskłonu itp.),

- termowizyjne badania budynków wykonują często tzw. „specjaliści” spoza branży budowlanej, tj. osoby z wykształceniem technicznym, ale nie inżynierowie budowlani, którzy dysponują kamerą termowizyjną, ale mają zbyt małą wiedzę (lub całkowity jej brak) z zakresu budownictwa ogólnego i fizyki budowli, brak elementarnej wiedzy o podstawowych elementach konstrukcyjnych budynku i ich połączeniach itp. i którzy w artykułach na konferencjach krajowych i w materiałach publikowanych często stosują złe nazewnictwo, złą dokumentację rysunkową, niewłaściwe schematy połączeń elementów konstrukcyjnych budynku itp.,
- brak lub błędna interpretacja termogramów, co najczęściej jest skutkiem braku podstawowej wiedzy z zakresu budownictwa ogólnego i fizyki budowli, nieznamomości zasad i procedury wykonywania pomiarów termowizyjnych w budownictwie oraz braku wiedzy z zakresu radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego na budynek.

2. Analiza aktualnych krajowych artykułów na temat termowizyjnych badań budynków, tj. artykułów z ostatnich 8–10 lat w czasopismach krajowych i w materiałach konferencji krajowych może prowadzić do wniosku (m.in. na podstawie cytowanej w artykułach literatury), że termowizyjne badania budynków w Polsce rozpoczęły się po 2000 roku, a praktycznie brak jest cytowań artykułów sprzed 2000 roku (oczywiście nie zawsze istnieje taka potrzeba). Jak wykazano, pierwsze termowizyjne badania budynków w Polsce wykonano w połowie lat 70. ubiegłego wieku, czyli ponad 30 lat temu, i od tamtego czasu w prasie technicznej ukazywały się artykuły z tego zakresu.

3. Brak konieczności uzyskania certyfikatu (uprawnień) w Polsce do wykonywania termowizyjnych badań budynków (poziomy I, II i III, obowiązujące w innych krajach, patrz rozdział 6.10). Kilka firm w Polsce organizuje szkolenia z tego zakresu, ale w praktyce świadectwa ukończenia takich kursów mają raczej znaczenie informacyjne, a nie formalne – świadectwo ukończenia takiego kursu informuje, że dana osoba ukończyła kurs, a nie że jest w pełni przygotowana do wykonywania badań termowizyjnych. Brak wymagań uzyskania wspomnianych uprawnień powoduje, że badania termowizyjne budynków wykonują często osoby do tego zupełnie nieprzygotowane merytorycznie, narażające zleceniodawców badań na niepotrzebne koszty.

4. Brak obowiązku wykonywania badań termowizyjnych podczas technicznych odbiorów budynków nowych i poddawanych termomodernizacji – wprowadzenie takiego wymagania formalnego skutkowałoby identyfikacją błędów projektowych i wykonawczych w termicznej obudowie budynków jeszcze przed ich oddaniem do użytkowania.

1.2. Cel i zakres książki

W nawiązaniu do uwag zawartych w rozdziale 1.1, związanych z często występującymi nieprawidłowościami w trakcie termowizyjnej diagnostyki obiektów budowlanych, na bazie wieloletniego doświadczenia pomiarowego Autor podjął próbę uporządkowania i przedstawienia wiedzy niezbędnej do prawidłowego wykonywania badań termowizyjnych w budownictwie, głównie do badań budynków, od momentu przygotowania do badań, poprzez ich prawidłowe wykonanie aż do poprawnej interpretacji termogramów i opracowania raportu końcowego. W książce podjęto również próbę kompleksowego wyjaśnienia oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek i ich wzajemnej interakcji radiacyjnej, której skutki są rejestrowane i wizualizowane kamerą termowizyjną. W pracy położono także szczególny nacisk na wyjaśnienie zjawisk fizycznych występujących w czasie wymiany ciepła przez promieniowanie cieplne (zwane również długofalowym, podczerwonym lub temperaturowym) oraz przez konwekcję między termiczną obudową budynku i środowiskiem zewnętrznym, jak również na problemy związane z prawidłową interpretacją termogramów.

W ramach realizacji celów niniejszej książki przedstawiono podstawy teoretyczne wykonywania badań termowizyjnych w budownictwie, tj. omówiono podstawy wymiany ciepła przez przegrody budowlane, przedstawiono problemy związane z występowaniem mostków cieplnych w budynkach i ich wpływu na rozkład temperatury na powierzchniach granicznych przegród budowlanych, wymianę ciepła przez promieniowanie oraz radiacyjną i konwekcyjną wymianę ciepła budynku ze środowiskiem zewnętrznym. Przedstawiono również główne problemy związane z zastosowaniem badań termowizyjnych w budownictwie, tj. istotę badań termowizyjnych, procedurę i zasady wykonywania pomiarów, termowizyjne badania ilościowe, czynniki wpływające na dokładność pomiarów, zagadnienia związane z interpretacją termogramów, przykłady zastosowania pomiarów w budownictwie (zakres badań, badania budynków o różnym przeznaczeniu, identyfikacja mostków cieplnych, badania balkonów, połączeń dachowych, posadzek z ogrzewaniem podłogowym, badania budynków zabytkowych, badania okien i elewacji przeszklonych, badania obiektów mostowych, w tym nawierzchni drogowych na mostach, termografia lotnicza oraz inne specyficzne zastosowania) oraz proponowany zakres raportu z badań.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do interesującego i obszernego tematu termowizyjnych badań budynków i obiektów budowlanych, z uwzględnieniem historii tych pomiarów w Polsce i na świecie, z krótkim przeglądem literatury krajowej i zagranicznej. Uszczegółowiono również cel i zakres merytoryczny niniejszej książki.

Rozdział drugi wprowadza czytelnika w podstawy wymiany ciepła przez przegrody budowlane w stanie nieustalonym i ustalonym, niezbędne podczas wykonywania i interpretacji termogramów budynków o różnym przeznaczeniu. Omówiono podsta-

wowe właściwości cieplno-fizyczne materiałów budowlanych, których znajomość jest niezbędna do przeprowadzania analiz i symulacji komputerowych przepływu ciepła przez przegrody budowlane oraz przedstawiono podstawowe pojęcia wymiany ciepła. Rozdział zawiera również elementy teorii przewodnictwa cieplnego, w tym omówienie pola temperatury jedno-, dwu- i trójwymiarowego, omówienie nieustalonego przewodzenia ciepła oraz znaczenia dynamiki cieplnej i masy termicznej przegród budowlanych. Przedstawiono także jednokierunkowe ustalone przenikanie ciepła przez ściankę płaską, wpływ usytuowania warstwy izolacji cieplnej w przegrodzie wielowarstwowej na jej właściwości cieplno-wilgotnościowe oraz rozkład temperatury wewnątrz przegrody oraz na jej powierzchniach granicznych.

Badania termowizyjne służą przede wszystkim do identyfikacji różnego rodzaju mostków cieplnych w budynkach, zwłaszcza mostków liniowych. W rozdziale trzecim omówiono mostki cieplne występujące w budynkach o różnym przeznaczeniu, ich wpływ na straty ciepła przez przegrody i na rozkład temperatury na powierzchniach granicznych przegrody, przedstawiono klasyfikację mostków cieplnych oraz różne ich przykłady. Przedstawiono również przykłady analizy numerycznej dwukierunkowego ustalonego przepływu ciepła przez różnego rodzaju ściany zewnętrzne z różnie skonfigurowanymi mostkami cieplnymi oraz przez żelbetowe płyty balkonowe, wskazując jednocześnie, że tego typu analizy obliczeniowe bardzo często są niezbędne w interpretacji termogramów i wysuwaniu poprawnych wniosków z badań. Wskazano także na najczęściej popełniane błędy projektowe i wykonawcze realizacji termicznej obudowy budynków oraz na często występujące zjawisko uzyskiwania pozwolenia na budowę na podstawie projektów, w których przegrody budowlane nie spełniają wymagań w zakresie ochrony cieplnej budynków.

Rozdział czwarty zawiera podstawy teoretyczne badań termowizyjnych, ze zwróceniem szczególnej uwagi na wymianę ciepła przez promieniowanie cieplne przegród budowlanych z najbliższym otoczeniem budynku. Omówiono widmo promieniowania elektromagnetycznego, podstawowe prawa promieniowania ciała czarnego, promieniowanie cieplne obiektów rzeczywistych, właściwości radiacyjne powierzchni ciał stałych, współczynnik emisyjności badanych powierzchni oraz powierzchnie spektralnie selektywne, które mogą stanowić wykończenie powierzchni przegród budowlanych.

W rozdziale piątym przedstawiono systematyczny opis oraz podstawowe pojęcia z zakresu radiacyjnej wymiany ciepła budynku ze środowiskiem zewnętrznym i z sąsiadującymi budynkami. Wymiana ta ma bardzo istotny wpływ na kształtowanie obrazu termalnego zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych, zwłaszcza przy bezchmurnym nieboskłonie w nocy i ma duży wpływ na interpretację termogramów. W związku z tym omówiono promieniowanie cieplne środowiska zewnętrznego, charakter zmienności tego promieniowania, chłodzenie radiacyjne zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych oraz istotę tzw. kalorymetrycznej (średniej) i spektralnej (w pewnym przedziale widmowym) temperatury promieniowania nieboskłonu

w kontekście termowizyjnych badań budynków. Opisano również bilans promienienia i bilans cieplny zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej oraz radiacyjną wymianę ciepła między budynkami.

Rozdział szósty zawiera omówienie głównych problemów związanych z wykonywaniem badań termowizyjnych w budownictwie. Na wstępie przedstawiono rolę diagnostyki termicznej budynków w kontekście coraz bardziej zaostrzających się przepisów w zakresie ochrony cieplnej budynków, ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Następnie opisano założenia klasycznie wykonywanych badań w budownictwie, tj. termografii pasywnej oraz coraz częściej stosowanej termografii aktywnej. Omówiono istotę badań termowizyjnych, tzn. podstawy pomiaru termowizyjnego, zalety i wady metody badawczej, procedurę i zasady wykonywania pomiarów termowizyjnych oraz termowizyjne badania ilościowe. Przedstawiono także czynniki wpływające na dokładność pomiarów termowizyjnych i przyczyny błędów pomiarowych oraz główne zagadnienia związane z bardzo ważnym elementem, jakim jest interpretacja termogramów, z pokazaniem przykładów wraz z komentarzem.

W dalszej części zaprezentowano przykłady badań termowizyjnych w budownictwie, poczynając od omówienia zakresu najczęściej wykonywanych badań, poprzez przykłady klasycznych badań budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej, po zastosowania niestandardowe, jakimi są badania budynków zabytkowych, badania obiektów mostowych czy też tzw. termografia lotnicza (ang. *aerial thermography*). Zamieszczono również szczegółowy komentarz i przykłady dotyczące z pozoru prostego badania, jakim jest badanie przegród przeziernych, tj. okien, drzwi balkonowych i fasad przeszklonych, z uwagami praktycznymi od Autora. Opisano również procedurę wykonywania termogramów okien w komorach klimatycznych z przykładami termogramów. Rozdział zawiera również omówienie badania balkonów, stropodachów, połączeń dachowych, podłóg z ogrzewaniem podłogowym oraz przykłady badań różnych obiektów, takich jak sieci ciepłownicze, kominy przemysłowe, laboratoryjne badania zawilgoconych murów i badania ogniw fotowoltaicznych. Przedstawiono również szczegółowy opis sugerowanego przez autora układu raportu końcowego z termowizyjnych badań budynków. Rozdział kończy omówienie standaryzacji kwalifikacji zawodowych personelu termograficznego, jaki obowiązuje za granicą.

Rozdział siódmy zawiera uwagi końcowe i podsumowanie.

Niniejsza praca stanowi podsumowanie wieloletniego doświadczenia autora w zakresie diagnostyki termicznej budynków o różnym przeznaczeniu i termowizyjnych badań budynków i innych obiektów budowlanych. Autor ma nadzieję, że niniejsza książka będzie skuteczną pomocą zarówno dla osób rozpoczynających badania termowizyjne w budownictwie, jak i tych już zaawansowanych w tego typu badaniach. Z drugiej jednak strony Autor doskonale zdaje sobie sprawę, że mimo próby szczegółowego omówienia niezbędnych zagadnień związanych z wymianą ciepła przez przegrody budowlane, z radiacyjnym oddziaływaniem środowiska zewnętrznego

na budynki, z wykonywaniem badań termowizyjnych w budownictwie oraz z interpretacją termogramów książka nie wyczerpuje wszystkich problemów.

UWAGA: Zdecydowana większość zamieszczonych w książce rysunków i termogramów jest wynikiem badań Autora. Przy rysunkach i termogramach zapożyczonych z innych materiałów są podane powołania na źródło ich pochodzenia.

2. Podstawy wymiany ciepła przez przegrody budowlane

2.1. Właściwości cieplno-fizyczne materiałów budowlanych

Znajomość cieplno-fizycznych właściwości materiałów i wyrobów budowlanych jest niezbędna do wykonywania obliczeń i analiz cieplno-wilgotnościowych dla poszczególnych przegród budowlanych, ograniczających ogrzewaną kubaturę budynków i stanowiących termiczną obudowę budynków, do obliczeń strat i zysków ciepła przez przegrody budowlane, do obliczeń rocznego bilansu energetycznego budynków oraz jest przydatna do analizy i interpretacji termogramów tych przegród. Termiczną obudowę budynku stanowią ściany zewnętrzne, dachy, stropodachy, tarasy, podłogi na gruncie i ściany stykające się z gruntem w pomieszczeniach ogrzewanych, strop nad nieogrzewaną piwnicą itp. Przyjmując do obliczeń stabelaryzowane właściwości cieplne materiałów budowlanych należy oczywiście uwzględnić i przewidzieć rzeczywiste warunki, w jakich będą się one znajdowały. Podstawą do przyjmowania do obliczeń i symulacji komputerowych wartości poszczególnych parametrów materiałowych są dane zawarte w normach, instrukcjach Instytutu Techniki Budowlanej (ITB) w Warszawie oraz w dokumentach wydanych przez laboratoria akredytowane.

Do podstawowych cieplno-fizycznych właściwości materiałów budowlanych, mających zasadniczy wpływ na wymianę ciepła przegród i elementów budowlanych z otoczeniem, a tym samym mających zasadniczy wpływ na rozkład temperatury w przegrodach oraz na ich powierzchniach zewnętrznych i na powierzchniach od strony pomieszczeń, należą: gęstość pozorna (objętościowa), wilgotność materiału, ciepło właściwe, pojemność cieplna, przewodność cieplna, współczynnik wyrównywania temperatury, aktywność cieplna oraz charakterystyki radiacyjne zewnętrznej powierzchni materiałów – współczynniki emisyjności, przepuszczalności, absorpcji i refleksyjności.

Poniżej omówiono wymienione właściwości cieplno-fizyczne materiałów budowlanych.

Gęstość pozorna (masa objętościowa), ρ [kg/m³] – masa jednostki objętości materiału wraz z zawartymi w niej porami w stanie naturalnym, oblicza się ze wzoru:

$$\rho = \frac{m_s}{V_o} \quad (2.1)$$

gdzie: ρ – gęstość pozorna, [kg/m³],

m_s – masa suchej próbki materiału, [kg],

V_o – jednostkowa objętość materiału w stanie naturalnym, [m³].

Gęstość pozorna zależy przede wszystkim od struktury (porowatości) materiału, natomiast dla materiałów w stanie luźnym zależy również od stopnia ich zagęszczenia. Gęstość pozorna materiałów budowlanych zawiera się w bardzo szerokim zakresie ([kg/m³]), w tym:

- 10–30 najlżejsze materiały termoizolacyjne,
- 40–160 cięższe materiały termoizolacyjne (w tym wełna mineralna),
- 550–800 drewno,
- 400–800 mur z betonu komórkowego,
- 900–1200 mur z betonu komórkowego zwykłego,
- 1300–1900 mur z cegły ceramicznej,
- 1900–2400 beton zwykły z kruszywa kamiennego,
- 2500 żelbet,
- 2800 marmur, granit,
- 7800 stal budowlana,
- 8800 miedź.

Jest to bardzo duża rozpiętość i dlatego pozostałe wymienione właściwości, zwłaszcza przewodność cieplna tych materiałów, różnią się między sobą wielokrotnie.

Wilgotność materiałów, W [%] – zawartość swobodnej wody niezwiązanej chemicznie w materiale. Zawartość wilgoci w materiale wyraża się w procentach w stosunku do suchej masy materiału. Wilgotność ma bardzo duży wpływ nie tylko na cechy mechaniczne i trwałość materiału, ale również na pozostałe właściwości cieplno-fizyczne, zwłaszcza na przewodność cieplną materiału, która znacznie wzrasta wraz ze zwiększeniem wilgotności i tym samym zmniejsza izolacyjność cieplną przegród. Wilgotność W oblicza się ze wzoru:

$$W = \frac{m_w - m_s}{m_s} 100 \quad (2.2)$$

gdzie: m_w – masa próbki materiału w stanie wilgotnym, kg,

m_s – masa próbki materiału w stanie suchym, kg.

Ciepło właściwe (względna pojemność cieplna masowa), c_p [kJ/(kg·K)] – ilość ciepła, jaka jest potrzebna do ogrzania 1 kg masy danego materiału o 1 K (pod stałym ciśnieniem). Ciepło właściwe materiałów budowlanych zmienia się w zakresie od 0,75 do 2,5 [kJ/(kg·K)], a największe ciepło właściwe ma woda (4,1868 kJ/(kg·K)). Ciepło właściwe danego materiału zależy przede wszystkim od jego zawilgocenia – wraz ze wzrostem wilgotności wzrasta jego ciepło właściwe. Materiały termoizolacyjne charakteryzują się dużą wartością ciepła właściwego oraz małym współczynnikiem przewodzenia ciepła.

Pojemność cieplna C [kJ/(m³·K)] – iloczyn ciepła właściwego danego materiału i jego gęstości pozornej:

$$C = \rho c_p \quad (2.3)$$

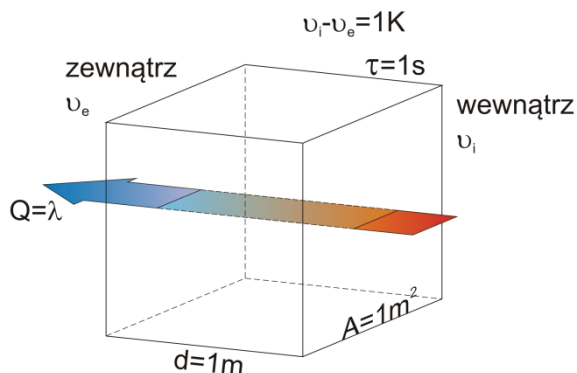
gdzie: ρ – gęstość pozorna, [kg/m³],

c_p – ciepło właściwe, [kJ/(kg·K)].

Pojemność cieplna materiałów poszczególnych warstw przegrody budowlanej oraz kolejność ułożenia tych warstw ma zasadniczy wpływ na akumulację ciepła i na stateczność cieplną przegrody w okresie letnim i zimowym, tj. ma istotny wpływ na dynamiczne cieplne charakterystyki tych przegród (rozdz. 2.3.3). Materiały o większej pojemności cieplnej (o większej masie termicznej) charakteryzują się większą bezwładnością cieplną, tzn. wolniej się nagrzewają i wolniej oddają ciepło do otoczenia, utrzymując jednocześnie w miarę stabilną temperaturę na powierzchni przegród od strony pomieszczeń. To z kolei bardzo korzystnie wpływa na utrzymanie właściwych parametrów mikroklimatu pomieszczeń i na komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach.

Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] – jedna z podstawowych cech materiałów budowlanych w zakresie analizy i cieplno-wilgotnościowych obliczeń przegród budowlanych, decyduje o ich przydatności do wykonywania przegród ograniczających ogrzewaną kubaturę budynków o różnym przeznaczeniu. Przewodność cieplna poszczególnych warstw przegrody, układ tych warstw i występowanie mostków cieplnych w termicznej obudowie budynku determinują obraz termalny przegrody na jej powierzchniach granicznych.

Współczynnik przewodzenia ciepła jest to ilość ciepła, która w warunkach ustalonych przepływa w ciągu 1 s prostopadle przez 1 m² płaskiej ścianki wykonanej z jednorodnego materiału o grubości 1 m i różnicy temperatury na obu powierzchniach 1 K. Jest to zatem, iloraz gęstości strumienia ciepła przewodzonego w stanie ustalonym przez warstwę jednorodnego materiału o grubości 1 m i różnicy temperatury na obu powierzchniach 1 K.



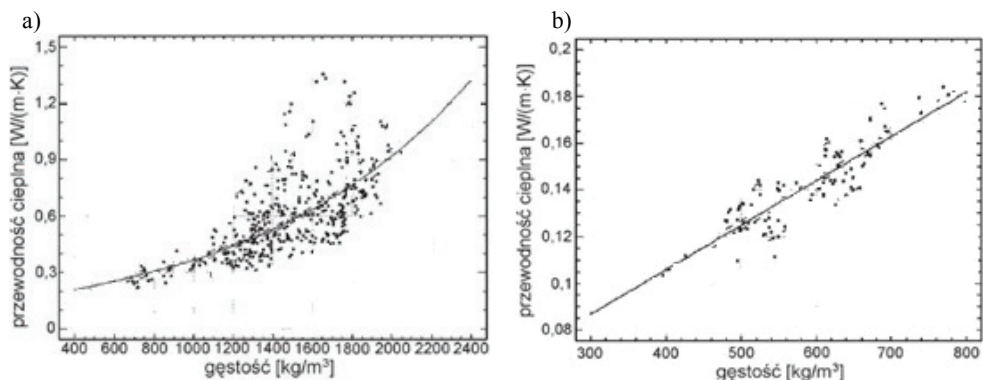
Rys. 2.1. Ilustracja definicji współczynnika przewodzenia ciepła

Wpływ na wartość współczynnika przewodzenia ciepła mają:

- *Gęstość pozorna i struktura materiału* – przewodność cieplna lekkich betonów kruszynowych, keramzytowych i betonów komórkowych wzrasta wraz ze wzrostem gęstości pozornej. Można uogólnić, że im lżejszy materiał (z wymiennych), tym ma lepsze właściwości termoizolacyjne, lecz zależność ta nie jest ściśle proporcjonalna, rys. 2.2.

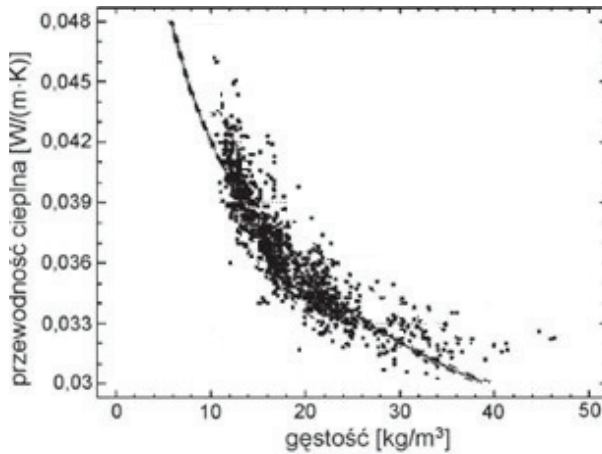
Istotny jest również wpływ struktury materiału – drobne pory w materiale zapewniają lepszą izolacyjność cieplną w porównaniu z porami dużymi. Specyficzne pod tym względem są lekkie materiały termoizolacyjne – współczynnik przewodzenia ciepła tych materiałów poniżej pewnej gęstości zwiększa się wraz z jej zmniejszaniem, rys. 2.3.

- *Zawartość wilgoci w materiale* – praktycznie, zawsze ze wzrostem wilgotności materiału następuje pogorszenie jego właściwości termoizolacyjnych (przewod-



Rys. 2.2. Przewodność cieplna materiałów wg badań ITB:

a) betonów kruszynowych, b) betonu komórkowego (na podstawie [151], [153])



Rys. 2.3. Zmienność przewodności cieplnej styropianu w funkcji gęstości, wg badań ITB (na podstawie [151], [153])

ność cieplna wody jest prawie 20 razy większa niż przewodność powietrza zawartego w porach materiału). Istotne jest również rozmieszczenie wilgoci w materiale, materiały zawilgocone „równomiernie” mają gorsze właściwości izolacyjne od tych zawilgoconych lokalnie. Zawilgocenie wpływa nie tylko destrukcyjnie na materiał, pogarszając znacznie jego cechy izolacyjne, ale również zmienia właściwości radiacyjne powierzchni materiału, co należy uwzględnić w interpretacji zdjęć termowizyjnych.

- *Kierunek przepływu ciepła* – ma znaczenie dla materiałów włóknistych, zwłaszcza dla drewna. Współczynnik przewodzenia ciepła dla drewna podczas przepływu w kierunku prostopadłym do włókien jest blisko dwukrotnie mniejszy od przepływu równoległego (wzdłuż) włókien. Dzieje się tak dlatego, gdyż podczas przepływu prostopadłego strumień ciepła przepływa przez włókna i przez pory powietrzne zawarte między włóknami, natomiast podczas przepływu wzdłuż włókien jedynie przez włókna. Przykładowo, dla drewna sosnowego podczas przepływu ciepła prostopadłego do włókien $\lambda_{\perp} = 0,16$ [W/(m·K)], natomiast podczas przepływu równoległego (wzdłuż) włókien $\lambda_{\parallel} = 0,30$ [W/(m·K)]. Można tym tłumaczyć między innymi fakt, że w domach z bali drewnianych występuje wzrost strat ciepła w narożach budynku.
- *Temperatura materiału* – współczynnik przewodzenia ciepła materiałów zwiększa się wraz ze wzrostem ich temperatury. Zjawisko to ma praktyczne znaczenie jedynie wówczas, gdy materiały są stosowane w wyższej temperaturze, np. jako okładziny kotłów lub przewodów ciepłych, a także w temperaturze bardzo niskiej. Na podstawie badań można założyć, że w naszym klimacie, w zakresie temperatury występującej w budownictwie, tj. w zakresie od -30 °C do $+80$ °C

(np. temperatura papy stropodachu w lecie) współczynniki przewodzenia ciepła praktycznie są stałe i niezależne od temperatury materiału.

UWAGA: Podczas korzystania z tablic normowych w zakresie ochrony cieplnej budynków mieszkalnych, użyteczności publicznej i produkcyjnych wybudowanych do roku 2000, w celu uwzględnienia zawilgocenia materiałów w obliczaniu całkowitego oporu cieplnego przegród budowlanych i tym samym współczynnika przenikania ciepła, współczynnik przewodzenia ciepła należało przyjmować według następujących zasad:

- przegroda budowlana ograniczająca pomieszczenie o obliczeniowej wilgotności względnej powietrza mniejszej niż 75% – jak dla warunków średnio wilgotnych,
- przegroda budowlana ograniczająca pomieszczenie o obliczeniowej wilgotności względnej powietrza równej lub większej niż 75% – jak dla warunków wilgotnych.

Podane uwagi mają znaczenie podczas badań termowizyjnych i analizowania pod względem cieplno-wilgotnościowym przegród budowlanych w budynkach projektowanych i wybudowanych w tamtym okresie, tzn. przed 2000 rokiem.

Wspomnianych obliczeniowych współczynników przewodzenia ciepła nie stosuje się do obliczeń cieplnych w izolacjach przemysłowych pracujących w podwyższonej temperaturze.

Przewodność cieplną materiałów budowlanych określa się doświadczalnie w średniej temperaturze próbki 10 °C lub 23 °C jako tzw. wartość deklarowaną, którą następnie przelicza się na wartość obliczeniową, stanowiącą podstawę do cieplnych obliczeń przegród budowlanych. Jeżeli wartość obliczeniowa jest obliczana z wartości deklarowanej i opiera się na tej samej ocenie statystycznej, to wartość deklarowana powinna być poddana konwersji na warunki obliczeniowe. Stosuje się konwersję ze względu na temperaturę, wilgotność i na starzenie materiału [213].

Wartości deklarowane i obliczeniowe współczynnika przewodzenia ciepła określa się na podstawie wyników badań z wykorzystaniem aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejną, aparatu płytowego z czujnikami gęstości strumienia cieplnego, skrzynki grzejnej lub równoważnymi metodami krajowymi, przeprowadzonymi na próbach o odpowiedniej liczebności. Aby uniknąć konwersji wyników na warunki odniesienia, badania współczynnika przewodzenia ciepła λ powinny być prowadzone w warunkach cieplno-wilgotnościowych zgodnych z tabelą 2.1.

Zasady zaokrąglania wartości deklarowanych są następujące [207]:

$\lambda \leq 0,08$	[W/(m·K)], zaokrąglenie z nadmiarem do 0,001 W/(m·K),
$0,08 < \lambda \leq 0,20$	[W/(m·K)], zaokrąglenie z nadmiarem do 0,005 W/(m·K),
$0,20 < \lambda \leq 2,00$	[W/(m·K)], zaokrąglenie z nadmiarem do 0,01 W/(m·K),
$2,00 < \lambda$	[W/(m·K)], zaokrąglenie z nadmiarem do 0,10 W/(m·K),
R	[m ² ·K/W], zaokrąglenie z niedomiarem do nie więcej niż dwóch miejsc dziesiętnych lub trzech cyfr znaczących.

Tabela 2.1. Warunki odniesienia w podawaniu wartości deklarowanej współczynnika przewodzenia ciepła λ dla materiałów budowlanych [213]

Parametr	Zespół warunków			
	I (10 °C)		II (23 °C)	
	a	b	c	d
Temperatura odniesienia	10 °C	10 °C	23 °C	23 °C
Wilgotność	u_{suchy}	$u_{23/50}$	u_{suchy}	$u_{23/50}$
Starzenie	poddany starzeniu	poddany starzeniu	poddany starzeniu	poddany starzeniu
u_{suchy} – zawartość wilgoci uzyskana przez suszenie $u_{23/50}$ – zawartość wilgoci w warunkach odpowiadających temperaturze 23 °C i wilgotności względnej powietrza 50%				

Konwersja wartości cieplnych z warunków, w których określono współczynniki przewodzenia ciepła λ_1 lub oporu cieplnego R_1 , na wartości λ_2 i R_2 , w innych warunkach, przebiega według następujących wzorów [213]:

- w przypadku współczynnika przewodzenia ciepła:

$$\lambda_2 = \lambda_1 F_T F_m F_a \quad (2.4)$$

- w odniesieniu do oporu cieplnego:

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T F_u F_a} \quad (2.5)$$

gdzie: F_T , F_m , F_a – czynniki konwersji ze względu na, odpowiednio, temperaturę, wilgotność i starzenie (wiek).

Ze względu na temperaturę dokonuje się konwersji według zależności:

$$F_T = e^{f_T(T_2 - T_1)} \quad (2.6)$$

gdzie: f_T – współczynnik konwersji ze względu na temperaturę, 1/K,

T_1 – temperatura z pierwszego zestawu warunków, °C,

T_2 – temperatura z drugiego zestawu warunków, °C.

Ze względu na wilgotność dokonuje się konwersji według jednego z podanych wzorów:

- a) konwersja zawartości wilgotności zdefiniowanej jako stosunek masy wody do masy suchego materiału:

$$F_m = e^{f_u(u_2 - u_1)} \quad (2.7)$$

gdzie: f_u – współczynnik konwersji ze względu na wilgotność jako stosunek masy do masy, kg/kg,

- u_1 – zawartość wilgoci jako stosunek masy do masy dla pierwszego zestawu warunków, kg/kg,
 u_2 – zawartość wilgoci jako stosunek masy do masy dla drugiego zestawu warunków, kg/kg.
 b) konwersja zawartości wilgoci zdefiniowanej jako stosunek objętości wody do objętości materiału:

$$F_m = e^{f_\psi (\psi_2 - \psi_1)} \quad (2.8)$$

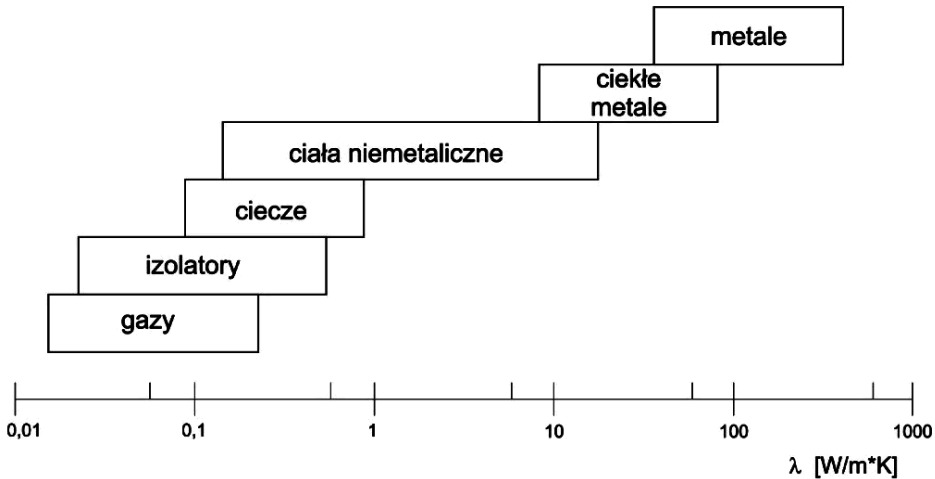
gdzie: f_ψ – współczynnik konwersji ze względu na wilgotność jako stosunek objętości do objętości, m^3/m^3 ,
 ψ_1 – zawartość wilgoci jako stosunek objętości do objętości dla pierwszego zestawu warunków, m^3/m^3 ,
 ψ_2 – zawartość wilgoci jako stosunek objętości do objętości dla drugiego zestawu warunków, m^3/m^3 .

Współczynniki konwersji ze względu na temperaturę, w zakresie od 0 °C do 30 °C oraz na wilgotność i zawartość wilgoci, dla różnych materiałów budowlanych podane są w normie PN-EN ISO 10456 [213].

Konwersja wyników z uwagi na starzenie – dla danego materiału nie ma prostych zasad korelowania starzenia się danego materiału w funkcji czasu. Starzenie materiału zależy od jego rodzaju, struktury, typu okładzin, temperatury i jego grubości. Efekt starzenia dla danego materiału można uzyskać na podstawie modeli teoretycznych potwierdzonych badaniami eksperymentalnymi. Warto zwrócić uwagę, że w normie [208] nie podano żadnych współczynników konwersji do wyznaczania współczynnika konwersji ze względu na starzenie materiału.

Obliczeniowa przewodność cieplna materiałów budowlanych, podobnie jak gęstość pozorna, zawiera się w bardzo szerokim zakresie (rys. 2.4), w $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$, przykładowo:

- 0,025–0,045 – materiały termoizolacyjne (pianka poliuretanowa, wełna mineralna, styropian, styrodur itp.),
- 0,160–0,400 – drewno,
- 0,250–0,380 – mur z betonu komórkowego zwykłego,
- 0,300–0,450 – mur z pustaków ceramicznych drażonych szczelinowych,
- 0,560–0,770 – mur z cegły ceramicznej (dziurawka, kratówka, cegła pełna),
- 0,82 – tynk cementowo-wapienny,
- 1,10 – tynk cementowy,
- 1,0–1,50 – beton zwykły z kruszywa kamiennego,
- 1,70 – żelbet,
- 2,20 – piaskowiec,
- 3,50 – marmur, granit,
- 58,0 – stal budowlana,
- 370,0 – miedź.



Rys. 2.4. Zakresy wartości współczynników przewodzenia ciepła dla różnych materiałów [187]

Na potrzeby projektowania wartości obliczeniowe współczynnika przewodzenia ciepła materiałów i wyrobów budowlanych są podawane w normach w formie tabelaryzowanej, w opracowaniach Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie (lub innego laboratorium akredytowanego w tym zakresie) oraz może być podawany jako wartość deklarowana przez producenta danego materiału (zgodnie z PN-EN 10456: 2008 [213], wartość oczekiwana).

Wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla poszczególnych warstw przegród budowlanych mają oczywiście wpływ na wyniki badań termowizyjnych wykonywanych od zewnątrz i od strony pomieszczenia oraz na wyniki analiz numerycznych dwu- i trójwymiarowego przenikania ciepła przez przegrody budowlane i przez ich złącza, co z kolei rzutuje na właściwą interpretację termogramów.

Współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna) a [m²/s] – dla jednorodnego i nieprzezroczystego materiału oblicza się ze wzoru:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.9)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła, [W/(m·K)],

ρ – gęstość pozorną, [kg/m³],

c_p – ciepło właściwe, [kJ/(kg·K)].

Współczynnik wyrównywania temperatury odnosi się do nieustalonego przewodzenia ciepła i jest obliczany ze wzoru (2.9) na podstawie oddzielnie mierzonych wielkości składowych. Współczynnik a jest miarą stopnia zależności temperatury w punkcie położonym wewnątrz materiału od zmiany temperatury na jego powierzch-

ni. Im większy jest współczynnik wyrównywania temperatury danego materiału, tym temperatura w jego wnętrzu silniej zależy od zmiany temperatury powierzchni.

Aktywność cieplna b [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2})$] – oblicza się ze wzoru:

$$b = \sqrt{\lambda \rho_o c_p} \quad (2.10)$$

Oznaczenia jak we wzorze (2.9). Aktywność cieplna materiału, podobnie jak współczynnik wyrównywania temperatury, odnosi się do nieustalonego przewodzenia ciepła i jest obliczany ze wzoru (2.10) na podstawie oddzielnie mierzonych wielkości składowych. Współczynnik b jest miarą stopnia zależności temperatury powierzchni materiału od zmian gęstości strumienia ciepła na tej powierzchni. Im mniejsza jest aktywność cieplna materiału, tym temperatura powierzchni silniej zależy od zmian gęstości strumienia cieplnego na tej powierzchni.

Właściwości radiacyjne materiałów budowlanych, takie jak współczynniki emisyjności ε , przepuszczalności p , absorpcyjności a i refleksyjności r zostały omówione w rozdziale 4.4. Mają one szczególne znaczenie w analizie radiacyjnej wymiany ciepła przegród budowlanych z otoczeniem. W badaniach termowizyjnych bardzo istotna jest znajomość zwłaszcza współczynnika emisyjności ε badanej powierzchni (dla ciał szarych, jakimi są przegrody budowlane, w danej temperaturze współczynnik emisyjności ε jest równy współczynnikowi absorpcji a).

Niezależnie od wymienionych cieplno-fizycznych właściwości materiałów budowlanych, związanych głównie z wymianą ciepła przez przegrody budowlane, materiały te charakteryzują się również właściwościami charakterystycznymi dla wymiany wilgoci, przede wszystkim dyfuzji pary wodnej w przegrodach – są to: sorpcyjność, kapilarność, paroprzepuszczalność, higroskopijność, współczynnik przepuszczania pary wodnej, współczynnik oporu dyfuzyjnego oraz równoważna pod względem dyfuzyjnym grubość warstwy powietrza. Omówienie tych właściwości oraz procesów fizycznych z tym związanych wychodzi poza zakres niniejszej książki. Zagadnienia te zostały omówione między innymi w pracach [38], [68], [153], [194] i [195].

2.2. Pojęcia podstawowe wymiany ciepła

Przystępując do termowizyjnych badań budynków i innych obiektów budowlanych, należy rozpoznać, w jaki sposób jest wymieniana energia między budynkiem i jego otoczeniem oraz w jaki sposób następuje wymiana ciepła przez przegrody budowlane. Energia jest skalarną wielkością fizyczną, która spełnia zasadę zachowania i która uważana jest za najogólniejszą miarę ruchu materii [169], [187] – energia cieplna (ciepło) jest jedną z postaci energii, podobnie jak energia mechaniczna, chemiczna, świetlna, elektryczna lub jądrowa. Zgodnie z I zasadą termodynamiki, energia

cieplna może powstawać z innych rodzajów energii, a jej przenoszenie w dowolnym ciele lub między różnymi ciałami zachodzi samorzutnie zawsze od miejsc o wyższej temperaturze do miejsc o niższej temperaturze. Energia cieplna wywołuje drgania cząstek lub ich ciągły ruch. Szybkość ruchu cząsteczek ciała nagrzanego, a przez to ilość energii cieplnej zakumulowanej w jednostce masy danego ciała zależy przede wszystkim od jego temperatury. Teoretycznie przyjmuje się, że ruch cząsteczek ustaje całkowicie, jeżeli temperatura ciała obniży się do temperatury zera bezwzględnego 0 K ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). W związku z tym wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się ilość energii cieplnej zakumulowanej w ciele.

Wymiana ciepła występuje wówczas, gdy istnieje różnica temperatury wewnątrz rozpatrywanego układu lub między kilkoma układami mogącymi na siebie wzajemnie oddziaływać. Wówczas następuje wymiana energii cieplnej, a układ o temperaturze wyższej przekazuje ciepło układowi o temperaturze niższej. Niezbędnym warunkiem zatem występowania wymiany ciepła jest istnienie różnicy temperatury.

Wymiana ciepła między rozpatrywanymi układami, np. między budynkiem i środowiskiem zewnętrznym, odbywa się za pomocą trzech istotnie różnych pod względem fizycznym sposobów – są to:

- konwekcja (unoszenie),
- promieniowanie (radiacja),
- przewodzenie (kondukcja).

W praktyce rzadko występują przypadki czystej postaci. Najczęściej występują one równocześnie, ale w zależności od rodzaju ośrodka, w którym odbywa się wymiana ciepła, jeden z nich ma zwykle charakter dominujący. W ciałach stałych wymiana ciepła odbywa się głównie przez przewodzenie, w gazach i cieczach oraz przy omywaniu ciała stałego przez płyn wymiana ciepła odbywa się przez konwekcję, a między oddalonymi od siebie powierzchniami – przez promieniowanie.

Wymiana ciepła przez przegrody budowlane obejmuje wszystkie trzy sposoby wymiany ciepła, tj. na powierzchniach granicznych przegrody (i wewnątrz pustek powietrznych w przegrodzie) przez konwekcję i promieniowanie, natomiast wewnątrz przegrody przez przewodzenie. Jest to wymiana ciepła między dwoma ośrodkami rozdzielonymi ścianką, czyli jest to przenikanie ciepła.

2.2.1. Wymiana ciepła przez konwekcję

Konwekcja jest to wymiana ciepła charakterystyczna dla płynów (ciecze, gazy) i następuje w wyniku ruchu makroskopowych części płynu o różnej temperaturze (o różnej gęstości), tj. w wyniku mieszania się płynu. Warunkiem niezbędnym występowania konwekcji jest ruch ośrodka, w którym występuje wymiana ciepła. Opis formalny zagadnień związanych z wymianą ciepła przez konwekcję jest jednym z trudniejszych problemów termodynamiki i wymaga szczegółowej znajomości warunków

przepływu płynów, w których zachodzi wymiana ciepła. Rozwiązania analityczne są najczęściej możliwe dla najprostszych, wybranych przypadków. Konwekcyjna wymiana ciepła w cieczech jest związana z hydrodynamiką, natomiast wiele zależności matematycznych jest opartych na półempirycznych metodach analizy wymiarowej i teorii podobieństwa. Aby opisać przepływ płynu z wymianą ciepła, należy sformułować układ równań różniczkowych bilansu substancji, pędu i energii z odpowiednimi warunkami jednoznaczności rozwiązania.

Na potrzeby analizy problemów fizyki budowli konwekcyjna wymiana ciepła traktowana jest w sposób uproszczony z wykorzystaniem gotowych rozwiązań z innych dziedzin. Wymiana ciepła przez konwekcję przegród budowlanych jest związana z omywaniem powierzchni granicznych tych przegród (tj. powierzchni zewnętrznych i od strony pomieszczeń) przez poruszające się powietrze o temperaturze różnej od temperatury omywanych powierzchni.

Konwekcja może występować w przestrzeni ograniczonej (np. w pomieszczeniu, w zbiorniku) oraz w przestrzeni otwartej (np. omywanie budynku przez poruszające się powietrze). Konwekcję dzielimy na:

- Konwekcję swobodną (naturalną) – przyczyną ruchu płynu jest różnica gęstości powstała wskutek różnicy temperatury w płynie. Ten rodzaj konwekcji występuje w pomieszczeniach z zamkniętymi oknami (bez przeciągu), podczas wymiany ciepła między powierzchniami przegród budowlanych z poruszającym się bardzo małą prędkością powietrzem (kilka cm/s).
- Konwekcję wymuszoną – w tym wypadku ruch płynu wywołany jest przez czynniki wymuszające, np. przez wentylatory lub wiatr. Ten rodzaj konwekcji występuje podczas wymiany ciepła zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych z powietrzem zewnętrznym.
- Konwekcję mieszaną – w tym wypadku ruch cząsteczek jest wywołany zarówno przez czynniki zewnętrzne, jak i przez różnicę gęstości płynu (powietrza).

Różnica gęstości powietrza, będąca efektem różnicy temperatury w pomieszczeniu i temperatury powierzchni przegrody, powoduje nieznaczny ruch powietrza w kierunku przegrody, a ciepło unoszone tym ruchem jest ciepłem napływu. Ciepło napływu i odpływu, powstające na skutek konwekcji nazywamy ciepłem przejmowania przez powierzchnię i ciepłem przejmowania z powierzchni przegrody. Na zewnętrznej stronie przegród budowlanych wymiana ciepła przez konwekcję zależy przede wszystkim od prędkości wiatru, chropowatości i konfiguracji powierzchni przegrody.

Przejmowanie ciepła, tj. wymianę ciepła między powierzchnią ciała stałego i opływającym ją płynem, opisuje równanie Newtona:

$$q_c = h_c (t_p - t_s) \quad (2.11)$$

gdzie: q_c – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję, [W/m²],
 h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, [W/(m²·K)],

t_p – temperatura płynu w dużej odległości od ścianki, [°C].

t_s – temperatura ścianki, [°C],

W przypadku wymiany ciepła przegród budowlanych, np. ściany, z powietrzem w pomieszczeniu, równanie (2.11) można zapisać:

$$q_{ci} = h_{ci}(t_i - v_i) \quad (2.12)$$

gdzie: q_{ci} – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję przez powierzchnię przegrody od strony pomieszczenia, [W/m²],

h_{ci} – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, [W/(m²·K)],

t_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, [°C],

v_i – temperatura powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, [°C].

Podobnie po zewnętrznej stronie przegrody:

$$q_{ce} = h_{ce}(v_e - t_e) \quad (2.13)$$

gdzie: q_{ce} – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję przez zewnętrzną powierzchnię przegrody, [W/m²],

h_{ce} – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na zewnętrznej powierzchni przegrody, [W/(m²·K)],

t_e – temperatura powietrza zewnętrznego, [°C],

v_e – temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody, [°C].

Odejmowanie wielkości w nawiasach we wzorach (2.11)–(2.13) podyktowane jest przyjęciem odpowiedniego znaku dla strat i zysków ciepła przez konwekcję dla rozpatrywanej powierzchni.

Należy zwrócić uwagę, że prostota równań (2.11)–(2.13) jest pozorna, a zasadnicza trudność polega na wyznaczeniu współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję h_e , który jest funkcją wielu zmiennych. Jego wartość zależy przede wszystkim od kształtu i chropowatości rozpatrywanej powierzchni, od termofizycznych właściwości płynu (w tym wypadku powietrza), od jego temperatury, ciśnienia, gęstości, lepkości, współczynnika przewodzenia ciepła oraz od prędkości, kierunku i charakteru przepływu (laminarny, burzliwy). Szczególnie trudne jest wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję dla zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych, gdyż jego wartość zależy od prędkości wiatru, od chropowatości i konfiguracji powierzchni przegród (gzymsy, balkony, loggie, wykusze, elementy architektoniczne, lukarny itp.). W obliczeniach inżynierskich stosuje się stabelaryzowane wartości współczynników h_{ci} i h_{ce} , a na potrzeby fizyki budowli korzysta się z uproszczonych formuł empirycznych. Przykładowo, współczynnik przejmowania ciepła przez ścianę od strony pomieszczenia można obliczać ze wzoru:

$$h_{ci} = 1,53(\Delta t)^{1/3} \quad (2.14)$$

gdzie Δt [°C] – różnica temperatury powietrza w pomieszczeniu i powierzchni ściany.

Różnica ta może wynosić od 1 °C do nawet 6–8 °C, przy małym oporze cieplnym przegrody. Natomiast współczynnik przejmowania ciepła po zewnętrznej stronie ściany zależy zasadniczo od prędkości wiatru i można obliczać ze wzoru:

$$h_{ce} = a + bv \quad (2.15)$$

gdzie: a, b – współczynniki wyznaczone doświadczalnie,
 v – prędkość wiatru w pobliżu powierzchni, [m/s].

Wzór (2.15) może mieć postać [209]:

$$h_c = 4,0 + 4,0v \quad (2.16)$$

Należy jednak wyraźnie podkreślić, że wyznaczenie dokładnej wartości współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję na zewnętrznej powierzchni przegrody jest bardzo trudne [69], natomiast wzory w postaci (2.14)–(2.16) mają charakter przybliżony. W przypadku dużej prędkości wiatru (co najmniej kilka m/s) udział konwekcji w stratach ciepła z zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych (głównie ścian, okien i dachów) może być wiodący. Wówczas rozkład temperatury na tych powierzchniach nie w pełni odzwierciedla właściwości termoizolacyjne przegród. Stąd zaleca się, aby pomiary termowizyjne budynków były wykonywane przy możliwie bezwietrznej pogodzie lub małej prędkości wiatru do 2 m/s. Jeżeli w trakcie pomiarów termowizyjnych występuje prędkość wiatru powyżej 2 m/s, należy stosować odpowiednie współczynniki korekcyjne. Pomiarów termowizyjnych absolutnie nie powinno się wykonywać przy prędkości wiatru powyżej 5,0 m/s (rozdz. 6.3.5).

2.2.2. Wymiana ciepła przez promieniowanie

Promieniowanie jest przepływem ciepła odbywającym się za pośrednictwem fal elektromagnetycznych. Powierzchnie wszystkich ciał o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego (wyższej od $-273,15$ °C) są źródłami promieniowania cieplnego o natężeniu zależnym od wartości współczynnika emisyjności powierzchni, od jej temperatury i od długości fali promieniowania. Termin promieniowanie oznacza zarówno emitowanie energii w postaci fal elektromagnetycznych przez dany obiekt, jak i produkt tej emisji, tj. przemieszczający się strumień fotonów. Promieniowanie podczerwone jest niewidoczne dla oczu człowieka.

W odróżnieniu od przewodzenia i konwekcji, promieniowanie nie wymaga ośrodka materialnego, w którym mogłoby się rozchodzić i związku z tym jest możliwe również w próżni, gdzie prędkość rozchodzenia się jest największa i wynosi $c_o = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s (jedna z podstawowych stałych fizycznych).

Ciało o temperaturze poniżej 525 °C emituje fale w zakresie promieniowania podczerwonego, natomiast o temperaturze powyżej 525 °C jest źródłem promieniowania

widzialnego (długość fal od 0,45 do 0,75 μm) i wówczas tylko część widma promieniowania takiego ciała znajduje się w podczerwieni [155].

Promieniowanie cieplne (emisja i absorpcja fotonów) zachodzi w całej objętości rozpatrywanego ciała. Można jednak wykazać, że promieniowanie cieplne ciał stałych i cieczy jest traktowane (z nielicznymi wyjątkami) jako zjawisko powierzchniowe [74], co znajduje swoje przełożenie w opisie matematycznym radiacyjnej wymiany ciepła.

Emisji promieniowania cieplnego przez dane ciało towarzyszy pochłanianie promieniowania docierającego z zewnątrz – proces ten przebiega w sposób ciągły. Obie te składowe mogą się równoważyć i wówczas obiekt jest w stanie równowagi termodynamicznej. W przypadku gdy dwa ciała oddziałują na siebie radiacyjnie, a ich temperatury nie są sobie równe, wówczas wypadkowy radiacyjny strumień ciepła będzie przepływał od ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze – zjawisko to jest wymianą ciepła przez promieniowanie.

Promieniowanie cieplne jest promieniowaniem elektromagnetycznym i dlatego można je opisać częstotliwością f , długością fali λ oraz prędkością c , według zależności:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.17)$$

Promieniowanie cieplne, jako promieniowanie elektromagnetyczne, podlega takim samym prawom ogólnym jak inne rodzaje fal elektromagnetycznych, tj. prawom: odbicia, załamania, pochłaniania itd. Podstawową wielkością dotyczącą promieniowania jest moc (natężenie) promieniowania, którą można odnosić do emisji energii przez źródło (moc emitowana), do pochłaniania (moc absorbowana) lub do przenoszenia energii (moc transmitowana) [74].

W przypadku zakresu temperatury spotykanej w budownictwie w granicach od -30 do $+80$ $^{\circ}\text{C}$ ($+80$ $^{\circ}\text{C}$ – tę wartość może osiągnąć temperatura papy stropodachu pełnego w lecie), promieniowanie cieplne zachodzi w umownym zakresie długości fal od $\lambda = 3,0$ do $50,0$ μm (w rzeczywistości występuje do $1000,0$ μm , ale natężenie promieniowania cieplnego w przedziale od 50 do 1000 μm jest pomijalnie małe). Dla przypomnienia – umowny zakres długości fal promieniowania słonecznego (krótkofalowego) wynosi od $0,3$ do $3,0$ μm (patrz również rozdział 4.1 i 5.1).

Wpływ wymiany ciepła przez promieniowanie wzrasta proporcjonalnie do wzrostu temperatury powierzchni ciała (np. przegrody budowlanej lub urządzenia) wymieniającej ciepło. Rozchodzenie się ciepła przez promieniowanie występuje w budynkach głównie podczas wydzielania energii cieplnej przez powierzchnie grzejne grzejników, pieców, przewodów c.o. itp. oraz oczywiście przez powierzchnie przegród budowlanych.

Gęstość radiacyjnego strumienia ciepła q_r , emitowanego przez daną powierzchnię można obliczać, między innymi, ze wzoru:

$$q_r = h_r (t_r - v_s) \quad (2.18)$$

gdzie: q_r – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła emitowanego przez daną powierzchnię, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

h_r – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie danej powierzchni, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,

t_r – średnia temperatura promieniowania w pomieszczeniu, $[\text{°C}]$,

v_s – temperatura rozważanej powierzchni, $[\text{°C}]$.

Dla powierzchni przegrody budowlanej od strony pomieszczenia wzór (2.18) przyjmuje postać:

$$q_{ri} = h_{ri} (t_{ri} - v_i) \quad (2.19)$$

gdzie: q_{ri} – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła emitowanego przez powierzchnię przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

h_{ri} – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,

t_{ri} – średnia temperatura promieniowania w pomieszczeniu, $[\text{°C}]$,

v_i – temperatura powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, $[\text{°C}]$.

Dla zewnętrznej powierzchni przegrody:

$$q_{re} = h_{re} (t_{re} - v_e) \quad (2.20)$$

gdzie: q_{re} – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

h_{re} – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie zewnętrznej powierzchni przegrody, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,

t_{re} – średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego, $[\text{°C}]$,

v_e – temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody, $[\text{°C}]$.

Wymiana ciepła przez promieniowanie długofalowe (cieplne) przegród budowlanych i budynku z najbliższym otoczeniem ma fundamentalne znaczenie i wpływ na wyniki pomiarów termowizyjnych oraz na interpretację termogramów. Podstawowe prawa promieniowania ciała czarnego i promieniowania obiektów rzeczywistych przedstawiono w rozdziale 4, natomiast radiacyjną wymianę ciepła budynku z najbliższym otoczeniem omówiono w rozdziale 5.

2.2.3. Wymiana ciepła przez przewodzenie

Przewodzenie ciepła jest zjawiskiem polegającym na przenoszeniu energii wewnątrz ośrodka materialnego lub z jednego ośrodka do drugiego przy ich bezpośrednim zetknięciu się z miejsc o temperaturze wyższej do miejsc o temperaturze niższej,

przy czym poszczególne cząstki rozpatrywanego układu nie wykazują większych zmian położenia. Warunkiem przewodzenia ciepła jest występowanie różnicy temperatury. Ten sposób wymiany ciepła jest charakterystyczny dla ciał stałych i dominuje przy przepływie ciepła przez przegrody budowlane.

W cieczech oraz w gazach przewodzenie ciepła w czystej postaci nie występuje bez równoczesnego udziału innych sposobów wymiany ciepła. Tam energia ciepła przewodzonego przenosi się przede wszystkim dzięki bezwładnemu zderzaniu się cząstek.

Wymianę ciepła przez przewodzenie omówiono w rozdziale 2.3.

2.2.4. Złożona wymiana ciepła

Na powierzchniach granicznych przegrody budowlanej, tj. na powierzchni od strony pomieszczenia oraz na powierzchni zewnętrznej, wymiana ciepła odbywa się przez konwekcję i promieniowanie – jest to tzw. złożona wymiana ciepła, zwana również przejmowaniem ciepła. Zakłada się, że gęstość strumienia ciepła na rozpatrywanej powierzchni przegrody budowlanej jest równa sumie gęstości strumieni ciepłych przekazywanych przez konwekcję i promieniowanie (patrz również rys. 2.12):

$$q = q_c + q_r \quad (2.21)$$

Na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia zachodzi związek:

$$q_i = q_{ci} + q_{ri} \quad (2.22)$$

$$q_i = h_{ci}(t_i - v_i) + h_{ri}(t_{ri} - v_i) \quad (2.23)$$

Oznaczenia jak we wzorach (2.18)–(2.20).

W pomieszczeniach ogrzewanych temperatura powietrza jest zbliżona do średniej temperatury promieniowania ($t_i \approx t_r$). Stąd dla powierzchni przegrody od strony pomieszczenia można zapisać:

$$q_i = (h_{ci} + h_{ri})(t_i - v_i) = h_{si}(t_i - v_i) \quad (2.24)$$

gdzie $h_{si} = h_{ci} + h_{ri}$ jest współczynnikiem przejmowania ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia (współczynnik napływu ciepła), pozostałe oznaczenia jak w poprzednich wzorach.

Zachodzi zależność:

$$\frac{1}{h_{si}} = R_{si} \quad (2.25)$$

gdzie R_{si} – opór wnikanie ciepła, [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$].

Podobnie dla zewnętrznej powierzchni przegrody zachodzą zależności:

$$q_e = q_{ce} + q_{re} \quad (2.26)$$

$$q_e = h_{ce}(t_e - v_e) + h_{re}(t_{re} - v_e) \quad (2.27)$$

gdzie t_{re} jest średnią temperaturą promieniowania środowiska zewnętrznego, która dla powierzchni poziomej (powierzchnia gruntu, zewnętrzna powierzchnia stropodachu) jest średnią temperaturą promieniowania nieboskłonu (rozdz. 5.3). W obliczeniach inżynierskich z zakresu fizyki budowli przyjmuje się, że temperatura powietrza zewnętrznego t_e i średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego t_{re} są sobie równe ($t_e \approx t_{re}$). Stąd:

$$q_e = (h_{ce} + h_{re})(t_e - v_e) = h_{se}(t_e - v_e) \quad (2.28)$$

gdzie $h_{se} = h_{ce} + h_{re}$ jest współczynnikiem przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody (współczynnik odpływu ciepła), pozostałe oznaczenia jak w poprzednich wzorach.

Należy wyraźnie podkreślić, że założenie równości temperatury powietrza zewnętrznego i średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego ($t_e \approx t_{re}$), reprezentującej wpływ cieplnego promieniowania otoczenia, znacznie ułatwia obliczenie przenikania ciepła przez przegrody budowlane oraz wyznaczenie rozkładu temperatury w przegrodach, ale jednocześnie stanowi znaczne uproszczenie występujących zjawisk fizycznych. Założenie równości tych dwóch temperatur oznacza, że w obliczeniach wpływ cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego uwzględnia się w sposób nieodzwierciedlający rzeczywistych radiacyjnych zmian tego środowiska i jego oddziaływania na przegrody budowlane. W rzeczywistości temperatury te nie są sobie równe – według badań Swinbanka [174] i Nowaka [113] średnia temperatura promieniowania nieboskłonu, przy bezchmurnym niebie w nocy, może być niższa od temperatury powietrza o około 20–25 °C (uwzględniając cały zakres widmowy cieplnego promieniowania nieboskłonu). Tak znaczne różnice między temperaturami t_e oraz t_{re} powodują często występowanie temperatury zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych (zwłaszcza stropodachów) niższej o kilka stopni od temperatury otaczającego powietrza (tzw. chłodzenie radiacyjne), co ściśle jest związane ze znacznymi stratami ciepła przez promieniowanie. Problem ten omówiono w rozdziale 5.3. Z drugiej jednak strony założenie równości temperatur ($t_e \approx t_{re}$) w fizyce budowli ma już wieloletnią tradycję, również poza granicami naszego kraju, gdyż znacznie upraszcza obliczenia inżynierskie podstawowych cieplnych charakterystyk przegród budowlanych.

Analogicznie do równania (2.25) zachodzi zależność:

$$\frac{1}{h_{se}} = R_{se} \quad (2.29)$$

gdzie R_{se} – opór wynikania ciepła, [$m^2 \cdot K/W$].

Opory wnikania ciepła R_{si} oraz wynikania ciepła R_{se} odczytywane z tablic w normach są uwzględniane w obliczaniu współczynników przenikania ciepła przegród budowlanych oraz w wyznaczaniu rozkładu temperatury w przegrodach (rozdział 2.4.2).

2.3. Podstawy teorii przewodnictwa cieplnego

2.3.1. Pole temperatury

Wymiana ciepła w danym układzie termokinetycznym, jak wspomniano wcześniej, występuje pod wpływem różnicy temperatury. Przy rozpatrywaniu wymiany ciepła konieczna jest znajomość *pola temperatury*, które jest obrazem stanu energetycznego analizowanego układu termokinetycznego.

Pole temperatury jest to zbiór wartości temperatury we wszystkich punktach rozpatrywanego ciała w danej chwili, tj. w funkcji czasu. Jest to zatem zależność funkcyjna temperatury od współrzędnych przestrzennych (np. kartezjańskich x , y i z) oraz od czasu τ .

Pole temperatury może być *nieustalone* (niestacjonarne, tj. zależne od czasu) oraz *ustalone* (stacjonarne, tj. niezależne od czasu). Niekiedy rozróżnia się jeszcze jeden typ pola temperatury, a mianowicie pole „niby-ustalone”, inaczej *quasi-stacjonarne* (quasi-ustalone). Jest to pole temperatury charakteryzujące się cyklicznymi zmianami w czasie, przy czym średnie wartości temperatury we wszystkich punktach muszą być niezmiennie w czasie. Taki stan występuje np. podczas badań materiałów budowlanych w pewnych typach komór klimatycznych. Zaliczając pole temperatury do ustalonego, nieustalonego lub quasi-stacjonarnego przyjęto za wyróżnik stan tego pola w czasie. Innego podziału pól temperatury można dokonać, przyjmując za wyróżnik stan pola w przestrzeni – może to być zbiór jednorodny i wówczas pole temperatury jest *ekwiskalarne*.

Innym kryterium podziału pola temperatury jest podział w zależności od liczby współrzędnych przestrzeni, w kierunku których zmienia się temperatura – pole temperatury oraz wymiana ciepła mogą być jedno- (1D), dwu- (2D) i trójwymiarowe (3D).

Najczęściej określenie pola temperatury wymaga jednoczesnego uwzględnienia jego stanu w czasie i w przestrzeni i wówczas stosuje się dwuprzymiotnikowy wyróżnik, np. dwuwymiarowe nieustalone pole temperatury.

Poniżej przedstawiono podstawowy podział pól temperatury, jakie mogą występować w termicznej obudowie budynków.

Nieustalona wymiana ciepła przez przegrody budowlane:

$t = f(x, y, z, \tau)$ trójwymiarowe nieustalone pole temperatury,
 $t = f(x, y, \tau)$ dwuwymiarowe nieustalone pole temperatury,

$t = f(x, \tau)$ jednowymiarowe nieustalone pole temperatury.

Ustalona wymiana ciepła przez przegrody budowlane (szczegółowe założenia obliczeniowe przedstawiono w rozdziale 2.4) – z równań opisujących tę wymianę ciepła wyeliminowano czas τ :

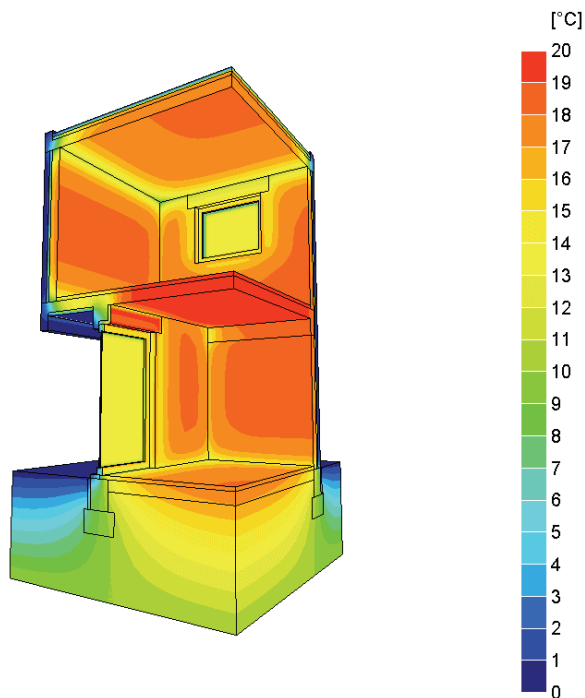
$t = f(x, y, z)$ trójwymiarowe ustalone pole temperatury,

$t = f(x, y)$ dwuwymiarowe ustalone pole temperatury,

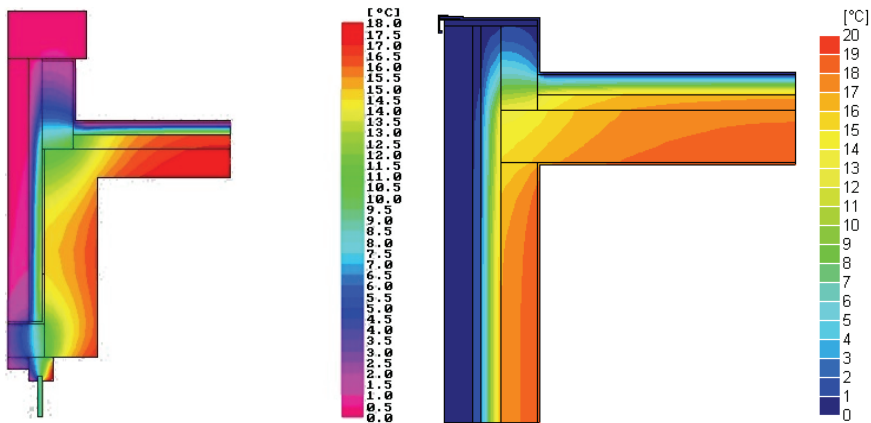
$t = f(x)$ jednowymiarowe ustalone pole temperatury.

Na bazie ostatniego warunku dla stanu ustalonego (jednokierunkowy przepływ ciepła) wyprowadzono wzory na obliczanie wartości współczynnika przenikania ciepła U przegród budowlanych oraz na obliczanie ustalonego rozkładu temperatury w przegrodach.

Proces przenikania ciepła w warunkach ustalonych, tj. w warunkach, gdy wszystkie parametry wymiany ciepła są stałe w czasie, jest najprostszym przypadkiem przenikania ciepła. Procedury obliczeniowe są podobne do stosowanych w nieustalonym procesie przenikania ciepła, lecz o założeniu niezmienności parametrów wymiany ciepła w czasie. W większości przypadków rozpatrywanych w fizyce budowli zamodelowanie przepływu ciepła przy założeniu stanu ustalonego daje wystarczająco dokładne rezultaty.



Rys. 2.5. Przykład ustalonego trójwymiarowego (3D) pola temperatury w budynku, wyniki symulacji komputerowej [96]



Rys. 2.6. Przykłady ustalonego dwuwymiarowego (2D) pola temperatury w przegrodach budowlanych [96]

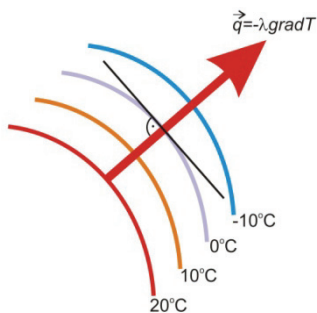
Na rysunkach 2.5 i 2.6 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji komputerowych trójwymiarowego i dwuwymiarowych pól temperatury w przegrodach budowlanych.

Z pojęciem pola temperatury jest związana wielkość nazywana gradientem temperatury. Aby wyjaśnić sens fizyczny tej wielkości, należy wprowadzić pojęcie powierzchni izotermicznej – jest to zbiór punktów przestrzeni o jednakowej temperaturze (zbiór punktów powierzchni o jednakowej temperaturze tworzy linię izotermiczną). Ponieważ w ustalonym polu temperatury w tym samym punkcie nie może być dwóch różnych wartości temperatury, oznacza to, że powierzchnie izotermiczne (lub linie) o różnej temperaturze nie przecinają się i tworzą albo powierzchnie (lub linie) zamknięte, albo kończą się na granicach rozpatrywanego układu (przegrody budowlanej). Temperatura w układzie (przegrodzie) zmienia się jedynie w kierunkach przecinających powierzchnie izotermiczne, a największa zmiana temperatury występuje w kierunkach normalnych do izoterm (powierzchni izotermicznych). Zmianę tę w kierunku wzrastającej temperatury nazywa się gradientem temperatury, a kierunek gradientu temperatury jest zgodny z kierunkiem normalnej do powierzchni izotermicznej (rys. 2.7).

Z pojęciem pola temperatury są związane podstawowe pojęcia wymiany ciepła, a mianowicie: ilość ciepła (ciepło), strumień cieplny i gęstość strumienia cieplnego.

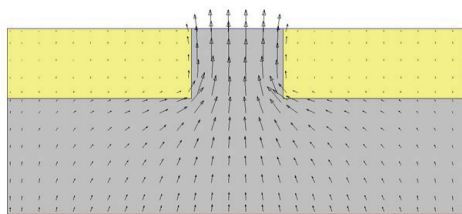
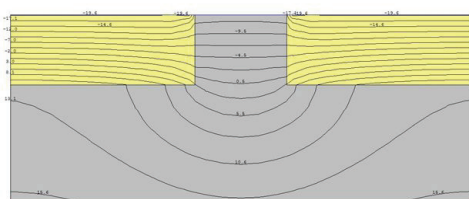
Ilość ciepła Q [J] jest to ilość energii przeniesionej bez wykonania pracy mechanicznej. Natomiast strumień ciepła Φ [W] jest to stosunek elementarnej ilości ciepła dQ do czasu trwania wymiany τ (lub inaczej, jest to ilość ciepła wymieniana w ciągu jednej sekundy, J/s = W):

$$\Phi = \frac{dQ}{d\tau} \quad (2.30)$$

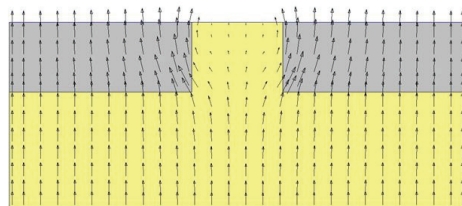
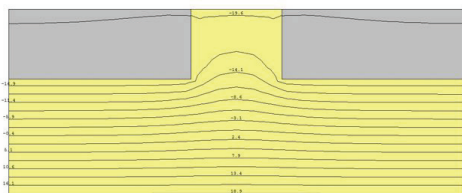


Rys. 2.7. Ilustracja graficzna gradientu temperatury

a)



b)



Rys. 2.8. Przykładowe wektory gęstości strumienia ciepła oraz powierzchnie izotermiczne dla ściany zewnętrznej z liniowym mostkiem cieplnym – ściany zbudowane z materiałów o skrajnie różnych właściwościach cieplnych: a) ściana żelbetowa ocieplona od zewnątrz styropianem, b) „ściana styropianowa” z okładziną zewnętrzną z żelbetu

Strumień przewodzonego ciepła jest proporcjonalny do różnicy temperatury oraz do pola powierzchni, przez którą przepływa, a odwrotnie proporcjonalny do grubości elementu. Strumień przewodzonego ciepła zależy również od właściwości fizycznych ciała, głównie od współczynnika przewodzenia ciepła λ .

Gęstość strumienia ciepłego q [W/m²] jest to stosunek strumienia ciepłego Φ [W] do pola powierzchni A [m²], przez którą przepływa:

$$q = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2.31)$$

Wektory gęstości strumienia ciepłego są położone na powierzchniach prostopadłych do powierzchni izotermicznych i skierowane zgodnie ze spadkiem temperatury

(rys. 2.8). Są to powierzchnie adiabatyczne, ponieważ w kierunku do nich prostopadłym (tj. stycznym do powierzchni izotermicznych) gęstości strumieni ciepłych są równe zero. Izotermy i adiбаты pola temperatury tworzą na płaszczyźnie linie prostopadłe. Na zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych najczęściej podaje się (mierzy) składowe gęstości strumieni ciepłych w kierunku prostopadłym do powierzchni przegrody. Należy również pamiętać, że płaszczyzna lub oś symetrii pola temperatury jest płaszczyzną lub linią adiabatyczną – tę właściwość wykorzystuje się w numerycznych obliczeniach mostków termicznych przy wprowadzaniu geometrii mostków i formułowaniu warunków brzegowych analizowanej wymiany ciepła.

2.3.2. Nieustalone przewodzenie ciepła w ciałach stałych

Model matematyczny przewodzenia ciepła w ciałach stałych obejmuje matematyczne sformułowanie prawa przewodzenia ciepła, równania różniczkowego bilansu energii oraz podanie warunków jednoznaczności jego rozwiązania.

Przewodzenie ciepła w nieprzezroczystych ciałach stałych opisuje *prawo Fouriera*, które brzmi – gęstość przewodzonego strumienia ciepła jest wprost proporcjonalna do gradientu temperatury mierzonego wzdłuż kierunku przepływu ciepła i oblicza się ze wzoru:

$$q = -\lambda \text{grad} T = -\lambda \nabla T \quad (2.32)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła, [W/(m·K)],

T – temperatura, [K],

∇ – operator Hamiltona.

W postaci skalarnej w polu jednowymiarowym wzór (2.32) można wyrazić w postaci:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.33)$$

Znak minus we wzorach (2.32) i (2.33) wynika z faktu, że ciepło płynie zgodnie ze spadkiem temperatury i występuje „ujemny przyrost” temperatury (odcinkowi dx wzdłuż kierunku przepływu ciepła odpowiada ujemna wartość przyrostu temperatury $-dT$). Prawo Fouriera umożliwia obliczenie gęstości strumienia ciepła i jest pomocne w wyznaczaniu strumieni ciepłych w stanie ustalonym (stacjonarnym).

Podstawą tworzenia modelu nieustalonej wymiany ciepła przegród budowlanych z otaczającym środowiskiem jest równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych, tj. *równanie Fouriera*, uzupełnione równaniami przejmowania ciepła przez konwekcję i przez promieniowanie. Równanie Fouriera, przy założeniu stałej, tj. niezależnej od temperatury, wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ ($\lambda = f(T) = \text{const}$) oraz braku wewnętrznych źródeł ciepła, jest postaci:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho_o c_p} \nabla^2 T = a \nabla^2 T \quad (2.34)$$

gdzie a jest współczynnikiem wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna, wzór (2.9)), natomiast $\nabla^2 T$ jest laplasjanem temperatury, który w układzie współrzędnych prostokątnych ma postać:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.35)$$

Dla ustalonego stanu przepływu ciepła równanie (2.34) upraszcza się, ponieważ temperatura nie ulega zmianie w czasie ($T = T(x, y, z) = \text{const}$) i wówczas:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \quad (2.36)$$

Nieustalone przewodzenie ciepła (równanie (2.34)) może być rozważane również w sytuacji, gdy iloczyn (ρc_p) oraz współczynnik λ są zależne od temperatury lub gdy co najmniej jedna z tych wielkości jest zależna od temperatury – mamy wówczas do czynienia z tzw. *zagadnieniami nieliniowymi*. W przypadku gdy wymienione parametry można uznać za niezależne od temperatury, *zagadnienie jest liniowe*.

Równanie przewodnictwa (równanie Fouriera) może być również zapisane we współrzędnych walcowych i kulistych, z uwzględnieniem wydajności wewnętrznych źródeł ciepła oraz dla zagadnień nieliniowych [169], [187].

Rozwiązanie równania przewodnictwa cieplnego umożliwia określenie pola temperatury w dowolnym punkcie rozpatrywanego obszaru nieprzezroczystego (przegrody budowlanej). Założenie o nieprzezroczystości analizowanego obszaru jest bardzo istotne, ponieważ w przeciwnym razie ciepło byłoby przenoszane przez promieniowanie, co zmieniałoby obraz pola temperatury.

Równanie Fouriera dla jednokierunkowego przewodzenia ciepła, np. przez nieprzezroczystą przegrodę budowlaną, jest postaci:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho_o c_p} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (2.37)$$

gdzie: τ – czas, [s],

x – współrzędna (w układzie kartezjańskim) normalna względem powierzchni przegrody, określająca położenie punktu, [m],

$T(x, \tau)$ – zależność funkcyjna temperatury od położenia punktu i czasu,

λ, ρ, c_p – odpowiednio, współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)], gęstość pozorną [kg/m³] i ciepło właściwe [kJ/(kg·C)].

Stałość współczynników λ, ρ i c_p jest konsekwencją przyjęcia założenia niezmienności w czasie tych wielkości w zakresie temperatury spotykanej w budownictwie

oraz założenia jednorodności i izotropowości materiałów przegrody. Założenie jednowymiarowości pola temperatury przyjmuje się w większości problemów rozwiązywanych na potrzeby fizyki budowli. Przestaje ono jednak wystarczać do oceny cieplnych właściwości przegród budowlanych w tak zwanych punktach osobliwych, tj. w miejscach występowania mostków cieplnych.

Równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych wyraża związek między temperaturą, czasem i współrzędnymi przestrzeni, który musi być spełniony dla każdego pola temperatury w ciele stałym i w każdej chwili. Aby z dowolnie dużej liczby rozwiązań wybrać tylko rozwiązanie odpowiadające rozpatrywanemu zjawisku, należy określić warunki jednoznaczności rozwiązania tego równania. Warunki te muszą być tak sformułowane, aby istniało tylko jedno rozwiązanie równania różniczkowego, zależne w sposób ciągły od warunków granicznych. Wtedy postawiony problem jest sformułowany poprawnie.

W obliczaniu przewodzenia ciepła przez przegrody budowlane korzysta się z warunków jednoznaczności rozwiązania równania różniczkowego nieustalonego przewodzenia ciepła, obowiązujących również dla innych ciał stałych. Do tych warunków należą:

- warunki geometryczne, określające kształt i wymiary przegrody,
- warunki fizyczne, określające właściwości fizyczne materiałów, z których zbudowana jest przegroda budowlana,
- rozkład wydajności wewnętrznych źródeł ciepła w czasie i w przestrzeni (warunek bardzo rzadko stosowany w odniesieniu do przegród budowlanych),
- warunki początkowe, określające rozkład temperatury w chwili początkowej, tzn. tej, od której zaczynamy określać zmiany stanu pola temperatury (często przyjmuje się, że w chwili $\tau = 0$ temperatura wynosi $T = 0^\circ\text{C}$),

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2.38)$$

- warunki brzegowe, określające warunki i charakter wymiany ciepła między powierzchniami granicznymi przegrody i jej otoczeniem.

Warunki początkowe i brzegowe nazywane są warunkami granicznymi. Stosowane są następujące warunki brzegowe:

- *Warunek brzegowy I rodzaju* (tzw. warunek Dirichleta) – jego sformułowanie oznacza podanie rozkładu temperatury T_s na powierzchni przegrody w każdej chwili:

$$T_s(\tau) = f(\tau) \quad (2.39)$$

W rozpatrywaniu stanów ustalonych ten warunek upraszcza się, ponieważ temperatura T_s nie zależy od czasu – wystarczy więc znajomość zależności $T_s = f$.

- *Warunek brzegowy II rodzaju* (tzw. warunek Neumanna) – polega na określeniu rozkładu gęstości strumienia ciepła q_s na powierzchni przegrody w każdej chwili:

$$q_s(\tau) = f(\tau) \quad (2.40)$$

- *Warunek brzegowy III rodzaju* (tzw. warunek Fouriera) – polega na podaniu temperatury powietrza T_p omywającego przegrodę i współczynnika przejmowania ciepła h w każdym miejscu przegrody i w każdej chwili. Przez podanie wartości współczynnika h uwzględnia się przejmowanie ciepła na drodze konwekcji i promieniowania. Przejmowanie ciepła jest wówczas opisywane przez prawo Newtona:

$$q(\tau) = h_c(\tau)[T_p(\tau) - T_s(\tau)] + h_r(\tau)[T_r(\tau) - T_s(\tau)] \quad (2.41)$$

W szczególnym przypadku, gdy temperatura powietrza i średnia temperatura promieniowania otoczenia są sobie równe ($T_p = T_r$), wówczas zachodzi:

$$q(\tau) = [h_c(\tau) + h_r(\tau)][T_p(\tau) - T_s(\tau)] = h(\tau)[T_p(\tau) - T_s(\tau)] \quad (2.42)$$

Dla warunków stanu ustalonego wzory (2.41) i (2.42) przechodzą w wyrażenia (2.24) i (2.28).

- *Warunek brzegowy IV rodzaju* – występuje, gdy przewodzenie ciepła po obydwu stronach powierzchni idealnego styku dwóch warstw przegrody budowlanej jest opisywane przez prawo Fouriera. Występuje wówczas równość (ciągłość) temperatury i gęstości strumienia ciepła:
 - równość temperatury $T_{s1}(\tau) = T_{s2}(\tau)$,
 - oraz gęstości strumienia ciepła $q_{s1}(\tau) = q_{s2}(\tau)$.

Warunek ten obowiązuje na granicach styku między poszczególnymi warstwami przegrody budowlanej.

Wymienione warunki brzegowe obowiązują zarówno w stanach nieustalonych, jak i ustalonych, przy czym w drugim przypadku zakłada się ich niezmienność w czasie. Warunki brzegowe obowiązują zarówno przy nagrzewaniu, jak i przy stygnięciu ciała.

W przypadku przegród budowlanych, ze względu na występowanie na powierzchniach granicznych przegród wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie, najczęściej wykorzystuje się warunek brzegowy III rodzaju.

Należy zwrócić uwagę, że podczas wymiany ciepła przez promieniowanie między powierzchniami ciał (np. przegród budowlanych) obowiązują zupełnie inne warunki brzegowe. Gęstość radiacyjnego strumienia ciepła wymienianego przez analizowane powierzchnie zależy od zastępczego współczynnika emisyjności, od współczynnika konfiguracji i jest proporcjonalna do różnicy czwartych potęg temperatury bezwzględnej (patrz rozdział 4.5).

Zagadnienia rozwiązywania nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych, a tym samym analizę pól temperatury, można podzielić na dwie zasadnicze grupy [169], [187]:

1. *Zadania proste* – polegają na rozwiązywaniu klasycznych zagadnień nieustalonego przewodzenia ciepła, tj. na określaniu pola temperatury lub gęstości strumieni cieplnych, na podstawie założonych właściwości materiałowych, geometrii, warunków początkowych i brzegowych. Zadania te dotyczą rozwiązywania większości klasycznych zagadnień fizyki budowli.

2. *Zadania odwrotne* – polegają na określaniu właściwości termofizycznych badanego ciała (np. współczynnika przewodzenia ciepła), warunków brzegowych lub początkowych itp. na podstawie znanego (zmierzonego) pola temperatury w określonej chwili. Jednym z przykładów odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła jest określenie właściwości materiałowych przegrody budowlanej na podstawie zmierzonego metodą termowizyjną rozkładu temperatury na powierzchni przegrody [148], [184].

W przypadku gdy znany jest cel zadania związanego z rozwiązywaniem zagadnień przewodzenia ciepła przez przegrody budowlane, bez względu na rodzaj zagadnienia brzegowego oraz przewidywaną metodę rozwiązania, niezmiernie ważne jest poprawne sformułowanie i sformalizowanie zadania oraz utworzenie modelu matematycznego rozpatrywanego układu termokinetycznego. Gdy już dysponujemy symulacyjnym modelem matematycznym, fizycznym (modele analogowe) lub matematyczno-fizycznym (niektóre rodzaje modeli hybrydowych) można przystąpić do wyboru techniki rozwiązania.

Korzystając z modelu matematycznego, można poszukiwaną informację skutecznie uzyskać metodami analitycznymi i numerycznymi. Modele typu fizycznego natomiast pozwalają na uzyskiwanie rozwiązania metodami opartymi na analogii matematycznej zjawisk termokinetycznych i elektrycznych (metody analogowe). I wreszcie modele hybrydowe umożliwiają uzyskanie rozwiązania metodami mieszanymi (metody hybrydowe), a zwłaszcza metodami analogowo-analitycznym oraz analogowo-numerycznymi.

Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić, że w rozwiązywaniu zagadnień nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych najczęściej stosuje się następujące metody:

1. Metody analityczne – prowadzą do rozwiązań ogólnych, ale muszą opierać się na dużej liczbie założeń upraszczających. Każde rozszerzenie tych założeń, np. uwzględnienie wpływu temperatury na właściwości cieplne materiałów budowlanych, znacznie zwiększa stopień trudności rozwiązania analitycznego, ale nie wywołuje istotnego utrudnienia przy zastosowaniu metod numerycznych. W tej grupie rozwiązań najczęściej wykorzystywana jest metoda szeregów Fouriera, zwaną także metodą rozdzielania zmiennych, stosuje się również metody przekształceń całkowych Laplace’a, Fouriera, Henkela i Melina (do zagadnień ustalonych i nieustalonych w obiektach o niezłożonej geometrii), metodę przekształceń konforemnych (zwłaszcza do zagadnień ustalonych w obiektach dwuwymiarowych bezźródłowych) oraz metodę funkcji Greena (w stanach ustalonych obszarów bezźródłowych). Z innych metod

należy wymienić metody wariacyjne, a jedną z głównych zalet tych metod jest ich przydatność do rozwiązywania zagadnień nieustalonych w elementach o złożonej konstrukcji.

2. Metody numeryczne – najczęściej są stosunkowo proste pod względem teoretycznym, ale nie należy nadmiernie sugerować się prostotą tych metod. Równania obliczeniowe metod numerycznych opierają się na podstawowych prawach fizyki, tj. na podstawowych prawach zachowania (prawo ciągłości przepływu, prawo zachowania energii oraz prawo zachowania pędu) oraz podstawowych prawach transportu (prawo przewodzenia ciepła, prawo Fouriera). W tej grupie rozwiązań najczęściej stosuje się metodę różnic skończonych (MRS), metodę elementów skończonych (MES) i metodę elementów brzegowych (MEB). Są to metody przybliżone, należy jednak podkreślić, że ich przydatność jest ogromna. Mogą być one stosowane w zasadzie do obliczeń wszystkich rodzajów zagadnień brzegowych, w stanach ustalonych i nieustalonych. Metody numeryczne prowadzą do wyników liczbowych, które jest trudno uogólniać, natomiast niedogodność tę rekompensuje możliwość stosowania specjalistycznych programów komputerowych.

3. Metody analogowe – ich znaczenie było bardzo ważne, gdy nie było jeszcze komputerów (wtedy mówiło się o maszynach matematycznych), zwłaszcza komputerów o dużej mocy obliczeniowej. Wówczas metody numeryczne rozwiązań zagadnień przewodzenia i złożonego przenikania ciepła, mimo że znane były już od dawna i że stwarzały potencjalne możliwości ich wykorzystania w dziedzinach, w których zawodne okazywały się metody analityczne, przez długi okres stosowano w ograniczonym zakresie. Wtedy bardzo przydatną okazała się analogia matematyczna pomiędzy zjawiskami elektrycznymi i termokinetycznymi (Kirchhoff wykazał to w 1834 r.). Mimo że obecnie znaczenie metod analogowych zdecydowanie zmalało, w tej grupie metod istnieje duża różnorodność technik, a najczęściej stosowane są modele dyskretnie. Modelowanie stanów ustalonych jest realizowane w układach elektrycznych o stałych rozłożonych oraz w układach o stałych skupionych. Podobne techniki rozwiązań można stosować dla stanów nieustalonych przepływu ciepła.

Szczegółowy opis matematyczny wymienionych metod rozwiązywania zagadnień nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych wykracza poza zakres niniejszej książki, niezbędne informacje są zawarte w pracach [169] i [187].

2.3.3. Dynamika cieplna przegród budowlanych – masa termiczna przegród

Przepływ ciepła przez przegrody budowlane jest zawsze nieustalony w czasie. Wynika to przede wszystkim ze zmienności elementów środowiska zewnętrznego warunkujących przepływ ciepła (temperatura powietrza, natężenie promieniowania słonecznego, prędkość i kierunek wiatru itp.), z nierównomierności pracy urządzeń

grzewczych oraz ze zmiennych zysków ciepła w pomieszczeniu. Proces nieustalonej wymiany ciepła jest ściśle związany z dynamicznymi cieplnymi charakterystykami przegrody budowlanej, które zasadniczo wpływają na efekt akumulacji ciepła i na stateczność cieplną przegród w okresie letnim i zimowym. Pojęcia te ściśle są związane z pojemnością cieplną i z tzw. masą termiczną przegród.

W przypadku ogólnym dynamika rozpatrywanego procesu (w tym przypadku procesu nieustalonego przepływu ciepła przez wielowarstwową przegrodę budowlaną) jest związana z zachowaniem się tego procesu w czasie – opis matematyczny dynamiki procesu zawiera pochodne funkcji względem czasu. Określenie dynamicznych właściwości cieplnych przegrody budowlanej sprowadza się zatem do rozwiązania równania różniczkowego jednokierunkowego przewodzenia ciepła (równ. (2.37)), które wyraża zmienność temperatury w przekroju przegrody w czasie.

W rozważaniach naukowych pojęcia „masa termiczna” i „pojemność cieplna” są najczęściej równoważne i określają zdolność danego ciała do akumulacji ciepła oraz do tłumienia przepływającego strumienia ciepła. Idealne materiały na korzystną masę termiczną (o dużej pojemności cieplnej) powinny charakteryzować się (wzór (2.3)) następującymi cechami:

- dużym ciepłem właściwym,
- dużą gęstością pozorną.

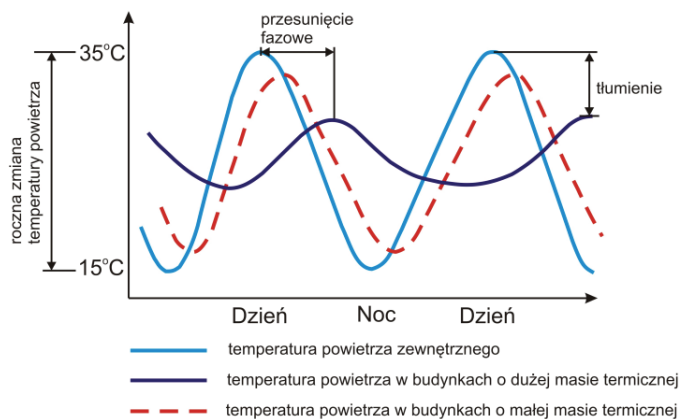
Dodatkowo masa termiczna w budynkach powinna charakteryzować się dobrą przewodnością cieplną, ale nie za wysoką. Na przykład dobrym materiałem spełniającym opisane kryteria jest cegła i grunt, a jeszcze lepszym materiałem jest żelbet. Jeżeli przewodność cieplna jest zbyt duża (np. żeliwo, stal lub miedź), to zakumulowana energia jest wydzielana zbyt szybko, by uzyskać typowy dla masy termicznej efekt opóźnienia, tj. przesunięcie fazowe.

Ciepło właściwe większości materiałów budowlanych zawiera się w przedziale 0,8–1,0 kJ/kg·K. Drewno ma duże ciepło właściwe (ok. 2,5 kJ/kg·K), ale ma relatywnie małą gęstość. Objętościowa pojemność cieplna, odnosząca się do 1 m³ materiału, dobrze opisuje cieplne dynamiczne właściwości materiałów (tabela 2.2).

Duża masa termiczna poszczególnych przegród budowlanych i budynku działa korzystnie zarówno w zimie, jak i w lecie – w zimie zmniejsza obciążenie systemu ogrzewczego oraz umożliwia efektywniejsze wykorzystanie zysków słonecznych przez okna (w ciągu dnia wewnętrzne przegrody masywne akumulują energię słoneczną pozyskiwaną przez okna, w nocy wypromieniowują ją do pomieszczenia). W lecie natomiast masa termiczna przegród zewnętrznych skutecznie tłumí przepływający strumień ciepła (przegrody charakteryzują się dużym wskaźnikiem tłumienia) oraz powoduje tzw. przesunięcie fazowe, czyli wydłuża czas pomiędzy momentem pojawienia się maksymalnej temperatury powietrza zewnętrznego i momentem pojawienia się maksymalnej temperatury na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia. Wskaźnik tłumienia oraz przesunięcie fazowe są większe dla bardziej masywnych przegród, co pokazano na rysunku 2.9.

Tabela 2.2. Objętościowa pojemność cieplna dla różnych materiałów
(zestawienie własne)

Materiał	Objętościowa pojemność cieplna (kJ/m ³ K)
Woda	4186
Marmur, granit	2580
Piaskowiec	2200
Szkło	2100
Żelbet	2100
Dąb	2000
Cegła ceramiczna	1150–1670
Żwir	1500
Ubity grunt	1400
Drewno (sosna, świerk)	1380
Beton komórkowy	420–670
Materiały izolacyjne	20–200

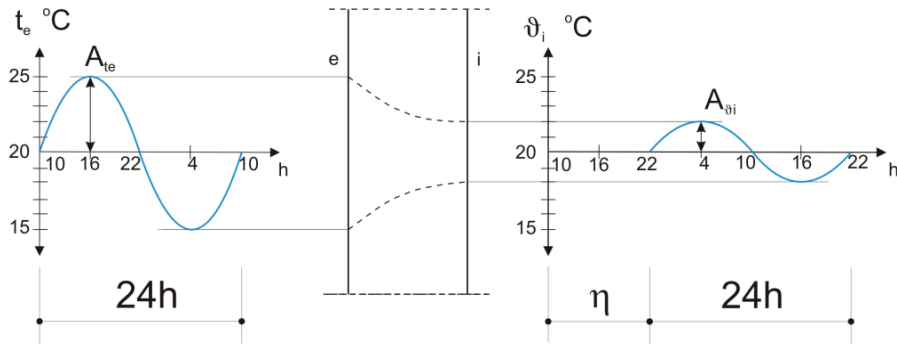


Rys. 2.9. Poglądowy rysunek ilustrujący wpływ termicznej masy przegrody na wartość tłumienia i przesunięcia fazowego amplitudy wahań temperatury powietrza w okresie lata

Na rysunku 2.10 pokazano w innym ujęciu dynamiczne ciepłne właściwości ściany zewnętrznej.

Należy jednak zwrócić uwagę, że w zimie w budynkach użytkowanych nieregularnie lub sporadycznie masa termiczna budynku może wpływać niekorzystnie na opisane cechy ciepłne budynku. W tym przypadku ogrzanie dużej masy budynku wymaga zdecydowanie większej ilości energii i dłuższego czasu (wyższe koszty eksploatacyjne).

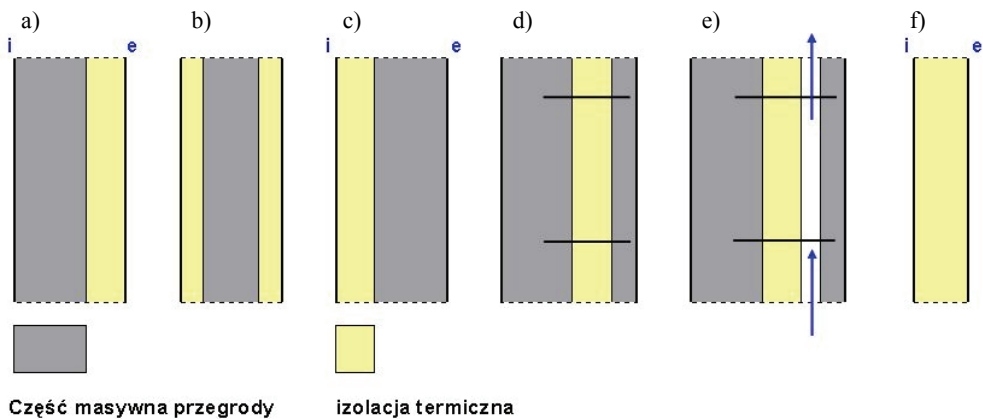
Dynamiczne ciepłne właściwości przegrody budowlanej wielowarstwowej zależą od struktury przegrody oraz od rozkładu oporów ciepłnych i pojemności ciepłnej poszczególnych warstw. Właściwości te zasadniczo wpływają na efekt akumulacji ciepła



Rys. 2.10. Dynamika ciepła ściany zewnętrznej w okresie lata – amplituda wahań temperatury powietrza zewnętrznego wynosi A_{te} . Po przejściu przez ścianę wahania temperatury zostają słumione, amplituda wahań temperatury na powierzchni ściany od strony pomieszczenia wynosi A_{ti} (wielkość tłumienia zależy od termicznej masy przegrody). Wielkość η oznacza przesunięcie fazowe, tzn. czas [h] między momentem pojawienia się maksymalnej temperatury powietrza zewnętrznego i momentem pojawienia się maksymalnej temperatury na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia

przez przegrodę, na zdolność tłumienia przepływającego przez nią strumienia ciepła oraz na tzw. przesunięcie fazowe, które ma szczególne znaczenie w okresie lata. Jest to ściśle związane z utrzymaniem właściwych parametrów mikroklimatu pomieszczeń i warunków komfortu cieplnego.

Na rysunku 2.11 przedstawiono przykładowe ściany zewnętrzne o takiej samej wartości współczynnika przenikania ciepła, ale o różnej strukturze, rozkładzie masy



Rys. 2.11. Przykładowe ściany zewnętrzne o takiej samej wartości współczynnika przenikania ciepła, ale o różnych cieplnych właściwościach dynamicznych – może to mieć odzwierciedlenie w różnym rozkładzie temperatury na ich powierzchniach zewnętrznych i od strony pomieszczenia (oznaczenia: i – strona wewnętrzna, e – strona zewnętrzna) oraz także na termogramach

przegród i oporów cieplnych oraz o różnej pojemności cieplnej (o różnej masie termicznej). Ciepłne właściwości dynamiczne tych ścian, mimo takiego samego współczynnika przenikania ciepła, znacząco różnią się między sobą, co może skutkować różnym rozkładem temperatury na ich powierzchniach zewnętrznych i na powierzchniach od strony pomieszczenia w okresie zimy. W konsekwencji obrazy termalne tych ścian (termogramy), w takich samych warunkach użytkowania, mogą być zdecydowanie różne, zwłaszcza gdy w obrębie tych ścian wystąpią mostki cieplne.

Każda z przedstawionych na rysunku 2.11 ścian zewnętrznych charakteryzuje się różną masą termiczną, a tym samym różną statecznością cieplną. Stateczność cieplna przegrody jest to jej zdolność do tłumienia przepływającego strumienia ciepła. Można również podać inną definicję – jest to zdolność przegrody do utrzymywania stałej bądź zmieniającej się w dopuszczalnych granicach temperatury powierzchni przegrody od strony pomieszczenia. Stateczność cieplna przegrody w okresie zimowym, w którym wykonuje się termowizyjne badania budynków, zależy od:

- całkowitego oporu cieplnego przegrody,
- równomierności pracy urządzeń grzewczych – najkorzystniejsze jest ogrzewanie ciągłe, mniej korzystne jest ogrzewanie z przerwami, a najmniej korzystne jest ogrzewanie raz na dobę,
- kolejności ułożenia warstw w przegrodzie – najkorzystniejsze efekty daje ułożenie masywnej (konstrukcyjnej) części przegrody od strony pomieszczenia, co jest w zgodzie z zasadami wykonywania ścian warstwowych (izolacja cieplna po stronie chłodniejszej).

Na rysunku 2.11 najkorzystniejsze efekty ze względu na stateczność cieplną i dynamiczną właściwości cieplnych uzyskują ściany a), d) i e).

W przypadku dobrze zaizolowanych termicznie, ale lekkich przegród budowlanych (np. ściany szkieletowe wypełnione wełną mineralną w tzw. domach kanadyjskich, rys. 2.11f) dynamiczne właściwości cieplne tych przegród, a właściwie ich brak, wpływają na intensywniejszą pracę urządzeń grzewczych i na nieco większe koszty ogrzewania budynku. Zagadnienia te nabierają obecnie w Polsce szczególnego znaczenia w związku z wprowadzaniem nowych technologii wykonawstwa przegród budowlanych, zwłaszcza ścian budynków, z tendencją do wykonywania coraz to lżejszych przegród.

Dynamiczne właściwości cieplne przegród budowlanych, ograniczających ogrzewaną kubaturę budynku, mają istotny wpływ na chwilowe obciążenia instalacji grzewczych i klimatyzacyjnych, na mikroklimat pomieszczeń i komfort cieplny ludzi oraz zużycie energii cieplnej w budynkach [13], [34], [65], [71], [72], [73], [80]. Znajomość tych właściwości przegród konieczna jest zwłaszcza wówczas, gdy są stosowane układy regulacji automatycznej, których zadaniem jest utrzymywanie założonych warunków cieplnych w pomieszczeniach, niezależnie od zmiany warunków atmosferycznych lub też występowania innych zakłóceń w postaci dodatkowych zysków lub strat ciepła w pomieszczeniach.

Przykładem właściwego wykorzystania cieplnych dynamicznych właściwości przegród budowlanych do poprawy bilansu cieplnego pomieszczeń i warunków komfortu cieplnego w tych pomieszczeniach, zwłaszcza w lecie, jest stosowanie:

- budynków częściowo zagłębionych w gruncie [168],
- tzw. stropodachów odwróconych, z warstwą płukanego żwiru na stropodachu, o frakcji ≥ 15 mm i grubości warstwy ok. 6–8 cm,
- stosowanie tzw. dachów zielonych.

Dodanie obciążenia do stropodachów pełnych w postaci warstwy żwiru lub specjalnego gruntu i roślinności powoduje zwiększenie ich masy termicznej (dynamiki cieplnej), a tym samym powoduje znaczącą poprawę zdolności tłumienia przepływającego strumienia ciepła, co wpływa między innymi na poprawę parametrów mikroklimatu pomieszczeń, zwłaszcza w okresie lata. Stąd, stosowanie tego typu stropodachów ma uzasadnienie nie tylko ze względów estetycznych, ale również praktycznych. W przypadku ścian zewnętrznych korzystne pod tym względem jest stosowanie zaizolowanych cieplnie od strony zimniejszej ścian masywnych, rys. 2.11 a, d i e.

Dynamiczne właściwości cieplne przegród budowlanych wpływają przede wszystkim na szybkość zmian i rozkład temperatury wewnątrz i na powierzchniach przegród budowlanych. Stąd między innymi zaleca się, aby pomiary termowizyjne budynków były wykonywane przy stabilnych warunkach pogodowych na 2–3 dni przed i w czasie wykonywania pomiarów (rozdz. 6). Z podanych rozważań wynika również, że w przypadku termowizyjnych badań budynków, których nie oddano jeszcze do użytkowania i ogrzewanych jedynie „ogrzewaniem dyżurnym”, należy te budynki zacząć ogrzewać na kilka dni przed badaniami w celu uzyskania stabilnej różnicy temperatury po obu stronach przegród na poziomie co najmniej 15°C (patrz rozdz. 6.3.5). Długość okresu dogrzewania budynku zależy od jego masy termicznej oraz od wartości i przebiegu temperatury zewnętrznej – temperatura powietrza w budynku na poziomie ok. 20°C powinna się utrzymywać na ok. 2–3 dni przed pomiarami i w trakcie badań termowizyjnych.

2.4. Jednokierunkowe ustalone przenikanie ciepła przez ściankę płaską

2.4.1. Przenikanie ciepła przez przegrody

Jak wspomniano wcześniej, proces wymiany ciepła przez przegrody budowlane, ograniczające ogrzewaną kubaturę budynku i oddzielające pomieszczenia użytkowane przez człowieka od klimatu zewnętrznego, jest zawsze nieustalony w czasie. Wynika to między innymi z zależności od czasu czynników klimatu zewnętrznego, z nierównomierności pracy urządzeń ogrzewczych oraz z nierównomierności wewnętrznych

zysków ciepła. Opis matematyczny procesu nieustalanej wymiany ciepła przez przegrody budowlane, z nieustalonymi warunkami brzegowymi, jest dosyć złożony i w związku z tym w większości zastosowań inżynierskich z zakresu fizyki budownictwa od bardzo wielu lat stosuje się model obliczeniowy ustalonego przepływu ciepła, który w sposób uproszczony opisuje proces przenikania ciepła przez wielowarstwowe przegrody budowlane. Stosowanie przybliżonych metod obliczeń poza ułatwieniami natury formalno-matematycznej znajduje uzasadnienie w tym, że przyjmowane do obliczeń wartości elementów klimatu zewnętrznego i mikroklimatu pomieszczeń są średnimi wieloletnimi dla danej lokalizacji, natomiast materiały budowlane odznaczają się dużą stabilnością cech fizykochemicznych w szerokim zakresie temperatury.

Przenikanie ciepła jest to wymiana ciepła między dwoma środowiskami (płynami) rozdzielonymi ścianką (np. przegrodą budowlaną). Przenikanie ciepła uwzględnia wszystkie trzy sposoby wymiany ciepła (rys. 2.12).

W analizie jednokierunkowego przenikania ciepła przez przegrody budowlane (np. obliczanie całkowitego oporu cieplnego, a tym samym określanie wartości współczynnika przenikania ciepła, wyznaczanie rozkładu temperatury w przegrodzie, obliczanie dyfuzji pary wodnej przez przegrodę itp.) przyjmuje się zwykle następujące założenia upraszczające:

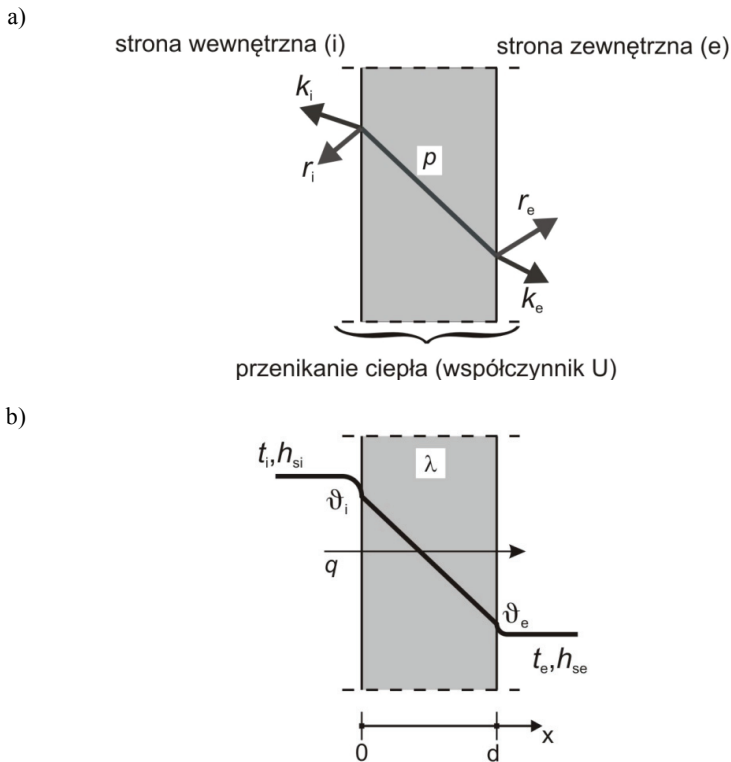
- pole temperatury oraz gęstość strumienia ciepła przenikającego przez przegrodę są ustalone w czasie,
- ruch ciepła odbywa się w jednym tylko kierunku, prostopadłym do powierzchni przegrody,
- długość i szerokość przegrody są nieograniczone,
- modelem strukturalnym przegrody budowlanej jest nieprzezroczysta płyta równoległościenna, złożona z warstw o stałych grubościach (w przypadku przegród budowlanych o zmiennej grubości, np. stropodachy zaizolowane izolacją cieplną o spadku do 5%, obliczenia można przeprowadzić według wzorów normowych),
- poszczególne warstwy przegrody wykonane są z różnych, ale jednorodnych i izotropowych materiałów,
- właściwości fizyczne: przewodność cieplna właściwa λ , gęstość pozorną ρ oraz ciepło właściwe c_p dla każdej warstwy są stałe,
- wartości współczynników przejmowania ciepła h_{si} na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia oraz h_{se} na zewnętrznej powierzchni przegrody są stałe na całej powierzchni przegrody (i dlatego np. nie różnicuje się wartości współczynnika przejmowania ciepła h_{se} na zewnętrznej powierzchni przegrody w zależności od prędkości wiatru i od wysokości budynków),
- wartości temperatury powietrza po obu stronach przegrody budowlanej są różne, ale stałe w czasie.

Stołość wartości współczynników przewodzenia ciepła λ , gęstości pozornej ρ i ciepła właściwego c_p jest konsekwencją przyjęcia założenia o ich niezmienności w czasie w zakresie temperatury spotykanej w budownictwie oraz założenia jednorod-

ności i izotropowości materiałów przegrody. Założenie jednowymiarowości pola temperatury przyjmuje się w większości przypadków analizy przegród budowlanych w zakresie cieplno-wilgotnościowym. Założenie to przestaje jednak wystarczać w ocenie właściwości cieplnych przegród budowlanych w miejscach występowania mostków cieplnych i wówczas należy rozpatrywać dwu- (2D) lub trójwymiarową (3D) wymianę ciepła przegród z otoczeniem.

Jednokierunkowe przenikanie ciepła przez przegrodę budowlaną składa się z następujących procesów (rys. 2.12):

- przejmowania ciepła przez powierzchnię przegrody od strony o wyższej temperaturze (w zdecydowanej większości przypadków jest to powierzchnia przegrody od strony ogrzewanego pomieszczenia),
- przepływu ciepła przez przegrodę w kierunku od powierzchni o wyższej temperaturze do powierzchni o temperaturze niższej (najczęściej jest to jedynie prze-



Rys. 2.12. Schemat przenikania ciepła przez przegrodę budowlaną płaską jednowarstwową: a) rysunek poglądowy przenikania ciepła przez przegrodę (k – konwekcja, r – promieniowanie, p – przewodzenie), przenikanie ciepła uwzględnia wszystkie trzy sposoby wymiany ciepła, b) rozkład temperatury w przegrodzie i kierunek przepływu ciepła

wodzenie ciepła, niemniej w przypadku przegrody z pustką powietrzną występują w niej wszystkie trzy sposoby wymiany ciepła),

- przejmowania ciepła z powierzchni przegrody do powietrza o niższej temperaturze (najczęściej jest to zewnętrzna powierzchnia przegrody).

Przejmowanie ciepła do przegrody, tj. wnikanie ciepła oraz przejmowanie ciepła z przegrody, wnikanie ciepła do otoczenia, odbywa się głównie przez konwekcję i promieniowanie, a minimalnym stopniu przez przewodzenie. Przepływ ciepła wewnątrz przegrody, jeśli nie ma w niej warstw powietrznych, odbywa się przez przewodzenie. Jeśli w przegrodzie występują warstwy powietrza, to zachodzą w nich wszystkie trzy sposoby wymiany ciepła.

Gęstość strumienia ciepła przepływającego przez płaską przegrodę budowlaną, rozdzielającą środowiska o temperaturze t_e (temperatura powietrza zewnętrznego) oraz t_i (temperatura powietrza w pomieszczeniu) w stanie ustalonym jest obliczana ze wzoru:

$$q = U(t_i - t_e) = \frac{t_i - t_e}{R_T} \quad (2.43)$$

gdzie: t_i – obliczeniowa temperatura powietrza w pomieszczeniu, [°C],

t_e – obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego, [°C],

R_T – całkowity opór cieplny przegrody, [m²·K/W],

U – współczynnik przenikania ciepła przegrody, [W/(m²·K)].

Z zależności (2.43) wynika również, że współczynnik przenikania ciepła U jest stosunkiem gęstości ustalonego strumienia ciepła, przepływającego przez przegrodę, do różnicy temperatury powietrza po obu stronach przegrody.

Całkowity opór cieplny przegrody R_T oblicza się ze wzoru:

$$R_T = \frac{1}{h_{si}} + \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_{se}} = R_{si} + \sum_{k=1}^n R_k + R_{se} \quad (2.44)$$

gdzie: d_k – grubość warstwy materiału, [m],

λ_k – współczynnik przewodzenia ciepła warstwy materiału, [W/(m·K)],

h_{si} – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia (współczynnik napływu ciepła), [W/(m²·K)],

h_{se} – współczynnik przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody (współczynnik odpływu ciepła), [W/(m²·K)],

R_{si} – opór przejmowania ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia (opór wnikania ciepła), wzór (2.25), [m²·K/W],

R_{se} – opór przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody (opór wnikania ciepła), wzór (2.29), [m²·K/W],

R_k – opór cieplny warstwy materiału, [m²·K/W].

Zachodzi zależność:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (2.45)$$

gdzie R – opór cieplny przegrody budowlanej, $[m^2 \cdot K/W]$.

Współczynnik przenikania ciepła U dla przegrody budowlanej jest obliczany jako odwrotność całkowitego oporu cieplnego R_T przegrody:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2.46)$$

Współczynnik przenikania ciepła charakteryzuje jakość przegrody budowlanej lub komponentu budowlanego pod względem ich izolacyjności cieplnej – im mniejszy jest współczynnik przenikania ciepła tych elementów, tym lepsze są ich cieplne właściwości izolacyjne. Współczynnik U również zależy od jakości wykonania izolacji cieplnej w przegrodach (np. możliwości przewiewu powietrza), od liczby i rodzaju łączników mocujących izolację do ściany, a w stropodachach odwróconych od możliwości zawilgocenia izolacji, co można przedstawić wzorem:

$$U = f(\Delta U_g, \Delta U_f, \Delta U_r) \quad (2.47)$$

gdzie: ΔU_g – poprawka ze względu na szczeliny powietrzne spowodowane małymi zmianami wymiarów wyrobu izolacyjnego (odchyłki wymiarów), stosowane są poziomy poprawek 0, 1 i 2, [209],

ΔU_f – poprawka ze względu na łączniki mechaniczne, mocujące izolację cieplną – wartość tej poprawki zależy od współczynnika przewodzenia ciepła łącznika, od liczby, pola przekroju i długości łączników, od grubości warstwy izolacji zawierającej łącznik, od oporu cieplnego warstwy izolacji przebijanej przez łącznik oraz od całkowitego oporu cieplnego przegrody,

ΔU_r – poprawka dla stropodachu o odwróconym układzie warstw – uwzględnia ona zmniejszenie izolacyjności cieplnej stropodachu wynikające z przepływu wody deszczowej między izolacją cieplną i membraną wodochronną, stosuje się ją w odniesieniu do budynków ogrzewanych, natomiast w odniesieniu do budynków chłodzonych poprawka nie ma zastosowania.

W obliczeniach wartości współczynników przenikania ciepła U poszczególnych przegród należy również uwzględnić geometrię połączenia materiałów w przegrodach niejednorodnych. Szczegółowe obliczenia współczynników przenikania ciepła przegród budowlanych jednorodnych, niejednorodnych, z uwzględnieniem wpływu mostków cieplnych punktowych, komponentów o zmiennej grubości oraz poprawek dla stropodachów „odwróconych” itp. należy wykonać zgodnie z normą PN EN ISO 6946 [209].

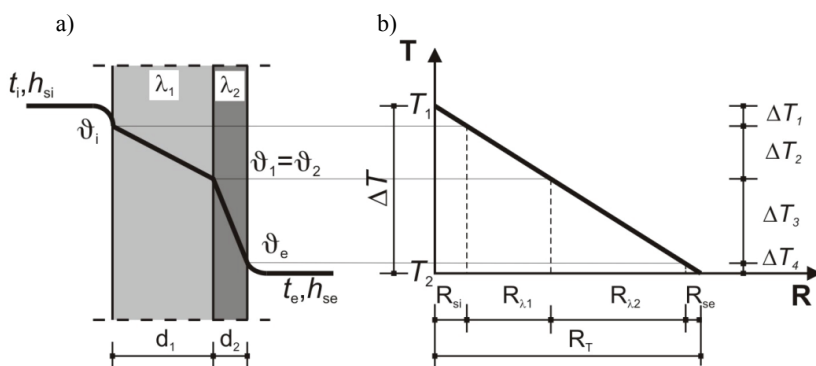
2.4.2. Rozkład temperatury w przegrodzie

Znajomość temperatury na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia oraz w dowolnym przekroju wewnątrz przegrody jest niezbędna między innymi do sprawdzenia ryzyka wystąpienia kondensacji powierzchniowej oraz kondensacji pary wodnej wewnątrz przegrody. Temperaturę na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia v_i w części środkowej przegrody (z dala od wpływu mostków cieplnych) oraz w dowolnym przekroju v_x oblicza się ze wzorów:

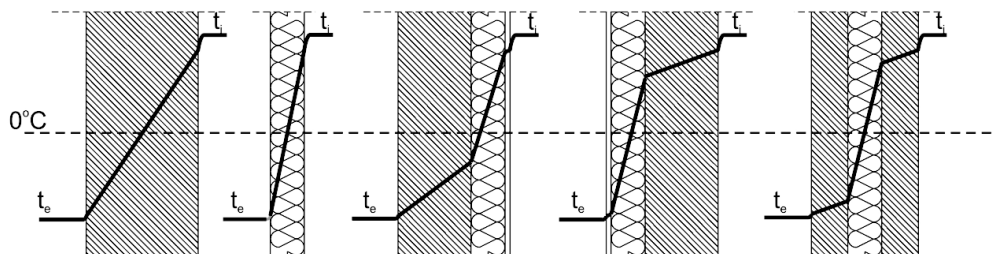
$$v_i = t_i - qR_{si} = t_i - U(t_i - t_e)R_{si} \quad (2.48)$$

$$v_x = t_i - q(R_{si} + R_x) = t_i - U(t_i - t_e)(R_{si} + R_x) \quad (2.49)$$

gdzie R_x jest oporem cieplnym przegrody od powierzchni wewnętrznej do analizowanego przekroju x . Pozostałe oznaczenia jak we wzorach poprzednich. Temperatura v_i może być wykorzystana do interpretacji termogramów powierzchni przegród.



Rys. 2.13. Rozkład temperatury w ścianie zewnętrznej dwuwarstwowej: a) w skali długości, b) w skali oporów cieplnych



Rys. 2.14. Przykładowe rozkłady temperatury w ścianach zewnętrznych o różnym układzie warstw (w ścianach warstwowych przejście z temperatury dodatniej na ujemną występuje zawsze w warstwie izolacji cieplnej), t_i – obliczeniowa temperatura powietrza w pomieszczeniu, t_e – obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego

Rozkład temperatury w poszczególnych warstwach przegrody płaskiej wielowarstwowej w ustalonym stanie przepływu ciepła w skali oporów cieplnych jest liniowy. Na rysunkach 2.13 i 2.14 przedstawiono przykładowe rozkłady temperatury w ścianach zewnętrznych.

Największy spadek temperatury w przegrodzie zawsze występuje w warstwie izolacji cieplnej. W ścianach zewnętrznych warstwowych, składających się z masywnej części nośnej i z warstwy izolacji cieplnej, przejście z temperatury dodatniej na ujemną występuje zawsze w warstwie izolacji cieplnej.

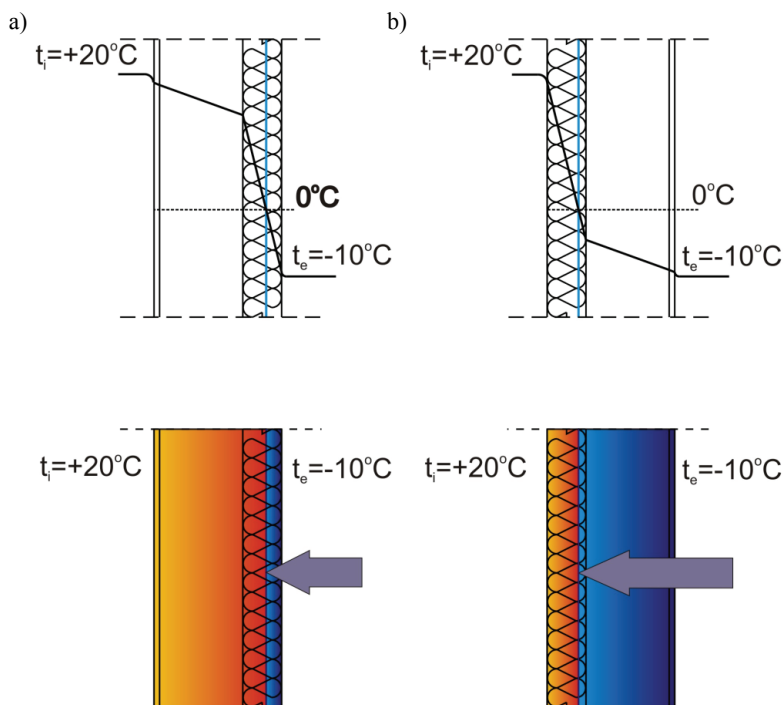
2.4.3. Wpływ usytuowania warstwy izolacji termicznej na właściwości cieplno-wilgotnościowe przegrody budowlanej

Prawidłowe zaprojektowanie struktury zewnętrznej przegrody budowlanej wielowarstwowej polega nie tylko na odpowiednim doborze materiałów poszczególnych warstw, w celu uzyskania właściwego całkowitego oporu cieplnego (tym samym uzyskania odpowiedniej wartości współczynnika przenikania ciepła), ale również na doborze właściwej kolejności poszczególnych warstw przegrody, gwarantującej prawidłową pracę przegrody w eksploatacyjnych warunkach cieplnych i wilgotnościowych.

Całkowity opór cieplny R_T przegrody wielowarstwowej oraz jej współczynnik przenikania ciepła U nie zależy od kolejności ułożenia warstw. Natomiast układ warstw w przegrodzie jest bardzo ważny – izolacja cieplna powinna być zawsze ułożona (o ile jest to możliwe) po chłodniejszej stronie przegrody. W przypadku zewnętrznych ścian budynków mieszkalnych (ogrzewanych) jest to strona zewnętrzna, ale w obiektach całorocznie chłodzonych, np. w komorach zamrażalniczych do przechowywania mięsa (o temperaturze od $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$) lub w magazynach chłodniczych do przechowywania produktów spożywczych (o temperaturze od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$), jest to strona wewnętrzna (chłodniejsza).

Kolejność ułożenia warstw istotnie wpływa na:

- Rozkład temperatury w przegrodzie (rys. 2.14 i 2.15) – usytuowanie warstwy izolacji po chłodniejszej stronie przegrody powoduje, że masywna część konstrukcyjna pracuje zawsze w temperaturze dodatniej. Rozkład temperatury w tym przypadku jest również korzystny ze względu na znaczne ograniczenie lub wyeliminowanie ryzyka kondensacji pary wodnej wewnątrz przegrody.
- Możliwość wystąpienia kondensacji pary wodnej w przegrodzie – rozkład temperatury determinuje rozkład ciśnienia pary wodnej w przegrodzie, tj. rozkład rzeczywistego ciśnienia pary wodnej i ciśnienia pary wodnej nasyconej. Przy ułożeniu warstwy izolacji cieplnej po chłodniejszej stronie przegrody występuje korzystny rozkład temperatury w przegrodzie i w konsekwencji korzystny rozkład ciśnienia pary wodnej, dzięki czemu ryzyko wystąpienia kondensacji wewnątrz przegrody ograniczone jest do minimum.



Rys. 2.15. Przykładowe rozkłady temperatury w ścianie zewnętrznej:
a) ocieplonej od strony zewnętrznej, b) ocieplonej od strony pomieszczenia,
z pokazaniem zasięgu temperatury ujemnej (komentarz w tekście)

- Ograniczenie („maskowanie”) wpływu liniowych mostków cieplnych – ma to szczególne znaczenie w ścianach zewnętrznych z wieńcami, ryglami i słupami żelbetowymi. Warstwa izolacji cieplnej ułożona po stronie zewnętrznej (chłodniejszej) znacznie ogranicza wpływ mostków termicznych na straty ciepła z pomieszczeń.
- Stateczność cieplną przegród budowlanych w okresie letnim i zimowym – usytuowanie warstwy izolacji cieplnej po chłodniejszej stronie ściany powoduje, że masywna warstwa konstrukcyjna, charakteryzująca się dużą pojemnością cieplną i położona bliżej pomieszczenia, znajduje się w strefie temperatury dodatniej, co między innymi stabilizuje temperaturę powietrza w pomieszczeniu i zabezpiecza pomieszczenie przed wahaniami tej temperatury w czasie przerw w ogrzewaniu. Masywna część ściany od strony pomieszczenia zdecydowanie poprawia cieplne charakterystyki dynamiczne ściany (stateczność cieplną) w okresie letnim i zimowym, stabilizując na odpowiednim poziomie parametry mikroklimatu pomieszczeń. Przy ocieplaniu ścian zewnętrznych od strony pomieszczenia (np. w budynkach znajdujących się w gestii konserwatora zabytków) zatracą się walory cieplnych dynamicznych właściwości materiałów ściany.

W przypadku konieczności ocieplania ścian zewnętrznych od strony pomieszczenia (np. w budynkach objętych ochroną konserwatorską) należy przeprowadzić szczegółowe analizy i obliczenia możliwości wystąpienia kondensacji pary wodnej w tak ocieplonej przegrodzie. Ryzyko kondensacji najczęściej występuje wówczas na styku warstwy izolacji cieplnej i ściany. W tym przypadku należy również stosować specjalne materiały ocieplające, które nie pogarszają parametrów wilgotnościowych ściany.

3. Mostki cieplne w budynkach

3.1. Wstęp

Badania termowizyjne budynków służą głównie do jakościowej oceny izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, stanowiących termiczną obudowę budynków (zwłaszcza ścian) oraz do identyfikacji miejsc występowania oraz zasięgu liniowych i punktowych mostków cieplnych. Miejsca nieciągłości lub braku izolacji cieplnej w elementach tworzących termiczną obudowę budynku skutkują różnicami temperatury na powierzchni elementu. Rozkład temperatury na analizowanej powierzchni może być zatem wykorzystywany do identyfikacji niejednorodności cieplnych spowodowanych nieciągłością lub brakiem izolacji, zawartością wilgoci w przegrodzie lub infiltracją powietrza przez nieszczelności obudowy budynku.

Mostki cieplne są to miejsca w termicznej obudowie budynku, które są niewłaściwie zaizolowane (np. z powodu przerwania lub zmiany grubości warstw izolacyjnych) i które znacznie lepiej przewodzą ciepło niż pozostała część przegrody. Mogą to być również miejsca o zróżnicowanej geometrii przegrody budowlanej i silnie zróżnicowanych właściwościach cieplnych poszczególnych materiałów. Są to miejsca, w których powstaje wielowymiarowy przepływ ciepła i w których, w budynkach ogrzewanych, od strony pomieszczenia obserwuje się obniżenie temperatury powierzchni przegrody i wzrost gęstości strumienia cieplnego w stosunku do pozostałej części przegrody. Natomiast od strony zewnętrznej w miejscach mostków cieplnych występuje podwyższenie temperatury powierzchni przegrody, co bardzo wyraźnie jest widoczne na termogramach. Należy pamiętać, że w budynkach chłodzonych całorocznie (np. magazyny chłodnicze o temperaturze od 0 do $+5^{\circ}\text{C}$, komory zamrażalnicze o temperaturze od -27 do -32°C) występuje odwrotny przepływ ciepła w stosunku do budynków ogrzewanych oraz odwrotne skutki oddziaływania mostków cieplnych. Oznacza to, że w tego typu obiektach mostki cieplne od strony pomieszczenia będą na termogramach widoczne jako miejsca cieplejsze, a od strony zewnętrznej jako miejsca zimniejsze. Natomiast największe straty chłodu (starty energii) występują w lecie i właśnie w tym okresie należy termowizyjnie badać tego typu budynki, oczywiście późną nocą. W okresie lata występuje również największe ryzyko pojawienia się kondensacji pary wodnej w przegrodach.

Mostki cieplne występują w każdym budynku, również w tym dobrze zaizolowanym, najczęściej w ścianach zewnętrznych, głównie w ościeżach okiennych i drzwiowych, w narożach, na nadprożach okiennych i drzwiowych, na podokiennikach, w węzłach konstrukcyjnych ścian ze stropami, w żelbetowych płytach balkonowych wspornikowo przechodzących przez ścianę itp. Mostków cieplnych nie można całkowicie wyeliminować, można natomiast znacznie ograniczyć ich negatywne skutki.

Można zaryzykować stwierdzenie, że mostki termiczne w budynkach „są od zawsze”, tylko nie zawsze stanowiły one problem dla użytkowników. Ich wpływ na ogólne straty ciepła nie był aż tak widoczny, gdy przegrody budynku charakteryzowały się słabymi parametrami izolacyjnymi (np. ściany zewnętrzne o grubości 1,5 cegły, tj. o grubości 38 cm bez izolacji cieplnej), gdyż znaczna część ciepła tracona była przez powierzchnie płaskie, tj. ściany, dachy czy podłogi na gruncie. Wtedy też straty ciepła przez mostki termiczne nie stanowiły tak dużej części ogólnych strat ciepła z niezbyt dobrze zaizolowanego budynku. Występowanie mostków termicznych stwierdzano bardzo często w zewnętrznych ścianach budynków wielkopłytowych i tę wadę uważano za charakterystyczną dla tego typu budownictwa, odróżniającą je od budownictwa tradycyjnego w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Okazało się jednak, że niestety w ciągu ostatnich kilku lat w Polsce wzniesiono bardzo wiele budynków mieszkalnych, wykonywanych w technologii tradycyjnej, przy obowiązujących już zdecydowanie ostrzejszych wymaganiach w zakresie ochrony cieplnej budynków, z uciążliwymi dla użytkowników mostkami cieplnymi.

Wpływ mostków cieplnych na przenikanie (straty) ciepła jest większy w przegrodach o małym współczynniku przenikania ciepła, zwłaszcza w ścianach warstwowych z zastosowaniem dobrych materiałów termoizolacyjnych w porównaniu do ścian jednowarstwowych z cegły i gazobetonu. Względny przyrost strat ciepła przez mostki jest tym większy, im bardziej zwiększona jest izolacyjność termiczna przegrody poza oddziaływaniem mostka cieplnego. Oprócz zwiększonych strat ciepła z pomieszczeń, z widocznym efektem występowania mostków cieplnych, jest obniżanie temperatury na powierzchni mostka, kondensacja pary wodnej, osiadanie kurzu i rozwój szkodliwych dla zdrowia grzybów pleśniowych, zwłaszcza w pomieszczeniach ze zbyt szczelnymi oknami i bez urządzeń do napływu powietrza wentylacyjnego do pomieszczeń.

W ostatnich latach wśród architektów, projektantów, konstruktorów i wykonawców wzrosła świadomość, że oddziaływanie mostków cieplnych zarówno na ludzi, jak i na budynki jest bardzo niekorzystne – obecnie większość z nich zna podstawowe zasady zapobiegania powstawaniu mostków cieplnych. Jednak bardzo niepokojące jest to, że mimo wszystko w wielu nowo wznoszonych budynkach w ostatnim okresie dosyć często występują kłopotliwe dla użytkowników mostki cieplne. Sytuacja taka jest o tyle niepokojąca, że możliwe jest zaprojektowanie i wzniesienie każdego typu budynku ze znacznym ograniczeniem wpływu mostków cieplnych. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że w praktyce bardzo trudne jest całkowite wyeliminowanie most-

ków cieplnych w przegrodach budowlanych, możliwe jest jednak bardzo znaczne ograniczenie ich niekorzystnych skutków.

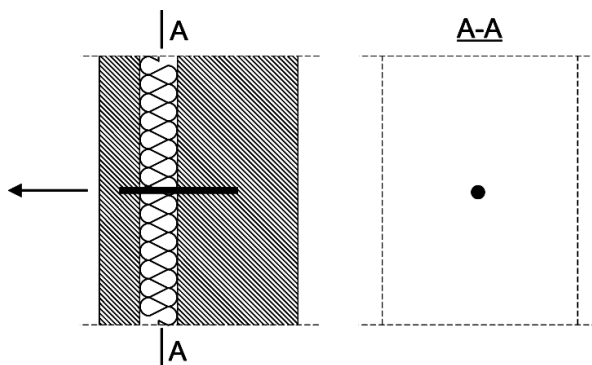
3.2. Mostki cieplne

Nazwa mostek termiczny wskazuje na jego istotę, czyli wzmożony przepływ ciepła przez obrys geometrycznej „zimniejszej” części w przegrodzie budowlanej. Najczęściej jest to spowodowane występowaniem w tych miejscach materiałów o większych współczynnikach przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] niż pozostała część przegrody. Lokalne zakłócenia strumienia ciepła występują nie tylko w samym mostku, lecz również w częściach przegrody, które bezpośrednio z nim sąsiadują. Można więc stwierdzić, że mostek termiczny składa się z części głównej, tzw. rdzenia i stref zakłóceń pola temperatury, w miejscach tych występuje dwu- lub trójkierunkowy przepływ ciepła. Norma PN-EN ISO 10211-1: 2008 [204] podaje następującą definicję mostka termicznego: mostek termiczny jest to część obudowy budynku, w której jednolity opór cieplny jest znacznie zmieniony przez:

- całkowite lub częściowe przebicie obudowy budynku przez materiały o innej przewodności cieplnej i/lub
- zmianę grubości warstw materiałów i/lub
- różnicę między wewnętrznymi i zewnętrznymi powierzchniami przegród, jak jest w przypadku naroża ścian czy też połączeń: ściana/podłoga, ściana/strop.

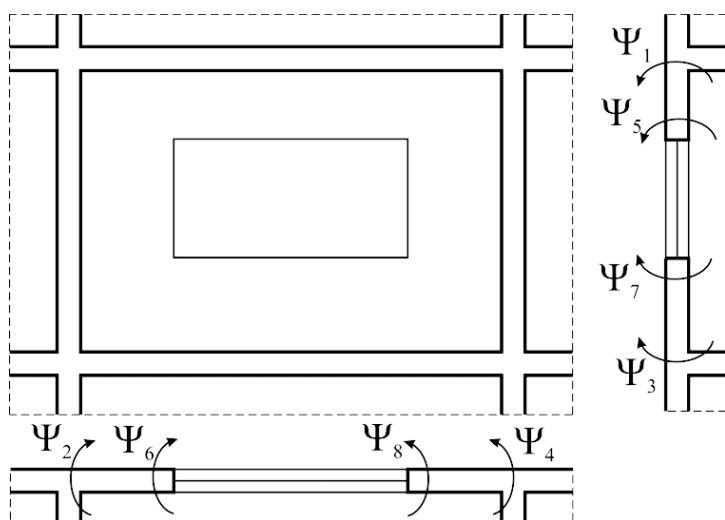
Mostki cieplne można podzielić na:

- Punktowe – mające charakter osiowo-symetryczny, np. miejsca przebicia warstwy izolacji cieplnej przez metalowe kotwy łączące część nośną z częścią lico-
wą w ścianie warstwowej, kołki mocujące izolację cieplną lub inne łączniki mechaniczne przechodzące przez warstwę izolacji cieplnej. Występuje w nich trójwymiarowy (3D) przepływ ciepła.



Rys. 3.1. Przykład punktowego mostka cieplnego (metalowa kotwa przechodząca przez warstwę termoizolacji, łącząca część nośną ściany z częścią lico-
wą)

- Liniowe – są to mostki o jednakowym przekroju poprzecznym na pewnej długości. Mostki tego typu występują bardzo często w budynkach i spowodowane są przez nieciągłości lub pocienienia warstwy izolacyjnej np. na długości ościeży okien, drzwi balkonowych lub nadproży oraz w obszarze węzłów konstrukcyjnych i wieńców w ścianach zewnętrznych. W mostkach liniowych występuje dwuwymiarowy (2D) przepływ ciepła.



Rys. 3.2. Przykłady liniowych mostków cieplnych w ścianie zewnętrznej
(na podstawie [209])

Mostki cieplne można również podzielić na:

- Dwu- i trójwymiarowe (przestrzenne).
- Geometryczne mostki cieplne – mostki te znajdują się tam, gdzie następuje zmiana kierunku powierzchni formujących kształt budynku lub tam, gdzie grubość tych powierzchni jest lokalnie zredukowana. Pojawiają się one na łączeniach pomiędzy ścianami, ścianą i stropem oraz ścianą i podłogą. Przykładem mogą być straty ciepła przez naroża i krawędzie ścian budynku.
- Konstrukcyjne mostki cieplne – powstają w miejscach, gdzie ciągłość konstrukcji budynku jest zaburzona przez połączenia z innymi elementami budynku. Typowymi przykładami takich mostków są:
 - miejsca połączenia stropów ze ścianami zewnętrznymi (wieńce żelbetowe),
 - miejsca połączenia stropów ze stropodachami i dachami (w tym również wieńce żelbetowe),
 - miejsca połączenia ścian zewnętrznych ze ścianami wewnętrznymi i dachami,
 - miejsca połączenia stropów ze ścianami piwnicznymi lub fundamentowymi,

- miejsca połączenia konstrukcji budynku z żelbetowymi płytami balkonowymi wspornikowo przechodzącymi przez ścianę, z belkami stalowymi lub żelbetowymi, z płytą balkonu, loggi lub tarasu (miejsca łączące część ogrzewaną budynku z nieogrzewaną lub otoczeniem zewnętrznym),
- ościeża okienne i drzwiowe,
- przejścia instalacji, tj. rury wodociągowe, kanalizacyjne, kominy, kanały wentylacyjne, kanały instalacji elektrycznej i telekomunikacyjnej itp.
- Strukturalne mostki cieplne – wynikają z technologii wykonania i niejednorodności przegród budowlanych (np. drewniana lub metalowa konstrukcja ściany szkieletowej wypełniona izolacją cieplną, konstrukcja ocieplonej połaci dachowej poddasza użytkowego).
- Systematyczne mostki cieplne – są specyficzną odmianą strukturalnych mostków cieplnych. Mostki te mogą powstawać na łączeniach ścian, w miejscach występowania kotew spinających ściany, w miejscach szkieletu drewnianego w ścianach szkieletowych itp. Ten typ mostków cieplnych jest uwzględniony w obliczeniach strat ciepła z budynku.
- Konwekcyjne mostki cieplne – są spowodowane ruchem powietrza wewnątrz konstrukcji przegród budowlanych. Termin „konwekcyjne” użyto, aby wskazać miejsca w konstrukcji, gdzie powstają niezamierzone i wymuszone ruchy powietrza. Mogą być spowodowane naturalną konwekcją w pustkach powietrznych po obu stronach izolacji cieplnej lub też w miejscach nieciągłości (przerwy) izolacji cieplnej też (np. połacie dachowe, ściany warstwowe). Straty ciepła zwiększają się tym bardziej, im bardziej możliwe jest przedostawanie się powietrza z zewnątrz budynku przez warstwę izolacji cieplnej lub przez inne nieszczelności obudowy budynku (np. przez strefę okapową połaci dachowej). Poza wychładzaniem pomieszczeń strumień przepływającego powietrza może spowodować gromadzenie się wilgoci wewnątrz konstrukcji budynku, co w rezultacie może spowodować wykraplanie się pary wodnej w warstwie izolacji cieplnej i pogorszenie jej właściwości izolacyjnych. Na dzień dzisiejszy stan wiedzy dotyczący tych mostków nie do końca pozwala na określenie ich wpływu na straty ciepła z budynku, lecz w większości przypadków wpływ ten można znacznie zmniejszyć przez właściwe zaprojektowanie i wykonanie newralgicznych miejsc. Mostki tego typu są zazwyczaj bardzo uciążliwe dla mieszkańców mieszkań poddaszowych (mostki konwekcyjne w połaciach dachowych), gdyż powodują znaczne ich wychładzanie (patrz rozdz. 6.7.5).

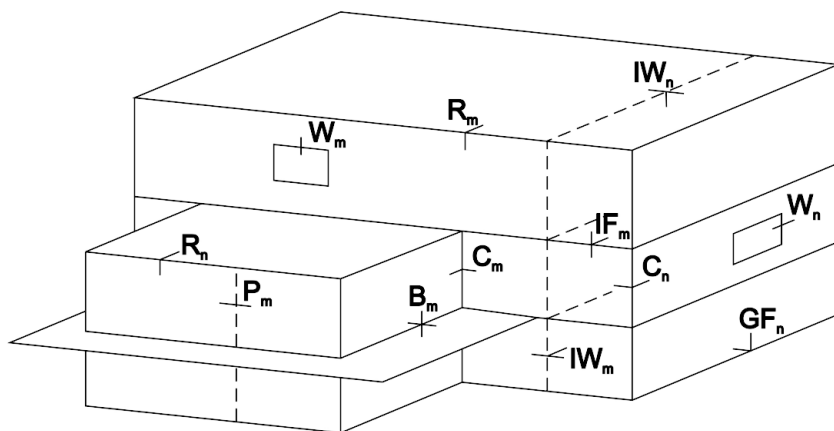
Mostki cieplne stanowią miejsca w przegrodach budowlanych, w których występują:

- większe straty ciepła w stosunku do sąsiadujących części przegród,
- niższe temperatury powierzchni przegrody od strony ogrzewanego pomieszczenia w stosunku do temperatury w częściach znajdujących się poza zasięgiem mostków termicznych,

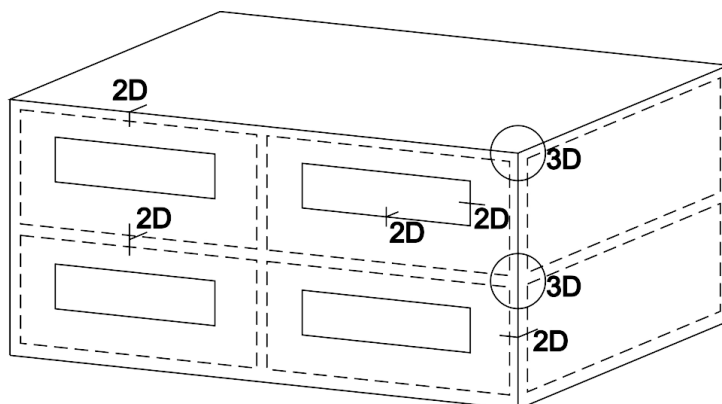
- kondensacja powierzchniowa pary wodnej,
- zabrudzenie (osiadanie kurzu, efekt „brudnych ścian”, efekt „brudnych stropów”),
- rozwój szkodliwych dla zdrowia grzybów pleśniowych.

W obrębie mostków cieplnych występuje dwu- i trójwymiarowy przepływ ciepła. Przykładami mostków dwuwymiarowych są ościeża okienne i drzwiowe, wspornikowe żelbetowe płyty balkonowe zamocowane w wieńcach, naroża ścian zewnętrznych itp. Mostkami trójwymiarowymi są przestrzenne węzły konstrukcyjne, przecięcia się mostków liniowych, styk dwóch ścian zewnętrznych ze stropodachem itp. Zasięg mostka cieplnego może być precyzyjnie wyznaczony komputerowymi programami obliczeniowymi. Natomiast wstępnie można przyjąć, że zasięg mostka obejmuje obszar o szerokości od dwóch do dwóch i pół grubości przegrody od krawędzi mostka, poza tym obszarem przyjmuje się jednokierunkowy przepływ ciepła. Wpływ mostków cieplnych liniowych na straty ciepła należy uwzględniać w obliczeniach charakterystyki energetycznej budynku w obliczaniu współczynnika strat ciepła przez przenikanie H_{Tr} . W projektowaniu przegród budowlanych konieczne jest również sprawdzenie spełnienia wymagań ochrony przed powierzchniową kondensacją pary wodnej i przed pojawieniem się grzybów pleśniowych. Przykłady najczęściej spotykanych dwu- i trójwymiarowych mostków cieplnych w strukturze budynku pokazano na rysunkach 3.3–3.5.

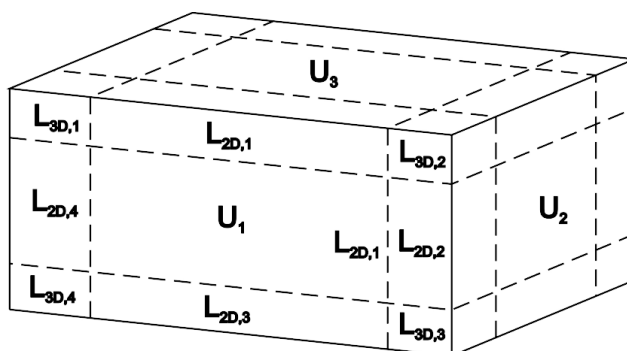
Na rysunkach 3.6–3.11 przedstawiono przykładowe wyniki analizy numerycznej przepływu ciepła przez różnie skonfigurowane ściany zewnętrzne [142]. Do analizy przyjęto w pomieszczeniach obliczeniową temperaturę powietrza 20 °C, obliczeniową temperaturę powietrza zewnętrznego –20 °C oraz normowe wartości współczynników



Rys. 3.3. Lokalizacja i typy zwykle występujących mostków cieplnych w budynkach. Oznaczenia: R – dach (ściana zewnętrzna – dach), B – balkony, C – naroża, F – stropy (ściana zewnętrzna – strop), IW – ściany wewnętrzne (ściana wewnętrzna – ściana zewnętrzna), P – słupy, W – otwory okienne i drzwiowe (ościeża) [212]



Rys. 3.4. Przykładowe miejsca występowania dwuwymiarowych (2D) i trójwymiarowych (3D) mostków cieplnych w budynku [212]



Rys. 3.5. Przykłady występowania jedno-, dwu- i trójwymiarowego przepływu ciepła w termicznej obudowie budynku (przepływ jednokierunkowy występuje w środkowych częściach przegród budowlanych, w tych miejscach oblicza się wartości współczynników przenikania ciepła U_c) [212]

przejmowania ciepła po obu stronach przegród. Na każdym rysunku pokazano rozkład temperatury, izotermy i kierunki przepływu strumienia ciepła w przekroju ściany oraz temperaturę na jej powierzchniach granicznych (te ostatnie mogą być zmierzone kamerą termowizyjną).

Celem analizy numerycznej było zobrazowanie mechanizmu wymiany ciepła od prostych przypadków rozwiązań ścian zewnętrznych jednomateriałowych do przypadków bardziej złożonych, co skutkuje różnym przebiegiem rozkładu temperatury w przekroju ściany oraz miejscach mostków cieplnych i w konsekwencji skutkuje różnym rozkładem temperatury na jej powierzchniach granicznych, który może być zidentyfikowany za pomocą kamery termowizyjnej.

W przegrodzie jednorodnej o stałej grubości (rys. 3.6) izotermy są równoległe, a linie kierunku strumienia ciepła prostopadłe do izoterm (w tym przypadku również

prostopadłe do obu powierzchni granicznych przegrody). W pozostałych przypadkach (rys. 3.7–3.11), gdy występują zaburzenia jednorodności przegrody w postaci niejednorodności materiałowej lub zmiany jej geometrii, widoczne są odchylenia przebiegu izoterm i kierunków strumienia ciepła (przypomnijmy, przy krzywoliniowym przebiegu izotermi kierunek strumienia ciepła jest zawsze prostopadły do stycznej poprowadzonej do izotermi i skierowany w kierunku niższej temperatury). W miejscach tych występuje dwu- lub trójwymiarowy przepływ ciepła. Jednocześnie w miejscach takich najczęściej następuje wzrost gęstości strumienia ciepła i lokalne obniżenie temperatury powierzchni przegrody od strony ogrzewanego pomieszczenia oraz wzrasta ryzyko kondensacji powierzchniowej.

W praktyce pomiarowej podobna analiza obliczeniowa bardzo często jest niezbędna do przeprowadzenia poprawnej interpretacji termogramów, obrazujących miejsca występowania liniowych mostków cieplnych oraz do wysuwania właściwych wniosków i proponowania poprawnych zaleceń dla zleceniodawcy badań termowizyjnych. Nie zawsze bowiem niejednorodny rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni przegrody czy od strony pomieszczenia jest wynikiem błędu projektowego i/lub wykonawczego.

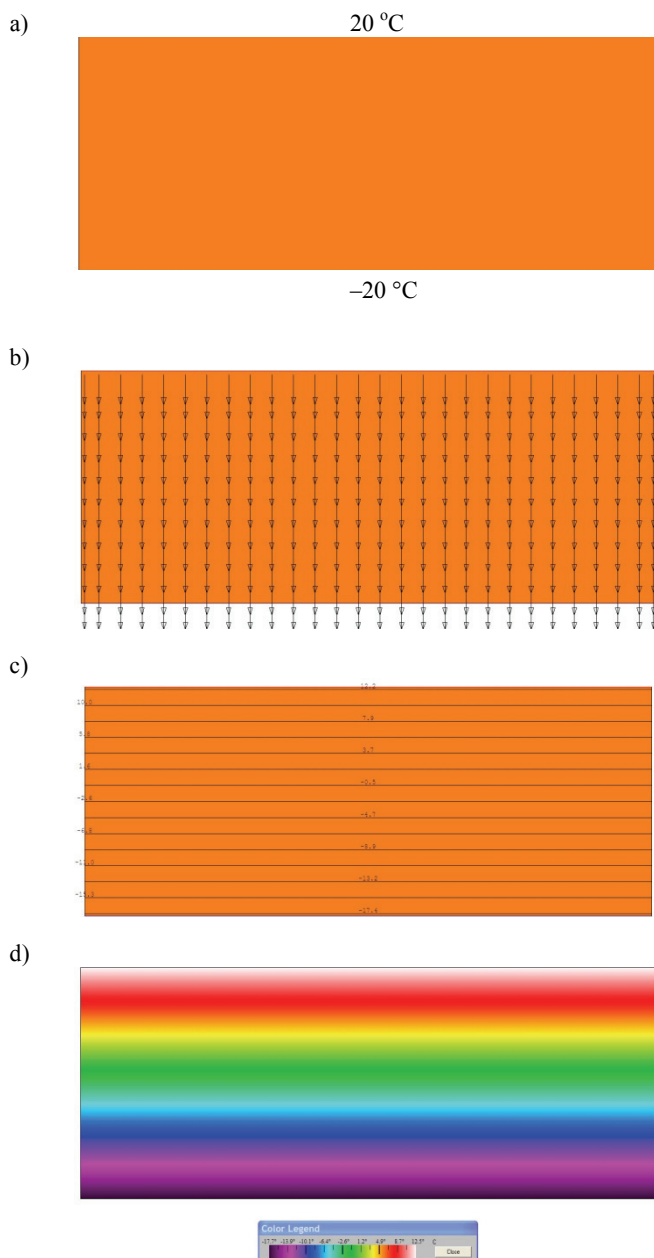
Problematyka mostków cieplnych w przegrodach budowlanych jest ujęta w trzech normach europejskich:

1. PN-EN ISO 10211:2008 Mostki cieplne w budynkach – Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni Część 1: Metody ogólne [210],
2. PN-EN ISO 10211:2008 Mostki cieplne w budynkach – Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni Część 2: Liniowe mostki cieplne [211],
3. PN-EN ISO 14683:2008 Mostki cieplne w budynkach – Liniowy współczynnik przenikania ciepła – Metody uproszczone i wartości orientacyjne [212].

Dwie pierwsze normy są przeznaczone praktycznie jedynie dla specjalistów opracowujących programy komputerowe do obliczeń pól temperatury w elementach obudowy termicznej budynków lub wykonujących obliczenia pól temperatury w elementach konstrukcji na potrzeby opracowania katalogów mostków cieplnych, jako narzędzia wspomagającego dla projektantów. Ze względu na złożoność i komplikację nie nadają się one do bezpośredniego wykorzystania przez projektantów.

Norma PN-EN ISO 14683:2008 [212] podaje uproszczoną metodę obliczania strumienia cieplnego przepływającego przez mostki cieplne, które pogrupowano według typów pokazanych na rysunku 3.2. Do obliczeń założono cztery położenia warstwy izolacji cieplnej:

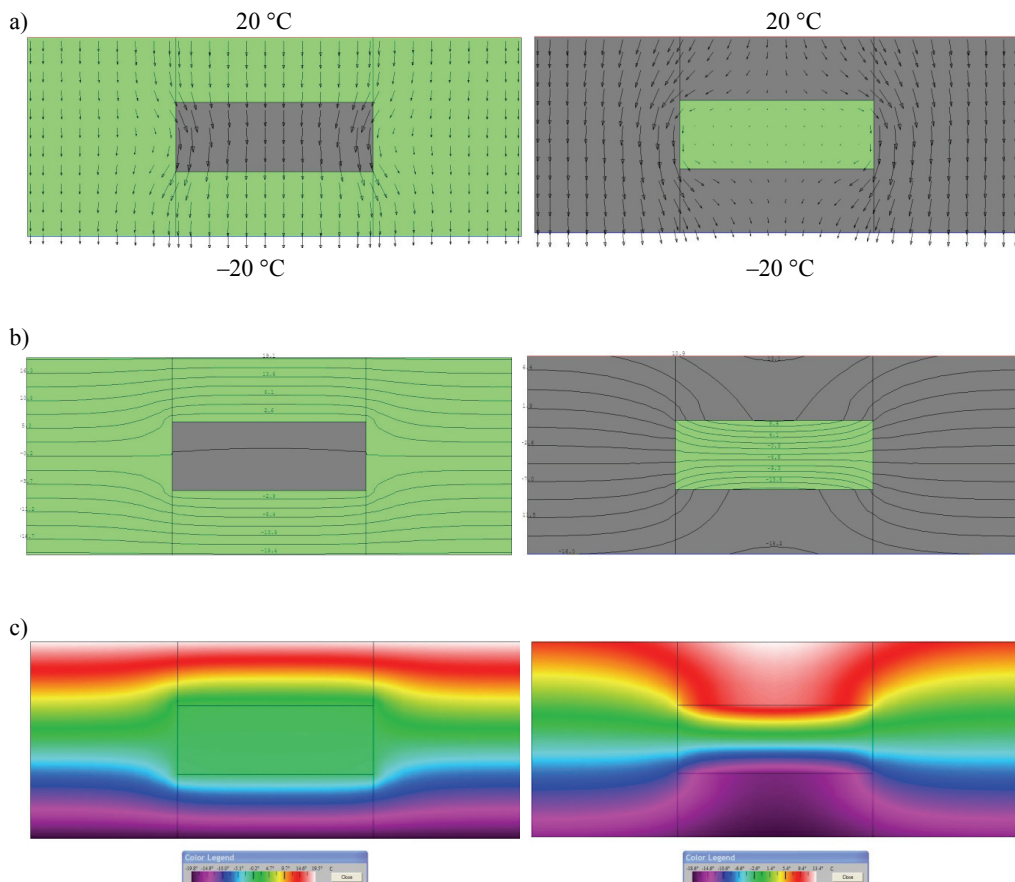
- na zewnątrz przegrody budowlanej,
- w środku grubości,
- od strony wewnętrznej,
- na całej grubości (przegroda jednorodna, np. lekka konstrukcja murowa lub drewniana ściana szkieletowa z wypełnieniem wełną mineralną).



Rys. 3.6. Przepływ ciepła przez ścianę zewnętrzną jednomateriałową, wykonaną z cegły pełnej:
 a) przekrój ściany, b) wektory strumienia ciepła, c) izotermy, d) rozkład temperatury w przekroju ściany i na jej powierzchniach granicznych. Jest to typowa ściana jednomateriałowa bez zniekształceń w postaci wtrąceń materiałowych czy też zmiany geometrii – izotermy są równoległe do powierzchni granicznych ściany, wektory zaś strumienia ciepła prostopadłe do izoterm

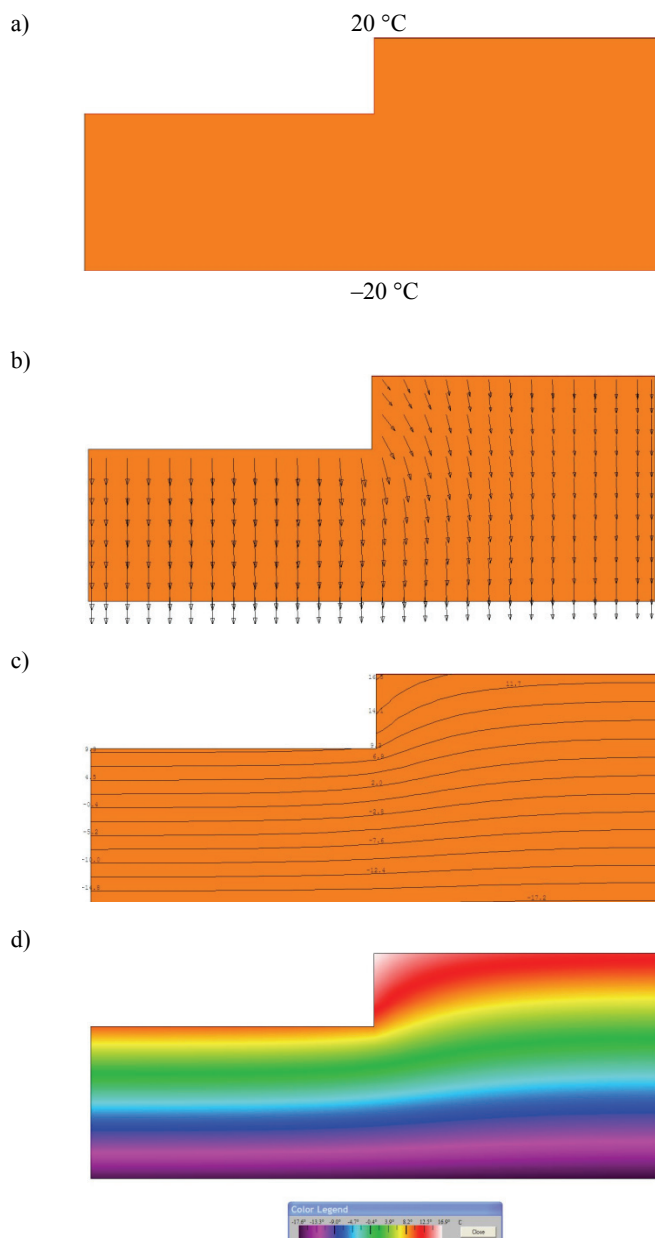
Ściana zewnętrzna ze styropianu
z wtrąceniem materiałowym z żelbetu

Ściana zewnętrzna z żelbetu z wtrąceniem
materiałowym ze styropianu

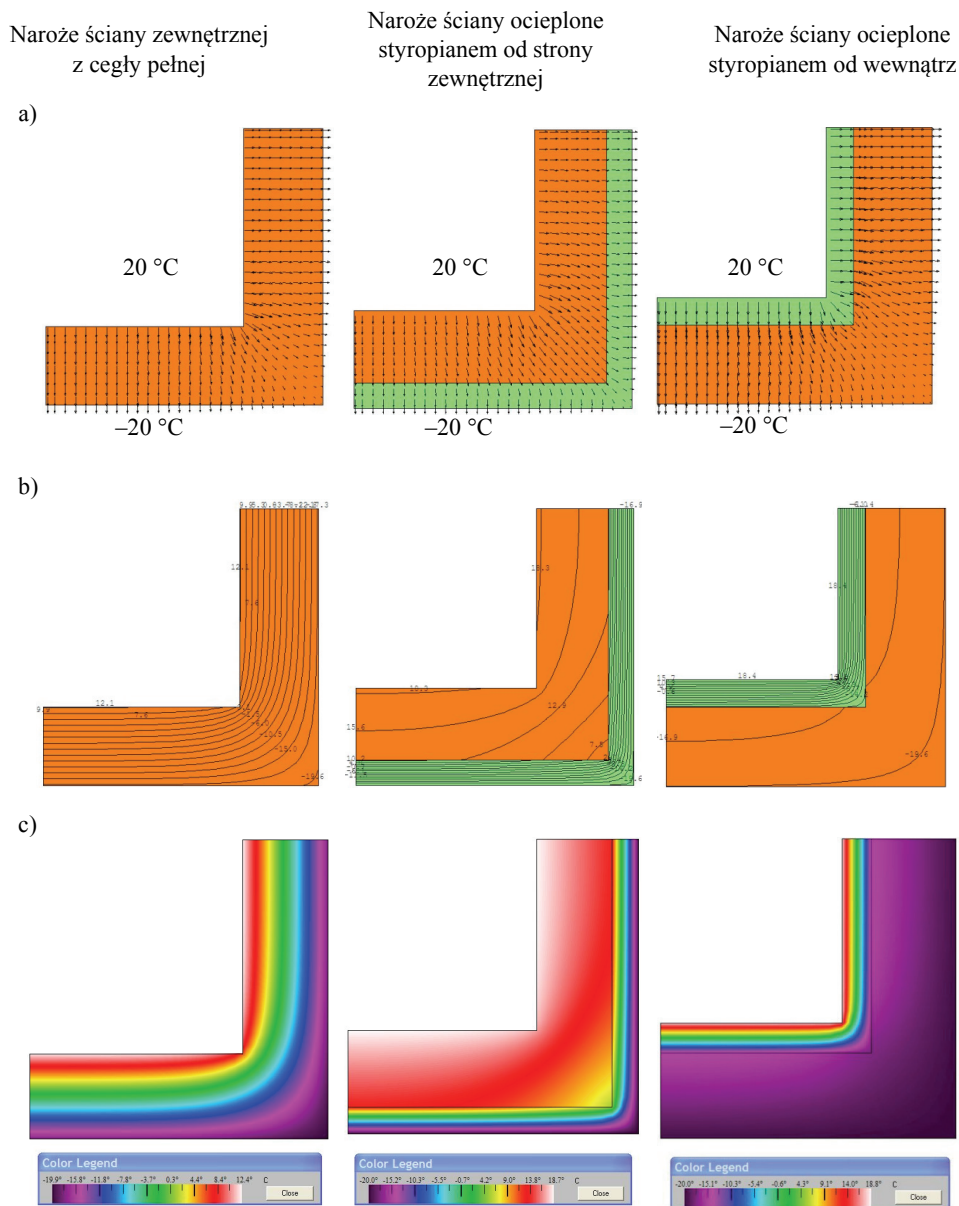


Rys. 3.7. Przepływ ciepła przez ściany zewnętrzne wykonane z materiałów charakteryzujących się skrajnymi wartościami współczynników przewodzenia ciepła, tj. ze styropianu ($\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) i z żelbetu ($\lambda = 1,70 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), z wtrąceniami materiałowymi z żelbetu i ze styropianu (analizę obliczeniową przeprowadzono w celu zilustrowania mechanizmu przepływu ciepła przez skrajnie zróżnicowane pod względem cieplnym przegrody budowlane zewnętrzne): a) wektory strumienia ciepła, b) izotermy, c) rozkład temperatury w przekroju ściany i na powierzchniach granicznych ściany

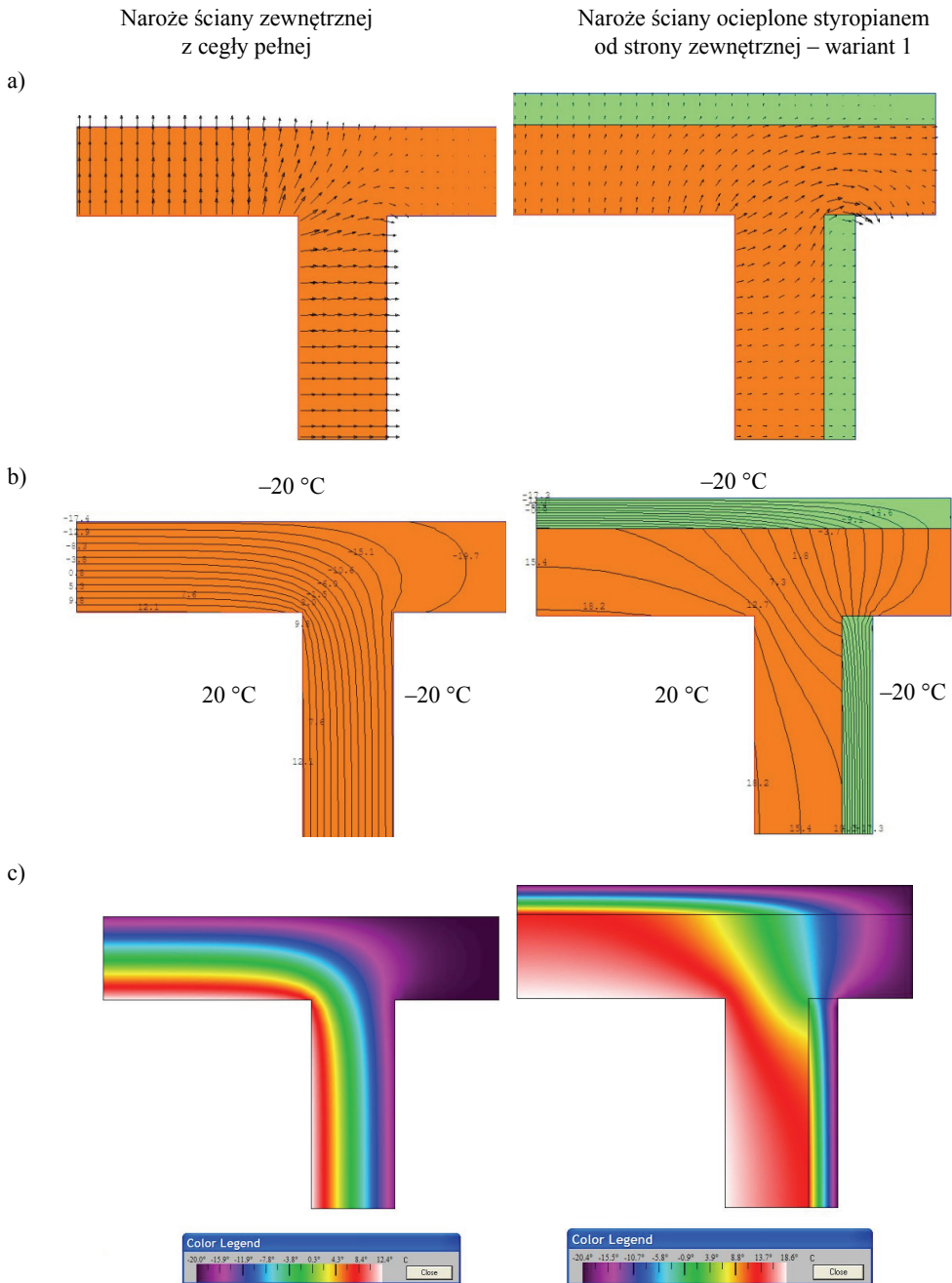
Dla każdego typu liniowego mostka cieplnego i położenia warstwy izolacji cieplnej podano wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła w zależności od sposobu wymiarowania mostka. W normie sformułowano również wymagania dotyczące katalogów mostków cieplnych i metod obliczeń.



Rys. 3.8. Przepływ ciepła przez ścianę zewnętrzną z cegły pełnej o zmiennej grubości: a) przekrój przez ścianę, b) wektory strumienia ciepła, c) izotermy, d) rozkład temperatury w przekroju ściany i na jej powierzchniach granicznych. Zmiana geometrii ściany powoduje zmianę przebiegu izoterm oraz wektorów strumienia ciepła – to zakłócenie jest widoczne w rozkładzie temperatury w przekroju ściany



Rys. 3.9. Przepływ ciepła przez naroże ściany zewnętrznej wykonane z cegły pełnej bez ocieplenia oraz z ociepleniem styropianem od strony zewnętrznej i wewnętrznej: a) wektory strumienia ciepła, b) izotermy, c) rozkład temperatury w przekroju ściany i na jej powierzchniach granicznych. Wyniki symulacji komputerowych potwierdzają, że z uwagi na rozkład temperatury w przegrodzie i na potencjalne ryzyko wystąpienia kondensacji pary wodnej na powierzchni od strony pomieszczenia i w przegrodzie; optymalnym rozwiązaniem jest zaizolowanie przegród od strony chłodniejszej (w przypadku budynków ogrzewanych jest to strona zewnętrzna)

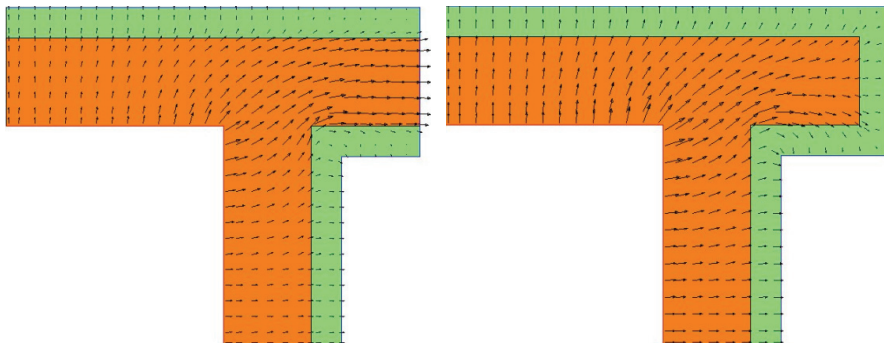


Rys. 3.10. Przepływ ciepła przez naroże ściany zewnętrznej z cegły pełnej bez ocieplenia i z ociepleniem styropianem od strony zewnętrznej – wariant 1: a) wektory strumienia ciepła, b) izotermy, c) rozkład temperatury w przekroju ściany i na powierzchniach granicznych

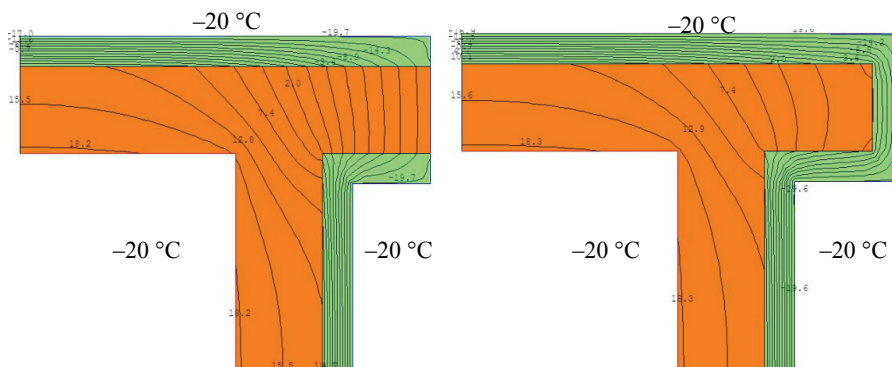
Naroże ściany ocieplone styropianem
od strony zewnętrznej – wariant 2

Naroże ściany ocieplone styropianem
od strony zewnętrznej – wariant 3

a)



b)



Strumień ciepła Φ [W] przenikający przez termiczną obudowę budynku, oddzielającą środowiska zewnętrzne i wewnętrzne o temperaturze, odpowiednio, t_e oraz t_i (w [°C]), oblicza się ze wzoru:

$$\Phi = H_T (t_i - t_e) \quad (3.1)$$

Współczynnik strat ciepła przez przenikanie, H_T , [W/K] oblicza się ze wzoru [211]:

$$H_T = H_D + H_g + H_U + H_A \quad (3.2)$$

gdzie: H_D – bezpośredni współczynnik strat ciepła przez termiczną obudowę budynku (między przestrzenią ogrzewaną lub chłodzoną a środowiskiem zewnętrznym) zdefiniowany równaniem (3.3), [W/K],

H_g – współczynnik strat ciepła przez grunt, obliczany wg EN ISO 13370 [210], [W/K],

H_U – współczynnik strat ciepła przez przestrzeń nieogrzewaną, obliczany zgodnie z EN ISO 13789 [211], [W/K].

H_A – współczynnik strat ciepła do przylegających budynków, obliczany zgodnie z EN ISO 13789 [211], [W/K].

Wartość współczynnika strat ciepła przez przenikanie, bezpośrednio z pomieszczeń ogrzewanych do środowiska zewnętrznego, przez termiczną obudowę budynku lub przez jej część, oblicza się albo bezpośrednio za pomocą metod komputerowych, zgodnie z normą PN-EN ISO 10211 [210] i [211], albo ze wzoru:

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k + \sum_j \chi_j \quad (3.3)$$

gdzie: A_i – pole powierzchni elementu i obudowy budynku, [m²],

U_i – współczynnik przenikania ciepła elementu i obudowy budynku, [W/(m²·K)],

l_k – długość liniowego mostka cieplnego k , [m],

Ψ_k – liniowy współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka cieplnego k , przyjęty zgodnie z PN-EN ISO 14683 [212] lub obliczony zgodnie z PN-EN ISO 10211 [210], [211], [W/(m·K)],

χ_j – punktowy współczynnik przenikania ciepła punktowego mostka cieplnego j , obliczany zgodnie z ISO 10211 [210], [211], [W/K].

Ostatni człon równania (3.3) (wpływ mostków cieplnych punktowych) uwzględnia się jako poprawkę w obliczaniu wartości współczynnika przenikania ciepła U_c przegrody budowlanej i dlatego nie powinien być tu uwzględniany.

Średnią wartość współczynnika przenikania ciepła termicznej obudowy budynku lub jej części można obliczyć według wzoru:

$$U_{k, sr} = \frac{H_D}{\sum_i A_i} \quad (3.4)$$

Dla i -tego elementu termicznej obudowy budynku (np. dla ściany zewnętrznej) współczynnik przenikania ciepła z uwzględnieniem wpływu mostków cieplnych liniowych i punktowych można obliczać ze wzoru:

$$U_{k,i} = \frac{H_{D,i}}{A_i} = U_i + \frac{\sum_k l_{k,i} \Psi_{k,i}}{A_i} + \frac{\sum_j \chi_{j,i}}{A_i} \quad (3.5)$$

Wzór (3.5) jest wzorem wyjściowym do obliczania współczynnika przenikania ciepła U_c , uwzględniającego dodatek U ze względu na wpływ punktowych mostków cieplnych (np. wpływ kotew metalowych w murze warstwowym lub wpływ kołków mocujących izolację cieplną do ściany).

Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ liniowego mostka cieplnego k można obliczyć różnymi metodami:

- numerycznymi,
- korzystając z katalogów mostków cieplnych,
- korzystając ze wzorów przybliżonych,
- przyjmując wartości orientacyjne według PN-EN ISO 14683 [212].

W wyborze konkretnej metody należy jednak zwrócić uwagę na jej dokładność, ponieważ powinna ona odpowiadać dokładności wymaganej w obliczeniach całkowitych strat ciepła, uwzględniających liniowe mostki cieplne. W związku z tym norma podaje oczekiwaną niepewność obliczenia współczynnika Ψ , wartości te podano w tabeli 3.1.

Najdokładniejsze wyniki dają obliczenia numeryczne, natomiast katalogi mostków cieplnych mogą dać projektantowi dobre przykłady rozwiązań, jeżeli stosuje się je przed ostatecznym zaprojektowaniem detali. Stosowanie bardziej elastycznych katalogów elektronicznych, zawierających systemy baz danych, w których dokładne wymiary i materiały można zmieniać, daje również dokładność taką jak w obliczeniach komputerowych. Oprócz dokładnych metod, istnieje wiele metod obliczeń przybliżonych do wykonywania z użyciem ręcznych kalkulatorów lub prostego oprogramowania komputerowego, jednak większość z nich ma zastosowanie tylko do szczególnych

Tabela 3.1. Oczekiwana niepewność obliczania wartości współczynnika Ψ w zależności od metody obliczania [153]

Metoda obliczenia	Oczekiwana niepewność Ψ
Obliczenia numeryczne	$\pm 5\%$
Katalog mostków cieplnych	$\pm 20\%$
Obliczenia ręczne	$\pm 20\%$
Wartości orientacyjne	od 0% do +50%

typów mostków. Konkretnie obliczenia przybliżone mogą być bardzo dokładne w przypadku określonego zakresu stosowania, lecz poza tym zakresem mogą znacznie przekłamywać wyniki.

Wartości współczynników Ψ podane w normie są z zasady przeszacowane nawet do 50% i należy je stosować wówczas, gdy nie jest znana rzeczywista wartość Ψ , gdy brak szczegółów konkretnego mostka cieplnego lub przybliżona wartość jest adekwatna do wymaganej dokładności obliczeń [212]. Różnorodność mostków cieplnych w odniesieniu do konfiguracji, ich geometrii, materiałów i wymiarów, które mogą wystąpić oraz do sposobu obliczania strat ciepła, nie pozwala na opracowanie stabelaryzowanej, uniwersalnej i praktycznej listy najczęściej występujących liniowych współczynników przenikania ciepła. Wartości orientacyjne liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ są podane w normie EN ISO 14683:2007 [212] (patrz również tabela 3.2), które mogą być zastosowane do oceny ok. 50 typowych, powszechnie występujących dwuwymiarowych mostków cieplnych. Wartości te mogą być użyte, jeżeli nie ma innych dokładniejszych wartości obliczeń – jednak praktyka projektowa wskazuje, że wartości te są obecnie najczęściej stosowane nie tylko na etapie wykonywania projektów, ale również podczas wykonywania świadectw charakterystyki energetycznej budynków o różnym przeznaczeniu. Przykładowe wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ przedstawiono w tabeli 3.2 [153].

Mostki cieplne w termicznej obudowie budynku bardzo często powodują kondensację pary wodnej na powierzchni przegród od strony pomieszczenia i w konsekwencji rozwój szkodliwych dla zdrowia grzybów pleśniowych. Grzyby pleśniowe do rozwoju potrzebują odpowiednią temperaturę i wilgotność podłoża, brak ruchu powietrza, brak promieniowania słonecznego oraz pożywkę organiczną (pożywienie czerpią z kurzu, farby, drobinek cieczy, tłuszczów itp.). Najczęściej rozwijają się w zaciemnionych miejscach za zasłonami, za meblami, w łazienkach itp. Grzyby pleśniowe powodują następujące skutki [177], [178]:

- Higieniczno-sanitarne, które polegają na znacznym pogorszeniu stopnia zdrowotności pomieszczeń dla ludzi i zwierząt. Zagrzybione pomieszczenia charakteryzują się zwiększoną wilgotnością i nieprzyjemnym zapachem, a w powietrzu znajdują się miliony zarodników wytwarzanych przez owocniki grzybów. Zarodniki są wdychane, co powoduje złe samopoczucie, a u osób najbardziej bezbronych i jednocześnie najdłużej przebywających w budynkach, tj. dzieci i osób starszych – bóle głowy, senność, zmęczenie, rozdrażnienie, choroby układu oddechowego itp.
- Techniczne, polegające przede wszystkim na zmniejszeniu wytrzymałości elementów i konstrukcji, co może prowadzić do ich częściowego i całkowitego zniszczenia.

Tabela 3.2. Przykładowe wartości współczynników Ψ (na podstawie [153])

Lp.	Charakterystyka rozwiązania detalu	Wartość Ψ W/(m·K)
Ościeżnice okienne		
1	Okno osadzone „na styk” do warstwy izolacji cieplnej, w licu zewnętrznym muru; izolacja muru nie zachodzi na ościeżnicę	0,19
2	Okno osadzone w licu zewnętrznym muru; izolacja muru zachodzi 3 cm na ościeżnicę	0,05
3	Okno osadzone na wewnętrznej krawędzi muru; bez izolacji cieplnej	0,39
Nadproże okienne		
4	Okno osadzone „na styk” do warstwy izolacji cieplnej, izolacja muru nie zachodzi na ościeżnicę	0,29
5	Okno osadzone „na styk” do warstwy izolacji cieplnej, izolacja muru zachodzi 3 cm na ościeżnicę	0,06
6	Okno osadzone na wewnętrznej krawędzi muru; nadproże bez izolacji cieplnej od spodu	0,60
7	Okno osadzone na wewnętrznej krawędzi muru; izolacja muru zachodzi 3 cm na ościeżnicę, izolacja nadproża od spodu	0,20
Podokiennik		
8	Okno osadzone „na styk” do warstwy izolacji cieplnej, kamienny podokiennik wewnętrzny oddzielony od kamiennego podokiennika zewnętrznego przekładką ze styropianu o grubości 1 cm	0,39
9	Okno osadzone w licu wewnętrznym muru, mur bez izolacji cieplnej	0,57
10	Okno osadzone w licu wewnętrznym muru, mur pokryty izolacją cieplną o grubości 3 cm	0,22
11	Okno osadzone w licu zewnętrznym muru, kamienny podokiennik wewnętrzny, izolacja cieplna zachodzi 3 cm na ościeżnice	0,07
Płyta balkonowa		
12	Żelbetowa płyta wspornikowa w przekroju poza drzwiami balkonowymi	0,65
13	Żelbetowa płyta wspornikowa w przekroju przez drzwi balkonowe	0,91
14	Żelbetowa płyta balkonowa o własnej konstrukcji (oddzielona od muru i stropu przekładką izolacyjną o grubości jak w murze) w przekroju poza drzwiami balkonowymi	0,07
15	Żelbetowa płyta balkonowa o własnej konstrukcji (oddzielona od muru i stropu przekładką izolacyjną o grubości jak w murze) w przekroju przez drzwi balkonowe	0,57
Wiciec żelbetowy w ścianie jednomaterialowej		
16	Ocieplony betonem komórkowym i styropianem	0,06
17	Ocieplony tylko styropianem	0,05
18	Ocieplony styropianem również poza wieńcem	0,04

- Estetyczne, polegają na pogorszeniu walorów estetycznych porażonych elementów (np. przebarwienia na ciemniejsze kolory i łuszczenie się powłok malarских), odpadanie okładzin i tynków.

W pierwszej kolejności należy usunąć zagrzybienie i odgrzybić porażone miejsca, ale przede wszystkim należy usunąć przyczyny występujących nieprawidłowości – najczęściej sprowadza się to do ocieplenia przegród budowlanych i do udrożnienia wentylacji pomieszczeń. Najskuteczniejszą metodą zaradczą jest oczywiście profilaktyka, która odpowiednio stosowana w ochronie budynków powinna wystąpić w fazie projektowania (a w tym przede wszystkim stosowanie poprawnych rozwiązań w zakresie termicznego izolowania mostków cieplnych, stosowanie odpowiedniego systemu wentylacji pomieszczeń i budynku) oraz wykonawstwa i eksploatacji budynku.

W projektowaniu przegród budowlanych konieczne jest sprawdzenie czy minimalna temperatura na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia spełnia kryterium ochrony przed występowaniem powierzchniowej kondensacji pary wodnej i przed rozwojem grzybów pleśniowych. Gdy warunek nie jest spełniony, istnieje duże ryzyko pojawienia się kondensacji pary wodnej na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, rozwoju grzybów pleśniowych oraz pogorszenia parametrów mikroklimatu pomieszczeń i komfortu cieplnego, a w konsekwencji ryzyko wystąpienia opisanych wcześniej skutków. Ryzyko to zależy od izolacyjności cieplnej przegrody budowlanej, przejmowania ciepła na jej powierzchni oraz od wartości temperatury powietrza w pomieszczeniu i temperatury powietrza zewnętrznego. W celu scharakteryzowania jakości cieplnej przegród budowlanych ze względu na temperaturę powierzchni, niezależnie od wartości temperatury powietrza po obu stronach przegrody, stosuje się tzw. bezwymiarowy współczynnik temperaturowy f_{Rsi} , który służy do oceny ryzyka kondensacji powierzchniowej, oparty na typowych, realistycznych warunkach brzegowych. Wartość tego współczynnika oblicza się ze wzoru:

$$f_{Rsi} = \frac{v_i - t_e}{t_i - t_e} \quad (3.6)$$

gdzie: v_i – temperatura powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, [°C],
 t_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, [°C],
 t_e – temperatura powietrza zewnętrznego, [°C].

Wymaganą wartość dopuszczalną współczynnika temperaturowego f_{Rsi} w pomieszczeniach ogrzewanych do temperatury co najmniej 20 °C w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej należy określać dla założenia, że średnia miesięczna wilgotność względna powietrza wewnętrznego jest równa $\varphi_i = 50\%$, przy czym dopuszcza się przyjmowanie wymaganej wartości tego współczynnika równej 0,72 (wartość dopuszczalną współczynnika temperaturowego $f_{Rsi, dop}$ określa się z uwzględnieniem intensywności wentylacji i emisji wilgoci w pomieszczeniu – w odniesieniu do typowych warunków eksploatacji budynków w Polsce wartość dopuszczalną można przyjmować równą 0,72 [153]):

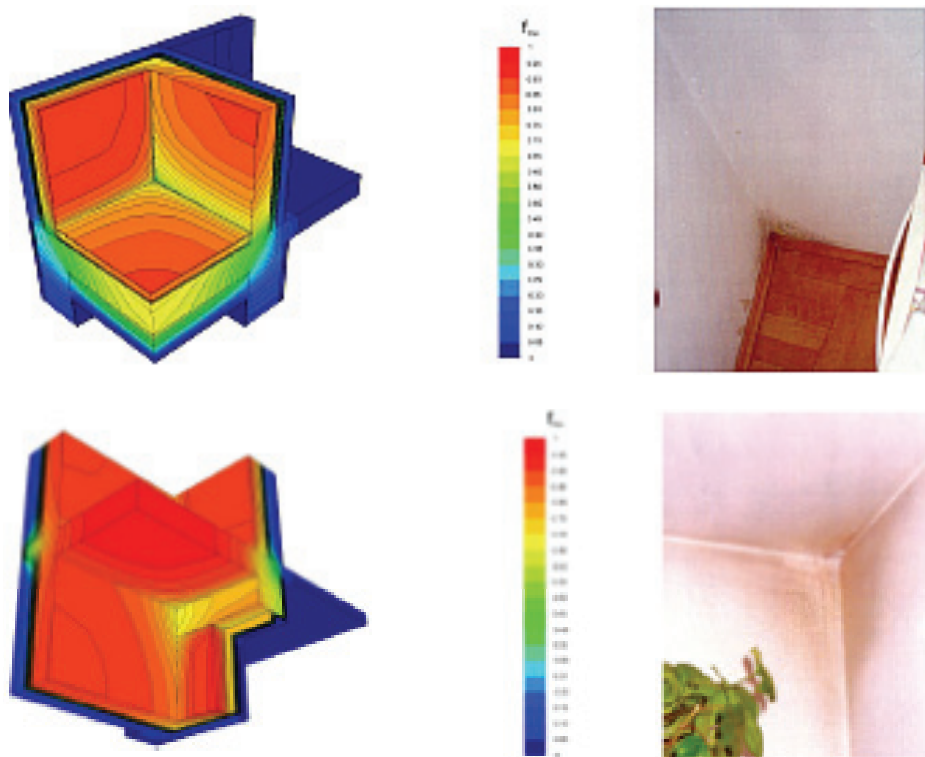
$$f_{Rsi} \geq f_{Rsi, dop} = 0,72 \quad (3.7)$$

Szczegółowe obliczenia wilgotnościowe wykonuje się zgodnie z normą [208].

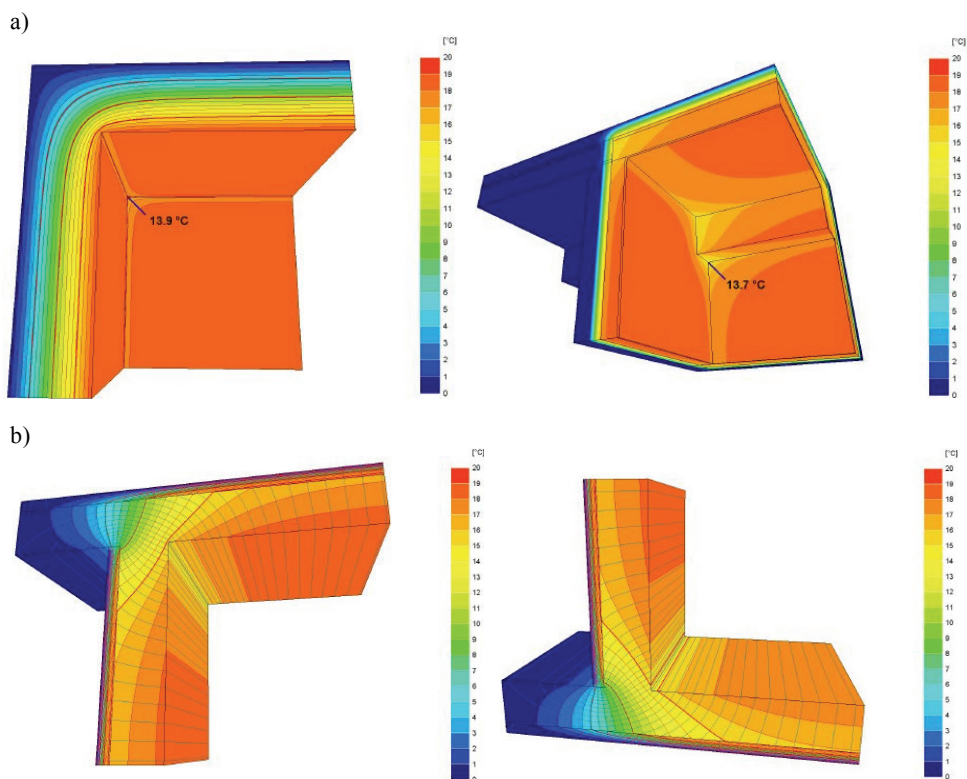
Powierzchnia przegrody budowlanej od strony pomieszczenia jest zabezpieczona przed kondensacją pary wodnej, jeżeli jej temperatura jest wyższa od punktu rosy powietrza w pomieszczeniu. Na rysunku 3.12 przedstawiono przykłady trójwymiarowych mostków cieplnych oraz ich skutki w postaci rozwoju grzybów pleśniowych w najzimniejszych miejscach mostków.

Na rysunku 3.13 przedstawiono wyniki symulacji komputerowej rozkładu temperatury w przekroju i na powierzchni przegród trójwymiarowych (3D) i dwuwymiarowych (2D) mostków cieplnych [96]. Wyniki symulacji są niezbędne do oceny ryzyka wystąpienia kondensacji powierzchniowej, według wzorów (3.6) i (3.7).

Bardzo skuteczną metodą znaczącego ograniczenia wpływu mostków termicznych w termicznej obudowie budynków na ich straty ciepła jest:



Rys. 3.12. Przykłady trójwymiarowych mostków cieplnych z pokazaniem wyników symulacji obliczeniowej rozkładu temperatury i miejsc porażenia biologicznego przez grzyby pleśniowe (na podstawie [153])



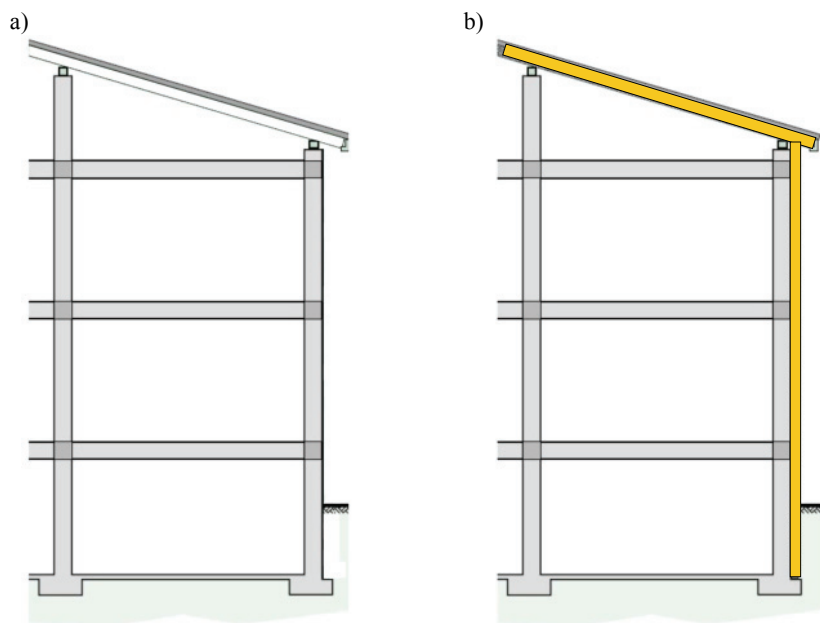
Rys. 3.13. Przykładowe wyniki symulacji komputerowych rozkładu temperatury na powierzchni i wewnątrz mostków cieplnych: a) mostki cieplne trójwymiarowe (3D), b) mostki cieplne dwuwymiarowe (2D) [96]

- zachowanie ciągłości izolacji cieplnej,
- i jeżeli jest to możliwe, zachowanie stałej grubości tej izolacji w miejscach połączeń elementów budowlanych.

Oczywiście, każda z przegród stanowiących termiczną obudowę budynku powinna spełniać wymagania co do współczynnika przenikania ciepła.

Na rysunku 3.14 przedstawiono przykład nieprawidłowego i prawidłowego położenia izolacji cieplnej połaci dachowej i ściany zewnętrznej budynku, zapewniającego ciągłość izolacji.

W dalszej części przedstawiono przykładowe wyniki analizy numerycznej rozkładu temperatury w miejscach występowania mostków cieplnych liniowych, pojawiających się w analizowanych przekrojach mostków oraz na powierzchniach granicznych połączeń przegród. Celem analizy numerycznej było sprawdzenie czy temperatura na powierzchniach przegród od strony pomieszczenia nie obniżyła się poniżej wartości:

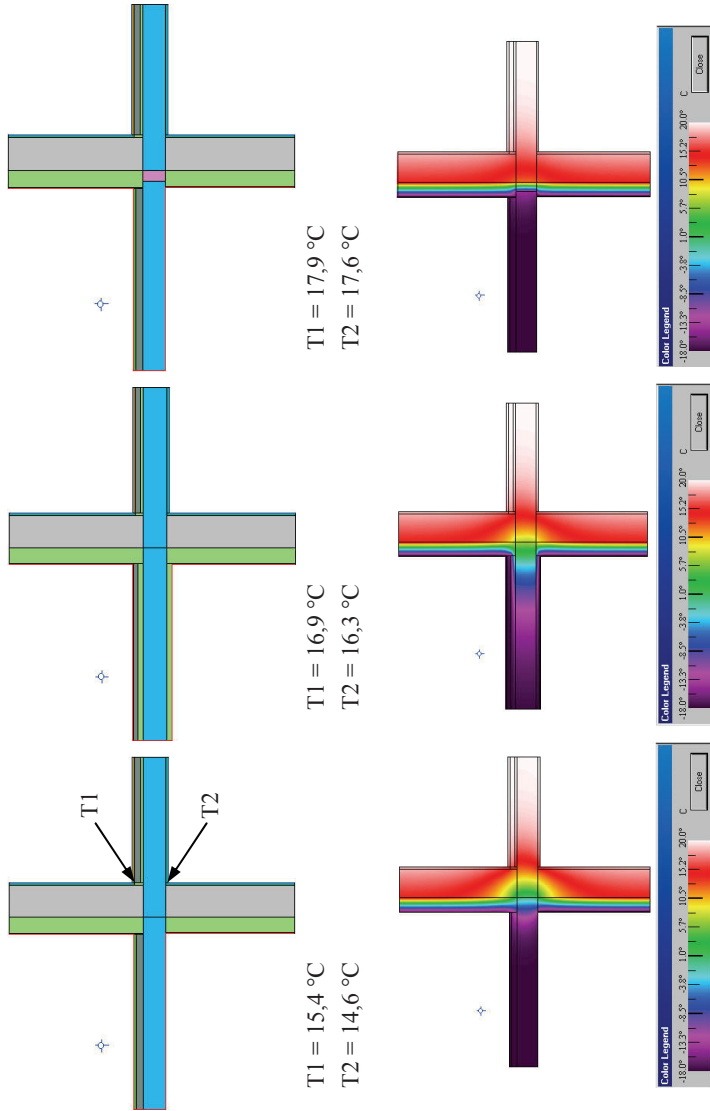


Rys. 3.14. Przykład położenia izolacji cieplnej w połaci dachowej i na ścianie zewnętrznej:
 a) budynek przed ociepleniem, b) budynek po ociepleniu – przykład prawidłowego umieszczenia izolacji cieplnej na ścianie zewnętrznej i w połaci dachowej, zachowana jest ciągłość i stała grubość izolacji cieplnej, zaizolowana jest również ściana piwnicy nieogrzewanej

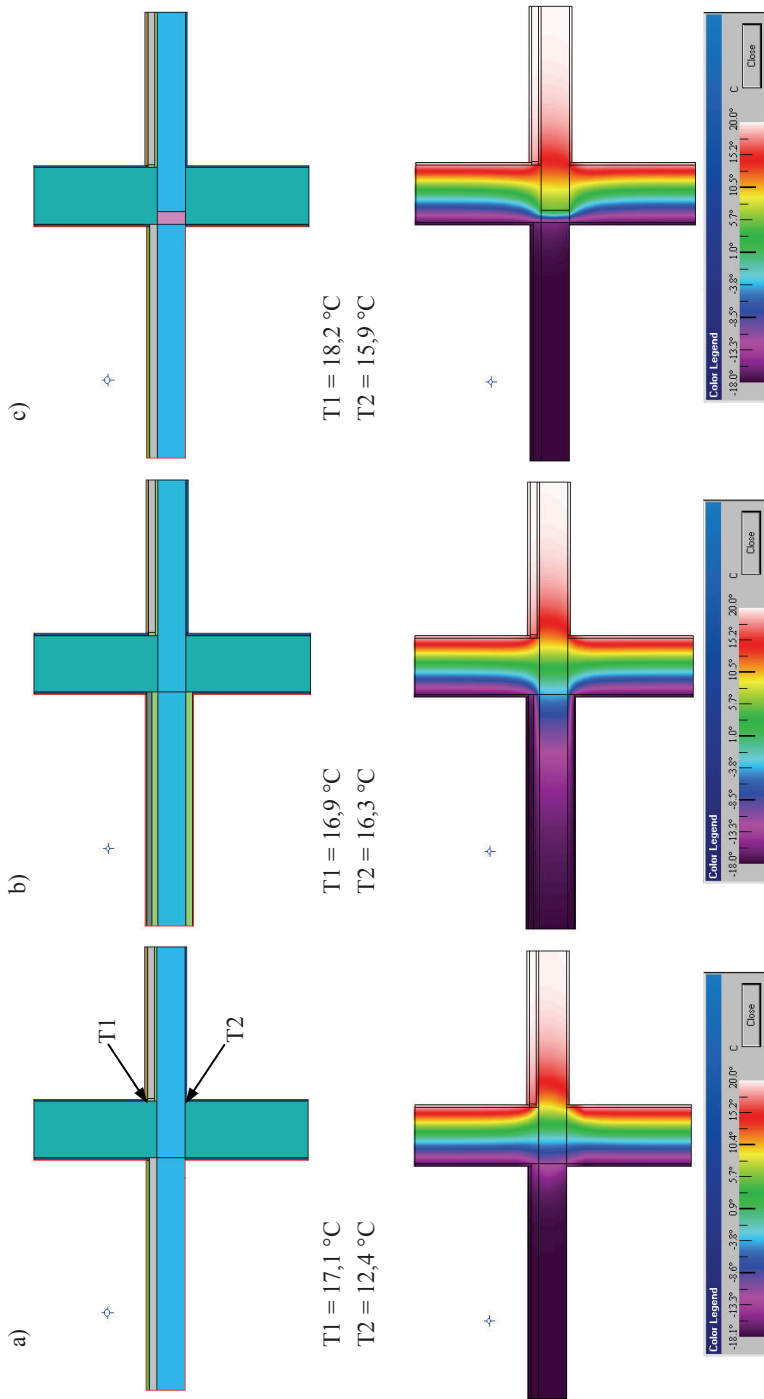
punkt rosy plus $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jest to skuteczny i prosty sposób sprawdzenia ryzyka pojawienia się kondensacji powierzchniowej. Do obliczeń przyjęto: obliczeniową temperaturę powietrza zewnętrznego dla Wrocławia $t_e = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$, obliczeniową temperaturę powietrza w pomieszczeniu $t_i = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ oraz wilgotność względną w pomieszczeniu 50%. Stosowny komentarz przedstawiono pod wynikami analizy numerycznej. Dla temperatury powietrza w pomieszczeniu równej $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza 50% punkt rosy wynosi $10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oznacza to, że aby nie wystąpiła kondensacja pary wodnej na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, temperatura tej powierzchni w tych warunkach powinna być wyższa od $11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jest to praktyczny wniosek wynikający z przeprowadzonej analizy obliczeniowej dla założonych warunków cieplno-wilgotnościowych panujących w pomieszczeniu i na zewnątrz budynku.

PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

(temperatura powietrza zewnętrznego – 18 °C, temperatura powietrza w pomieszczeniu 20 °C)

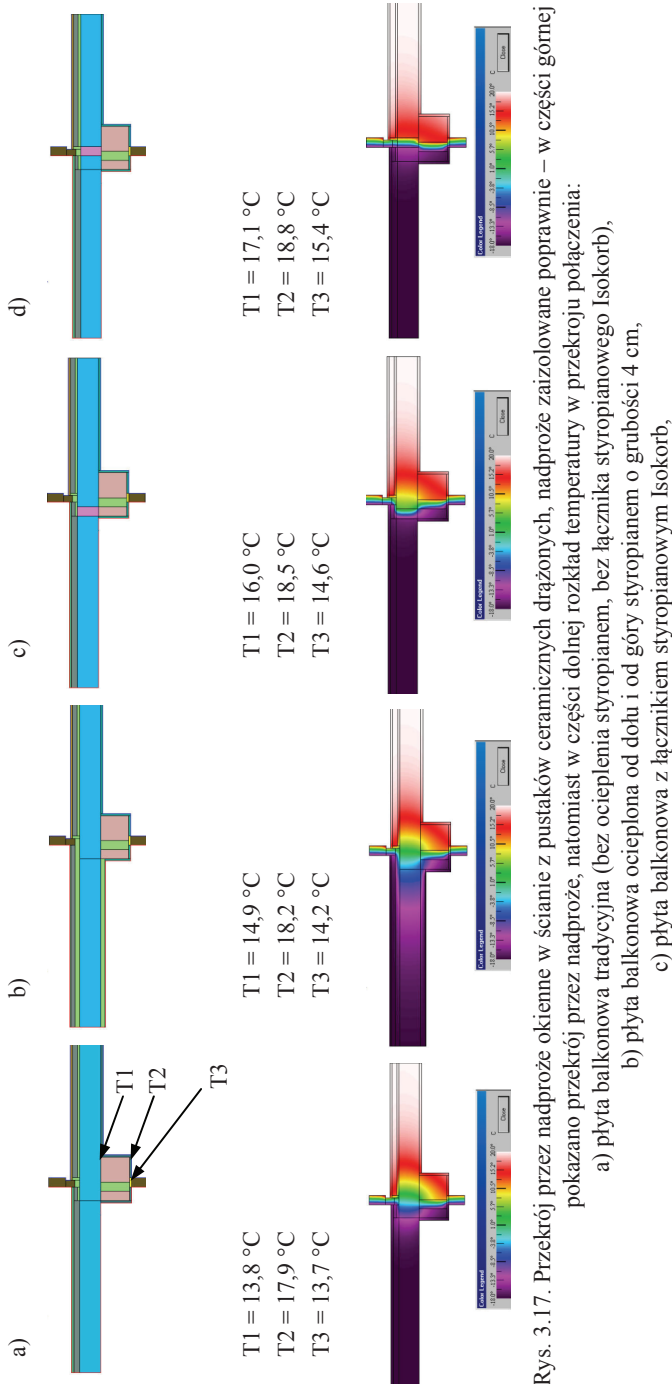


Rys. 3.15. Połączenie ściany zewnętrznej z cegły silikatowej drażnionej (25 cm) ocieplonej styropianem grubości 12 cm, z żelbetową płytą balkonową (18 cm) i stropem żelbetowym Filigran (18 cm) – w części górnej pokazano przekrój przez złącze, natomiast w części dolnej rozkład temperatury w złączu: a) płyta balkonowa tradycyjna, bez ocieplenia styropianem, bez łącznika styropianowego Isokorb, b) płyta balkonowa ocieplona od dołu i od góry styropianem o grubości 4 cm, c) płyta balkonowa z łącznikiem styropianowym Isokorb. We wszystkich przypadkach temperatura w najzimniejszych miejscach jest wyższa od 11,7 °C, co oznacza, że dla założonych warunków obliczeniowych przypadkowa kondensacja pary wodnej w tych miejscach nie wystąpi



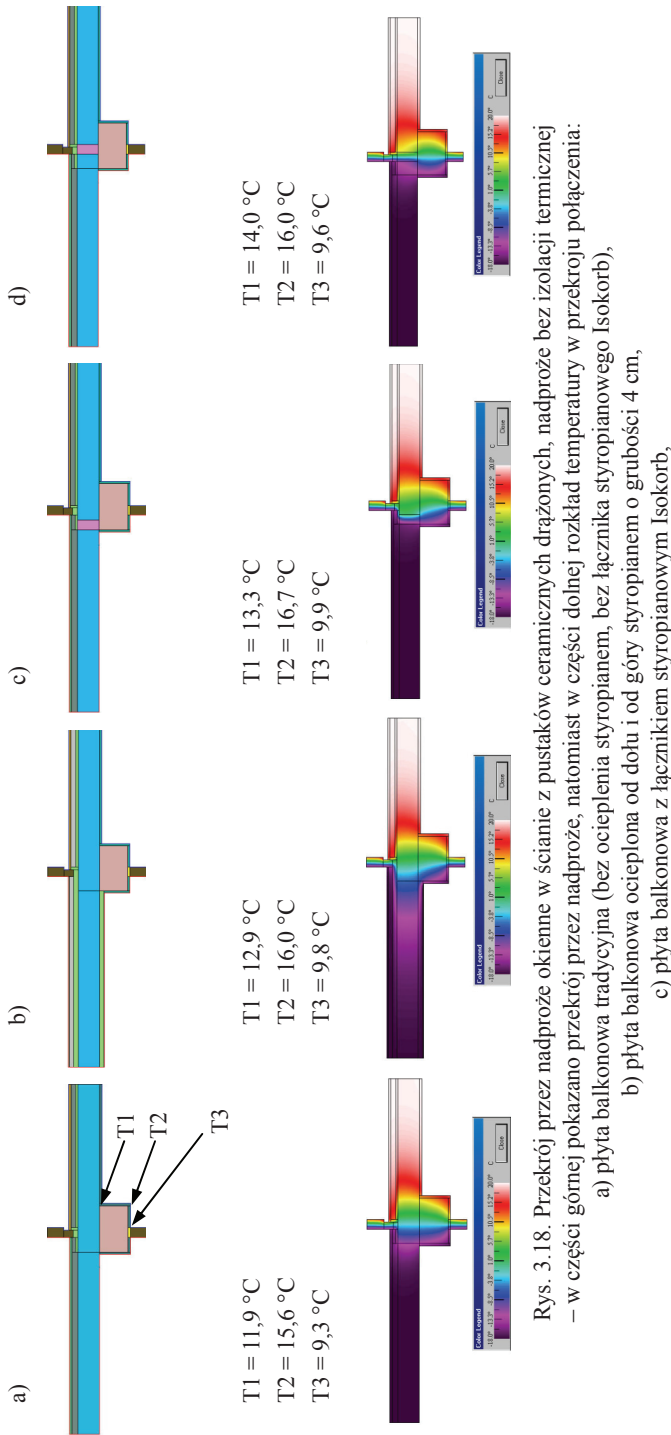
Rys. 3.16. Połączenie ściany zewnętrznej z blozków gazobetonowych (36,5 cm) z żelbetową płytą balkonową (18 cm) i stropem Filigran (18 cm) – w części górnej pokazano przekrój przez złącze, natomiast w części dolnej rozkład temperatury w złączeniu: a) płyta balkonowa tradycyjna (bez ocieplenia styropianem, bez łącznika styropianowego Isokorb), b) płyta balkonowa ocieplona od dołu i od góry styropianem o grubości 4 cm, c) płyta balkonowa z łącznikiem styropianowym Isokorb.

We wszystkich przypadkach temperatura w najzimniejszych miejscach jest wyższa od $11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, co oznacza, że dla założonych warunków obliczeniowych powierzchniowa kondensacja pary wodnej w tych miejscach nie wystąpi



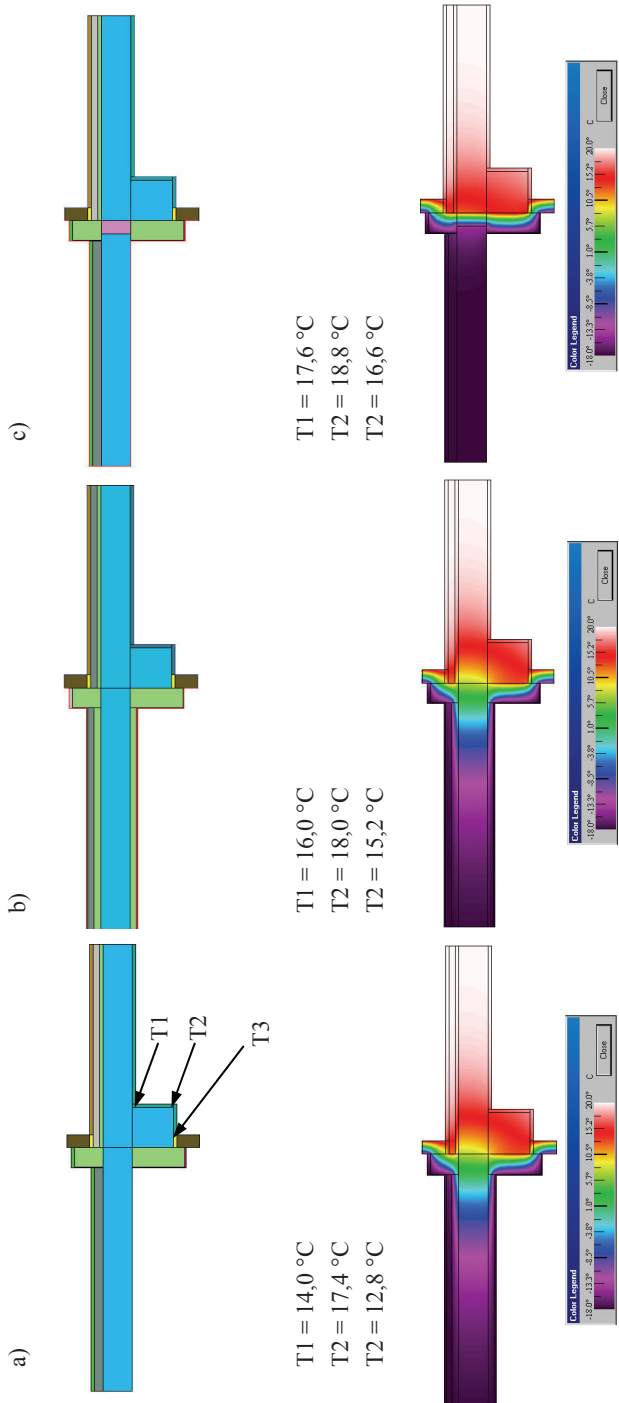
Rys. 3.17. Przekrój przez nadproże okienne w ścianie z pustaków ceramicznych drażonych, nadproże zaizolowane poprawnie – w części górnej pokazano przekrój przez nadproże, natomiast w części dolnej rozkład temperatury w przekroju połączenia:

Podobnie jak poprzednio, we wszystkich przypadkach temperatura w najniższych miejscach jest wyższa od $11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ co oznacza, że dla założonych warunków obliczeniowych kondensacja pary wodnej w tych miejscach nie wystąpi



Rys. 3.18. Przekrój przez nadproże okienne w ścianie z pustaków ceramicznych drażonych, nadproże bez izolacji termicznej – w części górnej pokazano przekrój przez nadproże, natomiast w części dolnej rozkład temperatury w przekroju połączenia:

We wszystkich przypadkach temperatura nadproża w miejscach osadzenia okien (na styku z ościeżnicą) jest niższa od $11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, co oznacza, że dla założonych warunków obliczeniowych wystąpi kondensacja pary wodnej na powierzchni nadproży okiennych



Rys. 3.19. Przekrój przez nadproże okienne w ścianie z cegły silikatowej drażonej (25 cm) ocieplonej styropianem grubości 12 cm
– w części górnej pokazano przekrój przez nadproże, natomiast w części dolnej rozkład temperatury w przekroju połączenia:

a) płyta balkonowa tradycyjna (bez ocieplenia styropianem, bez łącznika styropianowego Isokorb),

b) płyta balkonowa ocieplona od dołu i od góry styropianem o grubości 4 cm,

c) płyta balkonowa z łącznikiem styropianowym Isokorb.

We wszystkich analizowanych przypadkach temperatura w najzimniejszych miejscach jest wyższa od 11,7 °C, co oznacza, że dla założonych warunków obliczeniowych powierzchniowa kondensacja pary wodnej w najzimniejszych miejscach nie wystąpi

3.3. Błędy projektowe i wykonawcze realizacji termicznej obudowy budynków

W Polsce przez wiele lat, do końca lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia, merytoryczny zakres norm z zakresu ochrony cieplnej budynków ograniczał się praktycznie do jednej normy, która obejmowała główną tematykę ochrony cieplnej, tj. obliczenia cieplno-wilgotnościowe przegród budowlanych, wymagania, metody obliczeń i niezbędne dane techniczne do tych obliczeń. Chronologicznie pierwszą normą w Polsce była norma PN-57/B-02405, natomiast normą ostatnią była norma PN-91/B-02020 *Ochrona cieplna budynków. Obliczenia i wymagania*, która obowiązywała do kwietnia 1998 roku. Dla porównania, na początku lat 90. ubiegłego wieku w krajach Europy Zachodniej obowiązywało średnio 20–30 norm z tego zakresu. W roku 1999 została wprowadzona norma *PN EN ISO 6946: Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania*, która po kilku nowelizacjach przetrwała do dnia dzisiejszego [209]. Obecnie obowiązujące w Polsce wymagania dotyczące maksymalnych wartości współczynników przenikania ciepła (U , [$W/(m^2 \cdot K)$]) dla przegród ograniczających ogrzewaną kubaturę budynków są porównywalne z wymaganiami obowiązującymi w krajach europejskich, leżących na tej samej lub zbliżonej szerokości geograficznej co Polska.

Warto jednak zauważyć, że wspomniane obecnie obowiązujące w Polsce wymagania wprowadzono w roku 1998 (z późniejszymi zmianami) z opóźnieniem około 25 lat w stosunku do krajów zachodnich i to jest główny powód wprowadzenia w roku 1998 systemu termomodernizacji budynków istniejących wybudowanych przed tym rokiem. W roku 1998 wprowadzono również obowiązek obliczania oraz wymagania dotyczące maksymalnych wartości wskaźnika sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku w standardowym sezonie grzewczym (wskaźnik E , [$kWh/(m^3 \cdot a)$]) – wymagania te obowiązywały do końca 2008 roku. Od 2 stycznia 2009 roku obowiązują przepisy dotyczące obowiązku sporządzania świadectwa charakterystyki energetycznej i obliczania certyfikatów energetycznych dla budynków, w tym wskaźnika EP [$kWh/(m^2 \cdot rok)$], czyli rocznego zapotrzebowania budynku na nieodnawialną energię pierwotną na jednostkę powierzchni pomieszczeń o regulowanej temperaturze powietrza. W międzyczasie wprowadzono przepisy określające szczegółowy zakres i formę projektu budowlanego, również w zakresie oszczędności energii cieplnej w budynkach jednorodzinnych, mieszkalnych wielorodzinnych, użyteczności publicznej i zamieszkania zbiorowego oraz budynków produkcyjnych – do końca roku 2008 wymagania te były zróżnicowane. Od 2 stycznia 2009 roku obowiązują nowe jednolite wymagania dla budynków mieszkalnych (nie ma podziału na budynki jednorodzinne i wielorodzinne), użyteczności publicznej i produkcyjnych co do dopuszczalnej wartości współczynnika przenikania ciepła dla przegród ograniczających ogrzewaną kubaturę budynku.

Po wprowadzeniu w Polsce w roku 1998 nowych (zaostrzonych) wymagań w zakresie ochrony cieplnej budynków zauważono niepokojące zjawisko wydawania pozwoleń na budowę na podstawie projektów budowlanych zawierających kilka braków i błędów w tym zakresie (Pogorzelski 2001 [152], Nowak 2003 [130], 2004 [131], Hoła [56]), zjawisko to nagminnie występowało również, gdy obowiązywała poprzednia norma cieplna z roku 1991. Do najczęściej występujących uchybień projektowych należały: brak jakichkolwiek obliczeń cieplno-wilgotnościowych dla przegród budowlanych lub niekompletność tych obliczeń, zły dobór grubości izolacji cieplnej przegród, złe rozwiązania zaizolowania mostków termicznych, niezgodność opisu technicznego z rysunkami itp. Do tego dochodziły częste błędy wykonawcze, które dodatkowo pogarszają parametry termicznej obudowy budynków.

W konsekwencji niewłaściwe zaprojektowanie i wykonanie przegród pod względem cieplno-wilgotnościowym najczęściej powodowało powstawanie mostków termicznych i zawilgocenie kondensacyjne przegród, co z kolei najczęściej skutkowało rozwojem grzybów pleśniowych, degradacją techniczną przegród, pogorszeniem mikroklimatu pomieszczeń i warunków komfortu cieplnego (wychładzanie pomieszczeń) oraz zwiększonymi stratami ciepła z budynku. Objawy te często pojawiały się już pod koniec pierwszego sezonu ogrzewczego, co często dokumentowały pomiary termowizyjne budynków. Niestety, opisane mankamenty występują, w nieco mniejszym nasileniu, do dnia dzisiejszego przy realizacji budynków, głównie mieszkalnych wielorodzinnych.

W dalszej części przedstawiono przykłady najczęściej występujących błędów projektowych i wykonawczych w zakresie ochrony cieplnej budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej, przyczyny oraz skutki tych błędów. Analizę prowadzono przy okazji wykonywania pomiarów termowizyjnych tych budynków w ciągu ostatnich 8–10 lat. Były to budynki najczęściej nowe, w trakcie trwania pierwszego lub drugiego sezonu grzewczego. Najczęściej spotykane błędy projektowe były następujące:

- niekompletne obliczenia cieplno-wilgotnościowe lub brak jakichkolwiek obliczeń dla przegród budowlanych ograniczających ogrzewaną kubaturę budynku, a tym samym przyjęcie grubości izolacji cieplnej dla poszczególnych przegród „na wycucie” (najczęściej grubość izolacji była za mała), bez sprawdzenia możliwości wystąpienia powierzchniowego kondensacyjnego zawilgocenia przegród,
- w obliczaniu wartości współczynnika przenikania ciepła U [$W/(m^2 \cdot K)$] dla przegród brak uwzględnienia wpływu mostków cieplnych liniowych – projekty wykonywane do końca roku 2008 (od 2 stycznia 2009 roku mostki cieplne liniowe uwzględnia się jedynie w obliczaniu współczynnika strat ciepła przez przenikanie H_{Tp}),
- złe rozwiązania szczegółów zaizolowania mostków termicznych lub proponowanie błędnych technologicznie rozwiązań, w tym między innymi:

- złe osadzenie okien i drzwi balkonowych w osi części nośnej ściany warstwowej bez izolacji cieplnej ościeży,
- złe rozwiązanie zamocowania wspornikowych płyt balkonowych w ścianach warstwowych, bez ciągłości izolacji cieplnej,
- projektowanie trudnego technologicznie zaizolowania termicznego ścianek kolankowych poddaszy użytkowych, najczęściej izolacja ta nie była wykonywana.
- brak obliczeń wskaźnika E ($[kWh/(m^3 \cdot a)]$), tj. sezonowego zapotrzebowania budynku mieszkalnego wielorodzinnego na ciepło w standardowym sezonie grzewczym, jedyne wówczas kryterium oceny poprawności doboru grubości izolacji cieplnej przegród dla tego rodzaju budynków – to kryterium oceny obowiązywało w Polsce do końca 2008 roku,
- brak opisu technologii wykonania izolacji cieplnej ścian zewnętrznych (najczęściej wg metody „lekkiej mokrej”, obecnie „bezsponinowego systemu ocieplenia – BSO”) lub przynajmniej wskazania stosownej aprobaty technicznej dla zalecanego systemu ocieplenia,
- niezgodność opisu technicznego z rysunkami,
- niewłaściwy dobór oporu dyfuzyjnego paroizolacji w ścianach szkieletowych, na bazie szkieletu drewnianego i z kształtowników zimnogiętych, wypełnionych wełną mineralną oraz w połaciach dachowych lub brak paraizolacji w przegrodach,
- brak izolacji cieplnej ścian piwnic (mimo że nie są ogrzewane), co powoduje dodatkowe straty ciepła z budynków.

W dalszej części przedstawiono najczęściej spotykane błędy wykonawcze i błędy nadzoru budowlanego w realizacji termicznej obudowy budynków. Błędy wynikające z uwarunkowań formalnoprawnych (błędy formalne) były następujące:

- brak przygotowania zawodowego w tym zakresie osób pełniących samodzielne funkcje w budownictwie oraz z braku szkoleń tych osób,
- brak odbiorów technicznych robót częściowych, w tym robót zanikających i ich zgodności z obowiązującymi przepisami prawa budowlanego i dokumentami ITB w zakresie stanu przygotowania podłoża, przyklejania i mocowania warstwy termoizolacji, poprawności wykonania warstwy zbrojonej z włókien szklanych i wykonania cienkowarstwowej wyprawy tynkarskiej (dotyczy metody „BSO”) czy też poprawności wykonania izolacji cieplnej, paro- i wiatroizolacji w połaci dachowej i ściankach kolankowych poddaszy użytkowych,
- brak protokołu odbioru końcowego prac izolacyjnych z uwzględnieniem wpisów do dziennika budowy, protokołów odbiorów robót częściowych i zanikających, sprawdzania jakości wykonanych prac oraz dokumentów świadczących o dopuszczeniu do obrotu i powszechnego stosowania materiałów, z których wykonano warstwę izolacji cieplnej,
- po formalnym zakończeniu robót inwestor najczęściej nie dysponował zestawem dokumentów potwierdzających dopuszczenie do obrotu i stosowania w budyn-

kach materiałów zastosowanych do wykonania termicznego zaizolowania budynku (rola inspektora nadzoru budowlanego).

Opisane przykłady niewłaściwego projektowania i wykonywania przegród ograniczających ogrzewaną kubaturę budynków powodowały (i niestety nadal powodują) przede wszystkim powstawanie uciążliwych dla użytkowników mostków cieplnych, kondensację pary wodnej na powierzchni przegrody, rozwój grzybów pleśniowych oraz nadmierne wychładzanie pomieszczeń. W konsekwencji pogarszały się parametry mikroklimatu pomieszczeń i komfortu cieplnego [175], [176], zwiększały się straty ciepła z budynku, co oznaczało zwiększenie kosztów eksploatacyjnych za ogrzewanie. W przypadku błędów popełnionych w trakcie realizacji warstwy izolacji termicznej ścian zewnętrznych często pojawiały się spękania, odparzenia, wybrzuszenia i odbarwienia warstwy fakturowej, zacieki oraz nierówności powierzchni ścian. Pomiarów termowizyjnych jednoznacznie potwierdzały i potwierdzają występowanie wymienionych nieprawidłowości.

Przeprowadzone badania i analiza dokumentacji projektowej omawianych przypadków oraz spostrzeżenia innych autorów prowadzą do wniosku, że główną przyczyną omawianych problemów były błędne decyzje projektowe – przez wiele lat przyczyny tego stanu były następujące:

- brak przygotowania zawodowego projektantów i niedoceniań przez nich wagi problemów z zakresu ochrony cieplnej budynków i obliczeń cieplno-wilgotnościowych,
- brak praktycznej pomocy dla projektantów w postaci katalogów, poradników, wytycznych i programów komputerowych,
- brak szkoleń projektantów,
- opóźniona dystrybucja nowych norm EN do środowiska projektantów, nauczycieli akademickich i studentów, brak komentarzy do norm,
- brak świadomości inwestorów w zakresie negatywnych skutków złego projektowania i oszczędzania pieniędzy kosztem jakości projektów budowlanych.

Obecnie jednak, po wprowadzeniu w Polsce w styczniu 2009 roku przepisów Dyrektywy UE w sprawie oszczędności energii w budynkach i po wprowadzeniu obowiązku obliczania certyfikatu energetycznego dla budynków o różnym przeznaczeniu, opisane nieprawidłowości występują w nieco mniejszym stopniu.

Obecnie w Polsce trwają intensywne prace nad wdrożeniem około 100 norm europejskich EN z zakresu szeroko rozumianej ochrony cieplnej budynków, z tego ponad połowa norm została opublikowana. Zwiększa się liczba i stopień komplikacji norm, które obowiązują w projektowaniu budynków (zasadniczych norm do projektowania jest kilkanaście). Od 2 stycznia 2009 roku obowiązują w Polsce przepisy wykonawcze wprowadzające postanowienia Dyrektywy Europejskiej 2002/91/EC [199] z dnia 16.12.2002 r. w sprawie certyfikacji energetycznej budynków (Dyrektywa EPBD, ang. *Energy Performance of Building Directive*). Ma to na celu nie tylko spowodowanie poprawy charakterystyki energetycznej budynków w krajach UE z uwzględnieniem

klimatu zewnętrznego i warunków lokalnych oraz wymagań mikroklimatu wewnątrz i efektywności ekonomicznej, ale również spełnienie przez budynki wymagań wynikających z zasad zrównoważonego rozwoju. Dyrektywa UE została znowelizowana w maju 2010 roku [201] i narzuca jeszcze bardziej rygorystyczne wymagania dla poszczególnych krajów UE w zakresie ochrony cieplnej budynków, wykorzystania odnawialnych źródeł energii do wspomagania bilansu energetycznego budynków, ograniczenia emisji CO₂ do atmosfery oraz w zakresie projektowania budynków o różnym przeznaczeniu, spełniających zasady zrównoważonego rozwoju.

Wynika z tego, że w projektowaniu budynków o różnym przeznaczeniu poziom komplikacji algorytmów obliczeniowych oraz wymagań w zakresie ochrony cieplnej w niedalekiej przyszłości wzrośnie niewspółmiernie w stosunku do stanu obecnego. Przewiduje się, że jedną z głównych barier wdrażania w Polsce dyrektyw i zasad zrównoważonego rozwoju będzie niewystarczająca znajomość fizyki budowli przez architektów i inżynierów budowlanych. Aby rozwiązać ten problem należy, zdaniem Autora, wprowadzić na studiach architektonicznych i budowlanych rozszerzony program oraz standardy nauczania fizyki budowli i zasad zrównoważonego rozwoju, przeprowadzać szkolenia wykładowców uczelni technicznych, opracować stosowne pomoce dydaktyczne oraz przeprowadzać systematyczne szkolenia architektów i inżynierów budowlanych w tym zakresie.

4. Podstawy teoretyczne badań termowizyjnych – wymiana ciepła przez promieniowanie

4.1. Odkrycie promieniowania ciepłego

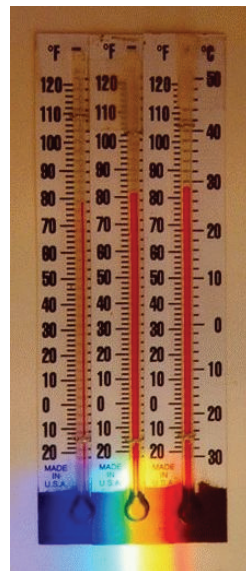
Promieniowanie podczerwone zostało odkryte przez Herschela w roku 1800. Sir Frederick William Herschel (1738–1822) urodził się w Hanowerze w Niemczech i stał się znany zarówno jako muzyk, jak i astronom. W roku 1757 wyjechał do Anglii, gdzie, między innymi, konstruował teleskopy do badania nieboskłonu. Był autorem kilku katalogów gwiazd podwójnych i mgławic. Herschel jest znany z odkrycia planety Uran w 1781 roku, która była odkryta jako pierwsza planeta od czasów starożytnych.

Można powiedzieć, że odkrycia promieniowania podczerwonego Herschel dokonał przypadkowo, niejako przy okazji, w trakcie badań nad modernizacją konstrukcji budowanych przez siebie teleskopów. Herschel poszukiwał materiału filtrującego, który mógłby skutecznie ograniczać jaskrawość obrazu słońca w teleskopach. Podczas testowania różnych próbek szkła w podobnym stopniu ograniczających jasność zauważył, że niektóre z próbek przepuszczały tylko niewielką część promieniowania słonecznego, natomiast inne przepuszczały je w tak dużym stopniu, że dalsza obserwacja groziła utratą wzroku.

Herschel przeprowadził kolejne badania, polegające na powtórzeniu eksperymentu Newtona z pryzmatem, zwracając jednak uwagę na efekt cieplny, a nie na rozkład kolorów w widmie światła białego. Za pomocą termometrów z zaczerwionymi zbiorniczkami rtęci mierzył temperaturę poszczególnych barw widma światła widzialnego. Dla porównania umieścił również dwa termometry poza zasięgiem promieni słonecznych. Po zmierzeniu temperatury każdej barwy światła dziennego, od fioletu do czerwieni, stwierdził, że odczyty temperatury wzrastały równomiernie oraz że termometry umieszczone poza czerwoną granicą widma widzialnego wskazywały większy przyrost temperatury niż termometry umieszczone w poszczególnych widzialnych zakresach widma. Zjawisko to było już znane, ponieważ włoski badacz Marsyljo Landriani (1746–1815) w eksperymencie przeprowadzonym w roku 1777 zaobserwował



Rys. 4.1. Sir Frederic William Herschel
(1738–1822)



Rys. 4.2. Ilustracja
doświadczenia Herschela

podobny efekt. Ale to jednak Herschel pierwszy przewidział, że musi istnieć punkt, w którym efekt cieplny osiąga maksimum. Zlokalizowany przez niego punkt maksimum tego promieniowania leżał daleko poza czerwienią światła widzialnego. Z doświadczenia wynikało, że granice widma promieniowania słonecznego nie pokrywają się z granicami światła dziennego (widzialnego) oraz że poza obszarem czerwieni istnieje bezpośrednio obszar promieniowania niewidzialnego (zwanego dzisiaj podczerwonym, temperaturowym, cieplnym lub długofalowym).

Nowy obszar widma elektromagnetycznego Herschel nazwał „niewidzialnym widmem termometrycznym”, a nowo odkryte promieniowanie „ciemnym ciepłem” lub po prostu „promieniowaniem niewidzialnym”. Okazuje się jednak, że to nie Herschel pierwszy użył terminu „podczerwień” – pojęcie to zaczęło się pojawiać w publikacjach dopiero 75 lat później i do dzisiaj nie wiadomo komu należy przypisać jego autorstwo.

Późniejsze eksperymenty wielu badaczy wykazały, że promieniowanie podczerwone, podobnie jak promieniowanie widzialne, ulega prawom odbicia, interferencji, załamania i pochłaniania.

Słynny eksperyment Herschela był bardzo ważny nie tylko dlatego, że doprowadził do odkrycia promieniowania podczerwonego, ale również dlatego, że po raz pierwszy wykazano istnienie innego promieniowania niewidzialnego dla ludzkich oczu. Poza tym Herschel pierwszy odkrył, że transmisja promieniowania podczerwonego zachodzi w różnych materiałach (np. german, szkło optyczne, płyty soli kamiennej).

Podczerwień została „odkryta” ponownie sto lat później, w latach 1900–1920, ponieważ znaleziono dla niej praktyczne zastosowanie – zarejestrowano kilka patentów na urządzenia wojskowe do wykrywania ludzi, samolotów, statków itp. Jak można się domyślać, pierwsze zastosowania podczerwieni realizowano na potrzeby wojskowe w czasie I wojny światowej. Były to eksperymentalne systemy wykrywania wroga, zdalne czujniki temperatury, systemy naprowadzania itp. Można zauważyć, że jak na owe czasy, uzyskano dobre rezultaty, a wyniki tych tajnych badań ujawniono dopiero około 50 lat później, gdy urządzenia do zobrazowania termalnego stały się dostępne do zastosowań cywilnych.

Jak już wspomniano wcześniej, pierwszą kamerę termowizyjną AGA Thermovision 600 wyprodukowano w Szwecji w roku 1960 również na potrzeby wojska. Kilka lat później kamery termowizyjne były już dostępne w innych obszarach – badania termowizyjne znalazły zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach, wszędzie tam, gdzie decydującą rolę odgrywa znajomość rozkładu wartości temperatury badanej powierzchni w: przemyśle, energetyce, elektronice, badaniach środowiska, ratownictwie, medycynie i oczywiście w budownictwie (patrz rozdział 6).

Do dnia dzisiejszego opracowano tak wiele rodzajów urządzeń pracujących w zakresie promieniowania podczerwonego, że trudno te wszystkie urządzenia wymienić i usystematyzować. Ze względu na przeznaczenie urządzenia techniki podczerwieni dzielimy na trzy główne grupy [155]: urządzenia pomiarowe, obserwacyjne i urządzenia do automatycznego rozpoznania.

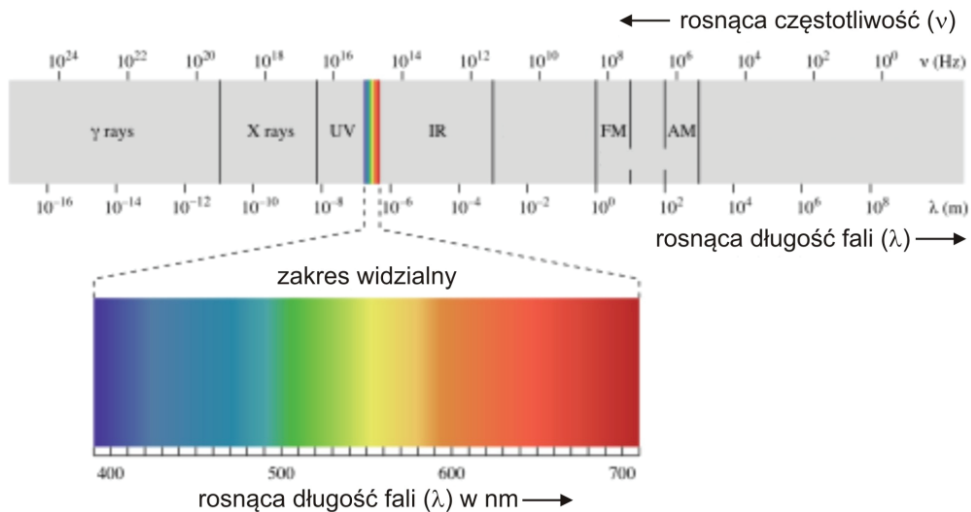
4.2. Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Promieniowanie elektromagnetyczne występujące w przyrodzie, w zależności od długości fal promieniowania λ , zazwyczaj dzieli się na następujące umowne podzakresy (rys. 4.3):

- promieniowanie kosmiczne oraz promieniowanie gamma ($\lambda < 10^{-5} \mu\text{m}$),
- promieniowanie typu X ($10^{-5} < \lambda < 10^{-2} \mu\text{m}$),
- promieniowanie ultrafioletowe ($10^{-2} < \lambda < 0,35 \mu\text{m}$),
- promieniowanie widzialne ($0,35 < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$),
- promieniowanie podczerwone ($0,75 < \lambda < 10^3 \mu\text{m}$),
- mikrofały i fały radiowe ($\lambda > 10^3 \mu\text{m}$).

Pasmo promieniowania podczerwonego często jest dzielone na umowne cztery węższe pasma:

- bliska podczerwień ($0,75\text{--}3,0 \mu\text{m}$),
- średnia podczerwień ($3,0\text{--}6,0 \mu\text{m}$),
- daleka podczerwień ($6,0\text{--}15,0 \mu\text{m}$),
- bardzo daleka podczerwień ($15,0\text{--}1000,0 \mu\text{m}$).



Rys. 4.3. Graficzna ilustracja podziału promieniowania występującego w przyrodzie w zależności od długości fali λ (na podstawie [93])

W literaturze można znaleźć jeszcze inne sposoby podziału promieniowania podczerwonego oraz inne określenia dla poszczególnych podzakresów podczerwieni. Przykładowo [105]:

- bliska podczerwień: 0,76–3,0 μm , średnia: 3,0–6,0 μm , daleka 6,0–15,0 μm , ekstremalnie daleka: $>15,0 \mu\text{m}$,
- bliska podczerwień: 0,70–1,5 μm , pośrednia: 1,5–20,0 μm , daleka: 20,0–1000,0 μm .
- bardzo bliska podczerwień: 0,78–1,1 μm , bliska: 1,1–3,0 μm , średnia: 3,0–6,0 μm , daleka: 6,0–15,0 μm , bardzo daleka: 15,0–1000,0 μm .

Międzynarodowa Komisja ds. Oświetlenia (CIE) natomiast rekomenduje podział promieniowania podczerwonego na następujące trzy podzakresy [53]:

- IR-A: 700–1400 nm (0,7–1,4 μm),
- IR-B: 1400–3000 nm (1,4–3,0 μm),
- IR-C: od 3000 nm do 1 mm (3,0–1000,0 μm).

Innego podziału promieniowania podczerwonego zaproponowano w pracy [23]:

- bliska podczerwień (*near-infrared*, NIR, IR-A, DIN): 0,75–1,4 μm ,
- krótkofalowa podczerwień (*short-wavelength infrared*, SWIR, IR-B, DIN): 1,4–3,0 μm ,
- średnifalowa podczerwień (*mid-wavelength*, MWIR, IR-C DIN), zwana również podczerwienią pośrednią (*intermediate infrared*, IIR): 3,0–8,0 μm ,
- długofalowa podczerwień (*long-wavelength infrared*, LWIR, IR-C DIN): 8,0–15,0 μm . Jest to zakres tzw. „obrazowania termicznego”,
- daleka podczerwień (*far infrared*, FIR): 15,0–1000,0 μm .

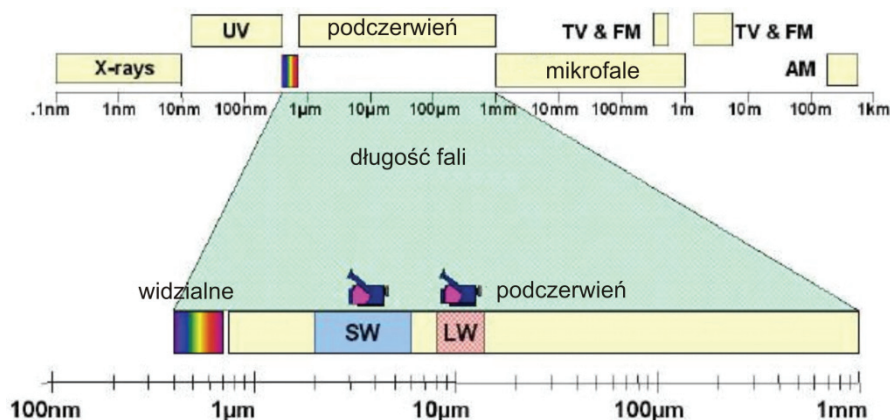
Zakres podczerwieni NIR oraz SWIR jest niekiedy zwany „podczerwienią odbiciową” (ang. *reflected infrared*), natomiast zakres MWIR oraz LWIR jest czasami zwany „podczerwienią termalną” (ang. *thermal infrared*).

Należy jednak zauważyć, że dla zakresu temperatury spotykanej w budownictwie w granicach od ok. $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zima) do ok. $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (np. maksymalna temperatura papy na stropodachu w lecie), promieniowanie podczerwone występuje w umownym zakresie długości fal od $\lambda = 3,0$ do $50\text{ }\mu\text{m}$. W rzeczywistości promieniowanie to występuje w zakresie do $1000\text{ }\mu\text{m}$, ale natężenie promieniowania cieplnego w przedziale od 50 do $1000\text{ }\mu\text{m}$ jest pomijalnie małe. Taki podział zakresu promieniowania podczerwonego jest również zgodny z podziałem zaproponowanym w normie ISO 20473:2007 [227]:

- bliska podczerwień (ang. *near infrared*, NIR): $0,78\text{--}3,0\text{ }\mu\text{m}$,
- średnia podczerwień (ang. *mid infrared*, MID): $3,0\text{--}50,0\text{ }\mu\text{m}$,
- daleka podczerwień (ang. *far infrared*, FIR): $50,0\text{--}1000,0\text{ }\mu\text{m}$.

Kamery termowizyjne pracujące w zakresie od $2,0$ do $5,0\text{ }\mu\text{m}$ nazywa się krótkofalowymi (SWB lub SW – ang. *Short-Wave Bands*), natomiast pracujące w zakresie od $8,0$ do $14,0\text{ }\mu\text{m}$ nazywa się długofalowymi (LWB lub LW – ang. *Long-Wave Band*) (rys. 4.4).

W analizie wymiany ciepła przez promieniowanie przegród budowlanych i budynków ze środowiskiem zewnętrznym uwzględniamy dwa zakresy promieniowania: promieniowanie słoneczne (krótkofalowe), występujące w umownym zakresie długości fal od $0,3$ do $3,0\text{ }\mu\text{m}$ oraz promieniowanie długofalowe (cieplne, podczerwone, temperaturowe), występujące w umownym zakresie długości fal od $3,0$ do $50,0\text{ }\mu\text{m}$. Za granicę między tymi dwoma zakresami widma przyjęto długość fali $\lambda = 3,0\text{ }\mu\text{m}$. Temat ten został omówiony w rozdziale 5.



Rys. 4.4. Podział promieniowania występującego w przyrodzie w zależności od długości fali λ z pokazaniem zakresu pracy kamer termowizyjnych typu SW (krótkofalowe) oraz LW (długofalowe) (na podstawie [93])

4.3. Podstawowe prawa promieniowania ciała czarnego

Pojęcie ciała doskonale czarnego ma duże znaczenie w termowizyjnych pomiarach budynków i budowli o różnym przeznaczeniu oraz w interpretacji termogramów.

Pojęcie ciała doskonale czarnego wprowadził Kirchhoff w roku 1860. Z definicji wynika, że ciało doskonale czarne lub krótko, ciało czarne, jest to takie wyidealizowane ciało, które pochłania całe padające na nie promieniowanie niezależnie od długości fali. Ponadto, dla ciała czarnego absorpcyjność nie zależy ani od kierunku, z którego pada promieniowanie ani od długości fali promieniowania [74]. Rzeczywiste ciała mogą mieć właściwości bliskie właściwościom ciała czarnego w pewnych zakresach widma promieniowania, np. niektóre rodzaje farb czarnych bardzo dobrze pochłaniające promieniowanie podczerwone.

Podstawowe parametry promieniowania ciała czarnego dla każdej temperatury, długości fali i kierunku promieniowania są zgodne z podstawowymi prawami promieniowania cieplnego, nazywanymi ‘podstawowymi prawami emisji ciała czarnego’ [160].

Prawo Plancka

W roku 1900 Max Planck (1858–1947) podał wyrażenie, opisujące rozkład spektralny (widmo) promieniowania ciała czarnego, czyli gęstość widmową emitancji ciała czarnego (monochromatyczna gęstość strumienia cieplnego), zwane prawem Plancka. Prawo to wyraża zależność między monochromatyczną emitancją ciała czarnego $W_{\lambda b}(T)$, długością fali promieniowania λ i bezwzględną temperaturą powierzchni promieniającej T , [K]:

$$W_{\lambda b}(T) = \frac{2\pi h c_o^2}{\lambda^5 (e^{hc_o/\lambda k T} - 1)} \quad (4.1)$$

gdzie: $W_{\lambda b}(T)$ – monochromatyczna emitancja promienista ciała czarnego, [W/(m²·μm)],

h – stała Plancka, równa $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J·s],

c_o – prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w próżni,
 $c_o = 2,9979 \cdot 10^8$ [m/s],

k – stała Boltzmanna, równa $1,381 \cdot 10^{-23}$, [J/K],

T – temperatura bezwzględna ciała czarnego, [K],

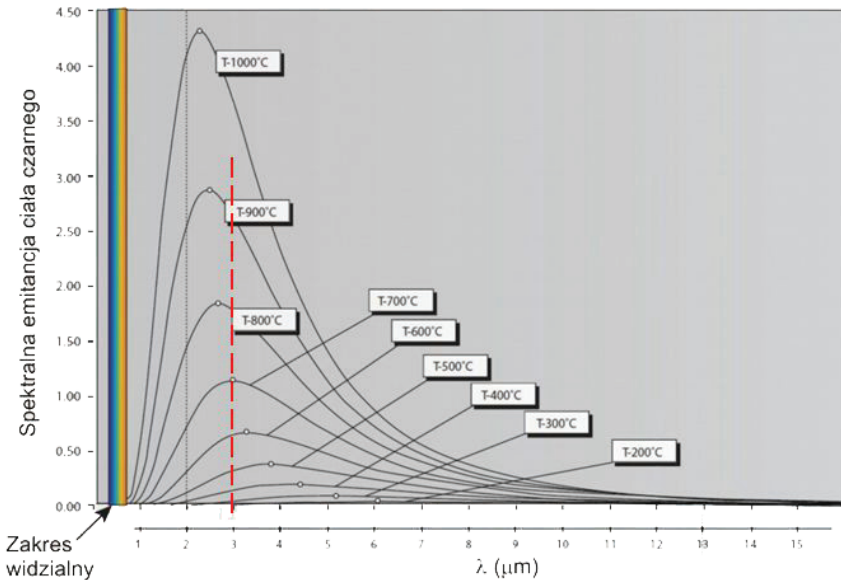
λ – długość fali, [μm].

Po wprowadzeniu oznaczeń:

$c_1 = 2\pi h c_o^2 = 3,7418 \cdot 10^{-16}$ [W·m²] – pierwsza stała Plancka, [187],

$c_2 = h c_o/k = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ [m·K] – druga stała Plancka. [187]

wzór (4.1) przyjmuje postać:



Rys. 4.5. Graficzna interpretacja prawa Plancka – emitancja widmowa ciała czarnego dla różnej temperatury bezwzględnej w funkcji długości fali promieniowania (μm). Czerwoną linią przerywaną zaznaczono umowną granicę ($\lambda = 3,0 \mu\text{m}$) między promieniowaniem krótkofalowym (słonecznym) i promieniowaniem długofalowym (cieplnym, temperaturowym, podczerwonym) spotykanym w budownictwie. Dane na wykresie potwierdzają, że promieniowanie ciepłe zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych występuje w umownym przedziale długości fal promieniowania cieplnego powyżej $3,0 \mu\text{m}$ (na podstawie [93])

$$W_{\lambda b}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (4.2)$$

Wyrażenie (4.1) przedstawia rozkład spektralny (widmo) promieniowania ciała czarnego i ma zastosowanie zarówno w odniesieniu do źródeł promieniowania, jak i odbiorników – graficzną interpretację tego wzoru przedstawiono na rysunku 4.5.

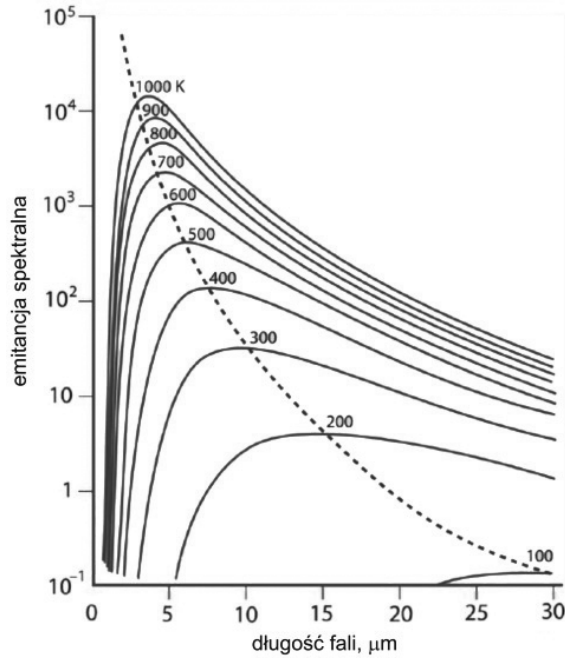
Prawo przesunięcia Wiena

Wilhelm Wien (1864–1928) wprowadził do wzoru Plancka kilka założeń i uproszczeń. Najpierw sformułował założenie, że jeżeli:

$$e^{c_2/\lambda T} \gg 1 \quad (4.3)$$

to wzór Plancka znacznie się upraszcza do postaci tzw. wzoru Wiena:

$$W_{\lambda b}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}} \quad (4.4)$$



Rys. 4.6. Graficzna interpretacja wzoru Wiena – krzywe Plancka przedstawione są w skali półlogarytmicznej w zakresie od 100 do 1000 K, linia kropkowana pokazuje miejsca występowania maksimum emitancji dla każdej temperatury zgodnie z prawem przesunięć Wiena (na podstawie [93])

Dla długości fal promieniowania λ w temperaturze $T < 3000$ [$\mu\text{m}\cdot\text{K}$] uproszczenie to wprowadza błąd mniejszy od 1% [155]. Następnie, różniczkując równanie Plancka (4.4) względem długości fali promieniowania λ [μm] oraz wyznaczając maksimum pochodnej, otrzymujemy wyrażenie zwane prawem Wiena (lub prawem przesunięć Wiena):

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T} \quad (4.5)$$

które brzmi: rozkład spektralny gęstości emisji dla każdej temperatury osiąga maksimum, którego położenie ze wzrostem temperatury przesuwa się w kierunku fal krótkich [74]. Oznacza to, że im niższa jest temperatura, tym dłuższa jest fala, która przenosi monochromatyczny strumień ciepły o największej mocy promieniowania.

Prawo Wiena określa długość fali, dla której emitancja ciała czarnego osiąga maksimum w danej temperaturze. Po podstawieniu wzoru (4.5) do wzoru Plancka otrzymujemy zależność między maksimum natężenia promieniowania (W_o , w jednostce [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$]) a temperaturą T [K] ciała doskonale czarnego emitującego to promieniowanie:

$$W_o(\lambda_{\max}, T) = 1,286 \cdot 10^{-11} T^5 \quad (4.6)$$

Interpretację graficzną wzoru Wiena przedstawiono na rysunku 4.6.

Prawo Stefana–Boltzmannna

W roku 1879 Josef Stefan (1836–1893) doświadczalnie wyznaczył proste wyrażenie na obliczanie natężenia energii cieplnej emitowanej przez daną powierzchnię w funkcji jej temperatury. Wyniki Stefana zostały potwierdzone teoretycznie w roku 1884 przez jednego z jego byłych studentów Ludwiga Boltzmannna (1844–1906), a ostateczne wyrażenie na emitancję całkowitą ciała czarnego W_b , otrzymane po scałkowaniu wzoru Plancka w granicach od $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$, jest następujące:

$$W_b = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} W_{\lambda b} d\lambda = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{c_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}} d\lambda \quad (4.7)$$

i jest znane jako prawo Stefana–Boltzmannna:

$$W_b = \sigma T^4 \quad (4.8)$$

gdzie: W_b – emitancja całkowita ciała czarnego, [W/m²]

σ – stała Stefana–Boltzmannna, równa $5,6694 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴),

T – temperatura, [K].

Z prawa Stefana–Boltzmannna wynika, że natężenie promieniowania cieplnego emitowanego przez ciało czarne jest proporcjonalne do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej. Graficznie można to natężenie zdefiniować jako pole pod krzywą Plancka dla danej temperatury [PAK].

Dla ciał szarych prawo Stefana–Boltzmannna przedstawia się następująco:

$$W_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4.9)$$

gdzie ε jest współczynnikiem emisyjności powierzchni.

W obliczeniach praktycznych niekiedy wygodniej jest posługiwać się prawem Stefana–Boltzmannna w innej postaci:

$$W_b = \sigma T^4 = 10^{-8} C_o T^4 = C_o \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (4.10)$$

gdzie $C_o = 5,6693$ W/(m²·K⁴) jest stałą promieniowania.

W przypadku analizy promieniowania ciała czarnego w określonym zakresie długości fal od λ_1 do λ_2 wykładnik potęgi we wzorach (4.9) i (4.10) przyjmuje większą wartość, co na przykład należy uwzględnić w obliczeniach i analizie tzw. spektralnej temperatury promieniowania niebosłonu (patrz rozdz. 5.3.2).

4.4. Promieniowanie ciepłe obiektów rzeczywistych

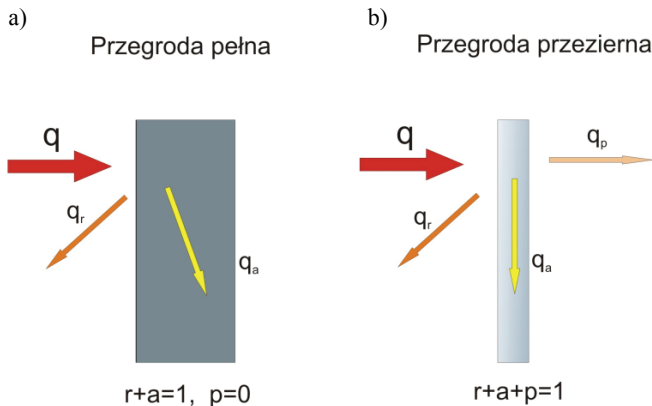
4.4.1. Radiacyjne właściwości powierzchni ciał stałych

Omówione w poprzednim rozdziale prawa promieniowania dotyczą idealnego ciała czarnego. Jednak ciała rzeczywiste praktycznie nie podlegają tym prawom w szerokim zakresie widma promieniowania, mimo że w określonych przedziałach długości fal ich zachowanie może być zbliżone do zachowania ciała czarnego. Dzieje się tak, ponieważ w rzeczywistości ciała stałe nieprzerwanie częściowo pochłaniają, częściowo odbijają i częściowo przepuszczają padające na nie promieniowanie (w tym promieniowanie podczerwone). Zjawiska te charakteryzowane są przez współczynniki: absorpcyjności a , refleksyjności r oraz przepuszczalności p dla danej powierzchni (rys. 4.7).

Zakładając, że na powierzchnię ciała stałego oddziałuje strumień energii promieniowania temperaturowego Φ (strumień energii, czyli ilość energii w jednostce czasu) i że część tego strumienia zostanie pochłonięta, część odbita i część przepuszczona, możemy zdefiniować następujące współczynniki:

Współczynnik absorpcyjności (pochłaniania) a – stosunek strumienia energii promieniowania cieplnego pochłoniętego Φ_a przez ciało do padającego strumienia energii Φ na ciało:

$$a = \frac{\Phi_a}{\Phi} \quad (4.11)$$



Rys. 4.7. Podział gęstości strumienia promieniowania ciepłego padającego na ciała stałe oraz właściwości radiacyjne ciał stałych: a) pełnych (nieprzeziernych), b) przeziernych (przezroczystych). Oznaczenia: a – współczynnik absorpcyjności (pochłaniania), r – współczynnik refleksyjności (odbicia), p – współczynnik przepuszczalności (transmisji)

Współczynnik refleksyjności (odbicia) r – stosunek strumienia energii promieniowania cieplnego odbitego Φ_r od ciała do padającego strumienia energii Φ na ciało:

$$r = \frac{\Phi_r}{\Phi} \quad (4.12)$$

Współczynnik przepuszczalności (transmisyjności) p – stosunek strumienia energii promieniowania cieplnego przepuszczonego Φ_p przez ciało do padającego strumienia energii Φ na ciało:

$$p = \frac{\Phi_p}{\Phi} \quad (4.13)$$

Zgodnie z prawem Kirchhoffa zachodzi związek:

$$a + r + p = 1 \quad (4.14)$$

Zależność (4.14) również obowiązuje dla promieniowania monochromatycznego, tj. dla pewnej określonej długości fal:

$$a_\lambda + r_\lambda + p_\lambda = 1 \quad (4.15)$$

Po uwzględnieniu równań (4.11)–(4.15) można zapisać:

$$\Phi = a\Phi + r\Phi + p\Phi = \Phi_a + \Phi_r + \Phi_p \quad (4.16)$$

Dla ciała stałego nieprzeziernego ($p = 0$) równanie (4.14) przyjmie postać:

$$a + r = 1 \quad (4.17)$$

lub

$$a_\lambda + r_\lambda = 1 \quad (4.18)$$

Wielkości występujące w podanych wzorach są bezwymiarowe i zawierają się w przedziale od 0 do 1. Ze względu na rodzaj ciała mogą występować następujące przypadki:

- | | |
|-----------------------|---|
| $a = 1, r = 0, p = 0$ | ciało (doskonale) czarne (ang. <i>perfect black body</i>), |
| $r = 1, a = 0, p = 0$ | ciało białe (idealne lustro) (ang. <i>perfect mirror</i>), |
| $p = 1, a = 0, r = 0$ | ciało idealnie przezroczyste (ang. <i>perfect transparent body</i>), |
| $a < 1$ | ciało szare (ang. <i>grey body</i>). |

Wszystkie ciała, które absorbują, odbijają i przepuszczają promieniowanie temperaturowe nieprzerwanie emitują promieniowanie temperaturowe własne. Wielkość tej emisji zazwyczaj jest różna dla różnych ciał nawet wtedy, gdy ich temperatury są sobie równe. Dzieje się tak, ponieważ każde ciało ma określoną zdolność do emisji promieniowania cieplnego, zależną od wartości współczynnika emisyjności powierzchni.

4.4.2. Współczynnik emisyjności powierzchni ciał stałych

Emisyjność powierzchni danego ciała to złożony parametr, odgrywający bardzo ważną rolę w bezdotykowym pomiarze temperatury metodą termowizyjną i w interpretacji termogramów. Ciało (doskonale) czarne pochłania całkowicie padające na jego powierzchnię promieniowanie, co oznacza, że jego współczynnik absorpcyjności jest równy 1. Zgodnie z prawem Kirchhoffa, w tej samej temperaturze, współczynnik emisyjności powierzchni jest równy współczynnikowi absorpcyjności, czyli współczynnik emisyjności ciała czarnego również wynosi 1.

Współczynnik emisyjności powierzchni danego ciała jest to stosunek natężenia promieniowania powierzchni tego ciała do promieniowania ciała doskonale czarnego w tej samej temperaturze.

Współczynnik emisyjności ciał zmienia się w przedziale od 0 do 1, przy czym praktycznie nie osiąga skrajnych wartości tego przedziału. Emisyjność zewnętrznej powierzchni danego ciała jest parametrem charakteryzującym właściwości promienne ciała i zależy od wielu czynników, wśród których najważniejszymi są [160], [167], [187]:

- długość fali promieniowania,
- temperatura powierzchni,
- kierunek (kąt) emisji,
- rodzaj ciała (dielektryk, przewodnik),
- stan fizyczny powierzchni (chropowatość, warstwy tlenków, zanieczyszczenia),
- skład chemiczny.

Większość tych parametrów jest specyficzna i charakterystyczna dla danego materiału czy grupy materiałów. Emisyjność ciał można zdefiniować w funkcji długości fali promieniowania jako [169], [187]:

- emisyjność monochromatyczna, która odnosi się do wybranej długości fali promieniowania,
- emisyjność panchromatyczna, która odnosi się do całego widma promieniowania. Emisyjność monochromatyczna i panchromatyczna może być:
- normalna – odnosi się do promieniowania w kierunku prostopadłym do powierzchni,
- kierunkowa – odnosi się do wybranego kierunku promieniowania,
- półsferyczna – odnosi się do promieniowania z powierzchni płaskiej do półsfery.

Pod względem zdolności do emitowania promieniowania cieplnego powierzchnie ciał charakteryzowane są przez różnie zdefiniowane emisyjności – są to [160]:

- kierunkowa emisyjność monochromatyczna,
- kierunkowa emisyjność panchromatyczna,
- półsferyczna emisyjność monochromatyczna,
- półsferyczna emisyjność panchromatyczna.

W przypadku analizy radiacyjnej wymiany ciepła przegród budowlanych z otoczeniem zewnętrzne powierzchnie przegród budowlanych charakteryzowane są przez te dwie ostatnie:

1. Półsferyczną emisyjność monochromatyczną, czyli emisyjność widmową dla danej długości fali promieniowania, zdefiniowaną następująco [105]: emisyjnością monochromatyczną ε_λ nazywa się stosunek natężenia promieniowania monochromatycznego (W_λ) o danej długości fali λ dla danego ciała do natężenia promieniowania monochromatycznego ($W_{b\lambda}$) o tej samej długości fali dla ciała czarnego w tej samej temperaturze:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{b\lambda}} \quad (4.19)$$

2. Półsferyczną emisyjność panchromatyczną, czyli emisyjność całkowitą dla całego zakresu promieniowania, zdefiniowaną następująco [105]: emisyjnością całkowitą ε nazywa się stosunek natężenia promieniowania (W_T) w pełnym zakresie promieniowania dla danego ciała do natężenia promieniowania (W_{bT}) w pełnym zakresie promieniowania dla ciała czarnego się w tej samej temperaturze:

$$\varepsilon = \frac{W_T}{W_{bT}} \quad (4.20)$$

Kirchhoff zdefiniował emisyjność ε jako stosunek promieniowania emitowanego przez powierzchnię ciała o danej temperaturze do promieniowania ciała czarnego w tych samych warunkach (temperatura, długość fali promieniowania i kierunek).

Wartości współczynników emisyjności całkowitej dla różnych materiałów najczęściej podawane są w tabelach. Przykładowe wartości współczynników emisyjności podano w tabeli 4.1.

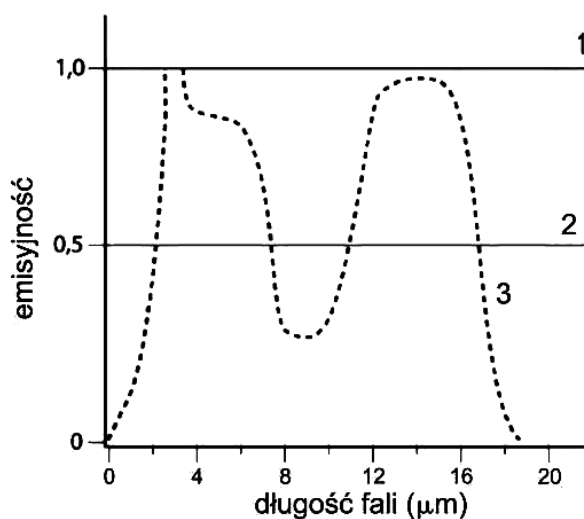
Z tabeli 4.1 wynika, że ciała takie jak woda, lód, śnieg czy skóra ludzka mają bardzo duże współczynniki emisyjności, na poziomie od 0,95 do 0,98. Większość typowych materiałów budowlanych (cegła ceramiczna, tynk, papa itp.) charakteryzuje się współczynnikami emisyjności w zakresie od ok. 0,88 do 0,93, co należy uwzględnić w trakcie wykonywania pomiarów termowizyjnych i w interpretacji termogramów. W termowizyjnym badaniu powierzchni o współczynniku emisyjności mniejszym niż 0,60 należy wykazać szczególną uwagę i ostrożność ze względu na duży udział odbitego promieniowania cieplnego dochodzącego do obiektywu kamery. Problem ten omówiono w rozdziale 6.4.

Ze względu na współczynniki emisyjności ε oraz ich zmienność w funkcji długości fali promieniowania, można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje źródeł promieniowania (rys. 4.8 i 4.9):

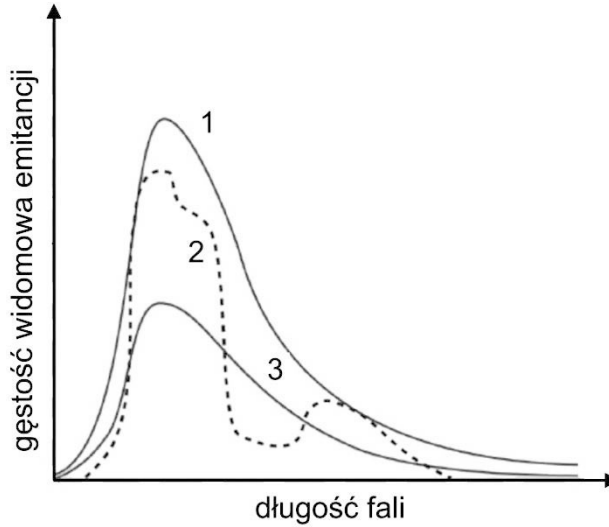
Tabela 4.1. Przykładowe wartości współczynników emisyjności dla różnych materiałów
(dane z różnych źródeł)

Material	Temperatura [°C]	Współczynnik emisyjności ε
Metale		
Aluminium matowe	50	0,07
Aluminium polerowane	50	0,05
Aluminium silnie utlenione	50	0,20–0,30
Blacha cynkowa	50	0,20
Blacha ocynkowana błyszcząca	50	0,23
Blacha ocynkowana utleniona (szara)	50	0,28
Brąz polerowany	0	0,10
Brąz surowy (porowaty)	0	0,55
Chrom polerowany	0	0,10
Cynk arkusz	0	0,20
Nikiel polerowany	0	0,05
Miedź polerowana	0	0,018–0,023
Miedź utleniona	0	0,65
Mosiądz polerowany	0	0,03
Mosiądz zmatowiony	0	0,22
Ołów błyszczący	0	0,08
Ołów szary	0	0,28
Ołów szary oksydowany	0	0,63
Srebro czyste polerowane	20	0,02
Złoto polerowane	0	0,02
Żelazo polerowane	0	0,23
Żelazo utlenione	0	0,74
Żeliwo polerowane	0	0,21
Żeliwo utlenione	0	0,74
Farby i lakiery		
Aluminiowa farba	325	0,35
Emalia biała na żelazie	20	0,90
Lakier biały	20	0,85–0,90
Lakier emaliowany	20	0,85–0,95
Lakier szary błyszczący	20	0,87
Lakier szary matowy	20	0,97
Olejne farby w różnych kolorach	20	0,92–0,95
Materiały budowlane		
Blacha stalowa utleniona	20	0,82
Blacha stalowa walcowana	50	0,56
Blacha stalowa niklowana	20	0,11
Cegła ceramiczna chropowata	0	0,88–0,93
Cegła szkliwiona	0	0,85

Cegła ogniotrwała	200	0,80–0,90
Dąb strugany	20	0,90
Gips	20	0,85–0,90
Papa	20	0,93
Tynk chropowaty	10–70	0,91
Stal silnie utleniona	20	0,88
Materiały różne		
Azbest, płyta	0	0,96
Azbest, tkanina	0	0,78
Gлина wypalona	0	0,91
Guma	20	0,93–0,95
Lód gładki	0	0,97
Lód chropowaty	0	0,98
Lód kryształ	–10	0,98
Papier biały	20	0,70–0,90
Papier czarny błyszczący	20	0,90
Papier czarny matowy	20	0,94
Sadza	20–400	0,95–0,97
Skóra ludzka	30	0,96–0,98
Szkło	0	0,92
Śnieg świeży	0	0,95
Taśma izolacyjna czarna	20	0,95
Woda	0–100	0,95–0,97



Rys. 4.8. Emisyjność widmowa dla trzech typów radiatorów: 1 – ciało czarne, 2 – ciało szare, 3 – radiator selektywny (na podstawie [93])



Rys. 4.9. Gęstość widmowa natężenia promieniowania: 1 – ciało czarne, 2 – radiator selektywny, 3 – ciało szare (na podstawie [93])

- ciało czarne, dla którego $\varepsilon(\lambda, T_s) = \varepsilon = 1$,
- ciało szare, dla którego $\varepsilon(\lambda, T_s) = \varepsilon = \text{const} < 1$
- ciało promieniujące selektywnie, dla którego $\varepsilon(\lambda, T_s)$ zmienia się w funkcji długości fali.

Może jeszcze występować ciało (doskonale) białe, dla którego $\varepsilon(\lambda, T_s) = \varepsilon = 0$, ale ze względu na zerową wartość współczynnika emisyjności nie jest ono źródłem promieniowania temperaturowego.

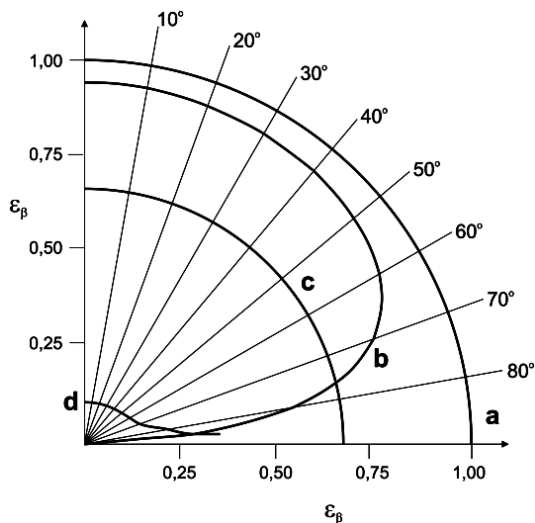
Współczynnik emisyjności ε zależy również od kąta obserwacji. Emisyjność ε danego ciała zależy od kąta obserwacji θ , długości fali promieniowania λ , temperatury ciała T oraz od czasu τ , co wyraża wzór:

$$\varepsilon = f(0, \lambda, T_s, \tau) \quad (4.21)$$

Zależność współczynnika emisyjności badanego obiektu od kąta obserwacji ma bardzo duże znaczenie dla metodyki wykonywania badań termowizyjnych w budownictwie (zwłaszcza badań budynków), gdyż w trakcie pomiarów bardzo ważny jest tzw. „kąt patrzenia” kamery na badany obiekt (kąt między normalną do badanej powierzchni) i osią kamery). Zagadnienie to omówiono w rozdziale 6.4.2.

Zgodnie z prawem Kirchhoffa w warunkach równowagi promieniowania cieplnego dla pełnego zakresu promieniowania, tj. $\lambda = 0 \div \infty$, emisyjność powierzchni ciała ε jest równa jej absorpcyjności a w tej samej temperaturze [187], co można wyrazić wzorem:

$$\varepsilon = a \quad (4.22)$$



Rys. 4.10. Zmienność kierunkowej emisyjności panchromatycznej dielektryków w funkcji kąta padania promieniowania: a) ciało czarne, b) dielektryk nieprzezroczysty, c) ciało szare, d) metal polerowany [169], [187]

Prawo Kirchhoffa może być również sformułowane inaczej [74]: stosunek emisji ciała do jego absorpcyjności jest zależny tylko od temperatury i dla danej temperatury jest stały, niezależnie od innych właściwości ciała.

Nawiązując do definicji ciała (doskonale) czarnego, można stwierdzić, że powierzchnia tego ciała ma nie tylko największą zdolność pochłaniania, ale również największą zdolność emitowania promieniowania cieplnego. Oznacza to, że żadne inne ciało o takiej samej temperaturze jak ciało czarne i w identycznych warunkach nie może wypromieniować więcej energii niż ciało czarne.

Również dla wszystkich ciał w danej temperaturze i dla tej samej długości fali λ współczynnik emisyjności monochromatycznej ε_λ jest równy współczynnikowi pochłaniania a_λ :

$$\varepsilon_\lambda = a_\lambda \quad (4.23)$$

Emisyjność monochromatyczna oraz całkowita mogą być zależne od temperatury, co znacznie utrudnia obliczanie wymiany ciepła przez promieniowanie [74].

Po uwzględnieniu równań (4.22) i (4.23) równania (4.17) i (4.18) można zapisać:

$$\varepsilon + r = 1 \quad (4.24)$$

$$\varepsilon_\lambda + r_\lambda = 1 \quad (4.25)$$

Z równań (4.24) i (4.25) wynika, że:

$$\varepsilon = 1 - r \quad (4.26)$$

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - r_{\lambda} \quad (4.27)$$

Dwie ostatnie zależności mają duże znaczenie praktyczne, ponieważ łatwiej jest zmierzyć wartość współczynnika refleksyjności danej powierzchni niż jej współczynnik emisyjności.

Przed rozpoczęciem pomiarów termowizyjnych wartość współczynnika emisyjności badanej powierzchni należy wprowadzić do systemu kamery – najczęściej dobiera się go z tablic. Jest to metoda skuteczna i daje dobre rezultaty w przypadku powierzchni o stałych wartościach współczynników emisyjności. Z tabeli 4.1 wynika, że wartości współczynników emisyjności badanej powierzchni mogą się zmieniać w bardzo dużym przedziale, od 0,02 dla złota polerowanego, poprzez stal utlenioną do 0,93 dla tynków. W dużym stopniu współczynnik emisyjności zależy od temperatury powierzchni. W dobieraniu współczynnika emisyjności z tablic należy zachować ostrożność, ze zwróceniem uwagi na zakres temperatury i długość fali promieniowania, dla których ta wartość została wyznaczona (może się zdarzyć, że zakres długości fal, w którym pracuje kamera nie odpowiada zakresowi długości fal, w którym wyznaczono współczynnik emisyjności).

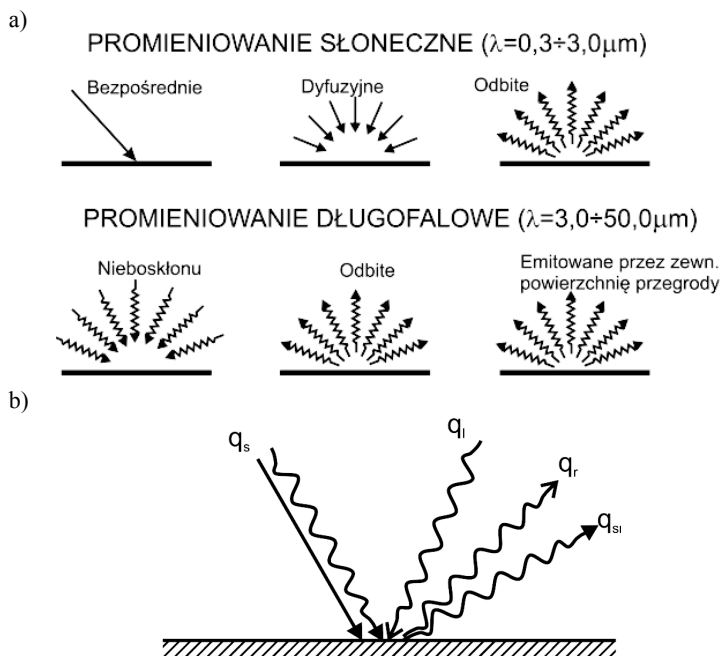
Współczynnik emisyjności badanej powierzchni jest parametrem najbardziej wpływającym na wartość mierzonej temperatury metodą termograficzną (patrz równanie (4.9)) – problem ten omówiono w rozdziale 6.4. W rozdziale tym omówiono również zagadnienie praktycznego wyznaczania współczynnika emisyjności badanej powierzchni, co jest niezbędne w termowizyjnych badaniach budynków.

4.4.3. Powierzchnie spektralnie selektywne

Współczynnik emisyjności powierzchni danego ciała oraz jej współczynnik absorpcji promieniowania dla tej samej długości fal nie są jedynymi charakterystykami radiacyjnymi rozpatrywanej powierzchni. Należy zwrócić uwagę, że w zakresie radiacyjnej wymiany ciepła na przegrody budowlane oddziałuje promieniowanie słoneczne (krótkofalowe), w umownym zakresie długości fal od 0,3 do 3,0 μm oraz promieniowanie cieplne (podczerwone, temperaturowe, długofalowe) w umownym zakresie długości fal od 3,0 do 50,0 μm (patrz rozdział 2.2.2 oraz 5.1). Właściwości absorpcyjne i emisyjne powierzchni radiatora, w tym przegród budowlanych, najczęściej są różne dla tych dwóch zakresów promieniowania – są to tak zwane powierzchnie spektralnie selektywne, które mogą znacząco wpływać na bilans cieplny oraz na rozkład temperatury na powierzchniach przegród budowlanych.

Przedstawiony w rozdziale 5.1 rysunek 5.2 ilustruje radiacyjne właściwości środowiska zewnętrznego, co pozwala wyjaśnić zarówno istotę radiacyjnego oddziaływania środowiska na budynki w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego, jak i wyjaśnić zasadę kształtowania tzw. spektralnie selektywnych radiacyjnych właściwości zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych pełnych i przezroczystych.

W radiacyjnej wymianie ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej (lub innego radiatora) biorą udział: bezpośrednie i rozproszone promieniowanie krótkofalowe (słoneczne), długofalowe promieniowanie nieboskłonu (zwrotne promieniowanie cieplne atmosfery z całej półsfery), promieniowanie cieplne najbliższego otoczenia budynku, promieniowanie cieplne emitowane przez zewnętrzną powierzchnię przegrody oraz promieniowanie cieplne odbite od tej powierzchni, co przedstawiono na rysunku 4.11a.



Rys. 4.11. Główne strumienie radiacyjne środowiska zewnętrznego wpływające na procesy cieplne na zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych: a) poszczególne strumienie radiacyjne w zakresie promieniowania krótkofalowego (słonecznego) i długofalowego (cieplnego), b) strumienie radiacyjne wypadkowe: q_s – natężenie absorbowanego promieniowania słonecznego (bezpośredniego i rozproszonego), q_{sr} – natężenie odbitego promieniowania słonecznego, q_l – natężenie absorbowanego długofalowego promieniowania najbliższego otoczenia budynku, q_r – suma natężenia strumienia ciepła emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody oraz promieniowania cieplnego odbitego

Dla nieprzezroczystej powierzchni przegrody budowlanej wartość współczynnika absorpcyjności oraz refleksyjności dla promieniowania długofalowego, w przypadku ogólnym, jest funkcją długości fali promieniowania, temperatury powierzchni oraz kąta emisji promieniowania, co można wyrazić równaniem [160], [187]:

$$a_L(\lambda, z, \Phi, T) + r_L(\lambda, z, \Phi, T) = 1 \quad (4.28)$$

w którym a_L , r_L i T są odpowiednio absorpcyjnością i refleksyjnością powierzchni dla promieniowania długofalowego oraz temperaturą powierzchni radiatora; natomiast λ , z i Φ oznaczają długość fali promieniowania, kąt zenitalny oraz kąt azymutu dla docierającego promieniowania. Można przyjąć, że dla stosunkowo wąskiego zakresu zmienności temperatury powierzchni radiatora, w tym przegród budowlanych, jaka występuje w okresie zimy i lata, współczynniki a_L oraz r_L nie zależą od temperatury powierzchni [167]. Ponieważ promieniowanie długofalowe atmosfery dochodzi z całej półsfery, można również założyć, że współczynniki a_L i r_L nie zależą od kątów z oraz Φ . Ponadto, ze względu na stosunkowo dużą chropowatość powierzchni przegród budowlanych (z wyjątkiem szyb) w odniesieniu do długości fal docierającego promieniowania długofalowego, można je uznać za reflektory dyfuzyjne. Równanie (4.28) można zatem zapisać:

$$a_L + r_L = 1 \quad (4.29)$$

Zgodnie z prawem Kirchhoffa, dla ciał szarych w tej samej temperaturze, półsferyczny współczynnik absorpcyjności dla promieniowania cieplnego jest równy półsferycznemu współczynnikowi emisyjności:

$$\varepsilon = a_L \quad (4.30)$$

oraz

$$\varepsilon = 1 - r_L \quad (4.31)$$

Dla nieprzezroczystej powierzchni przegrody budowlanej, w odniesieniu do promieniowania krótkofalowego (słonecznego), podobnie jak do promieniowania długofalowego, można zapisać następującą zależność między absorpcyjnością i refleksyjnością powierzchni:

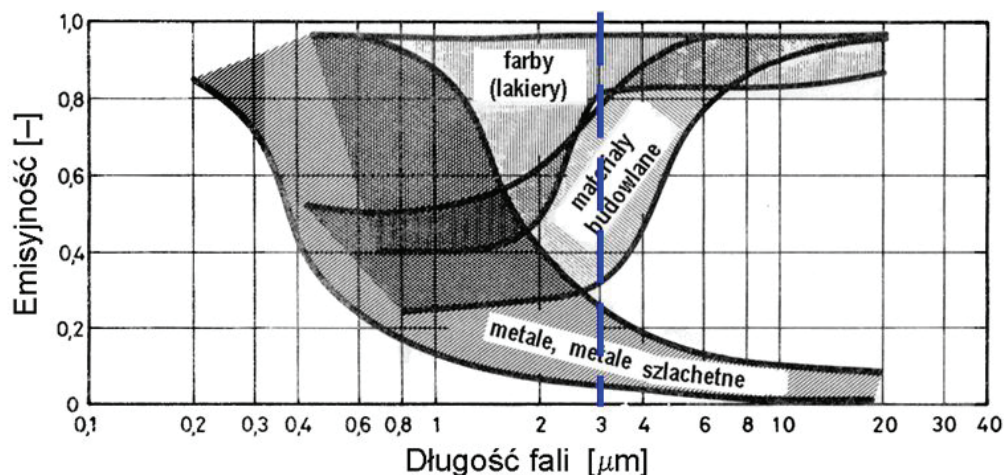
$$a_s(\lambda, z, \Phi, T) + r_s(\lambda, z, \Phi, T) = 1 \quad (4.32)$$

Ponieważ zewnętrzne powierzchnie nieprzezroczystych przegród budowlanych można uznać za chropowate dla promieniowania słonecznego (podobnie jak dla cieplnego), współczynniki a_s oraz r_s są niezależne od kąta padania promieniowania. Można również założyć, podobnie jak w przypadku radiacyjnych charakterystyk powierzchni dla promieniowania długofalowego, że są one niezależne od zmian temperatury powierzchni [160]. Zależność współczynnika refleksyjności powierzchni w funkcji długości fali promieniowania słonecznego może mieć natomiast znaczenie dla różnych materiałów. Jeżeli jednak refleksyjność rozważanej powierzchni jest mierzona w warunkach naturalnych (nie w laboratorium), z uwzględnieniem konfiguracji otaczających budynków, to można założyć, że uzyskana wartość refleksyjności aproksymuje spektralny rozkład dochodzącego promieniowania słonecznego [160], a zatem:

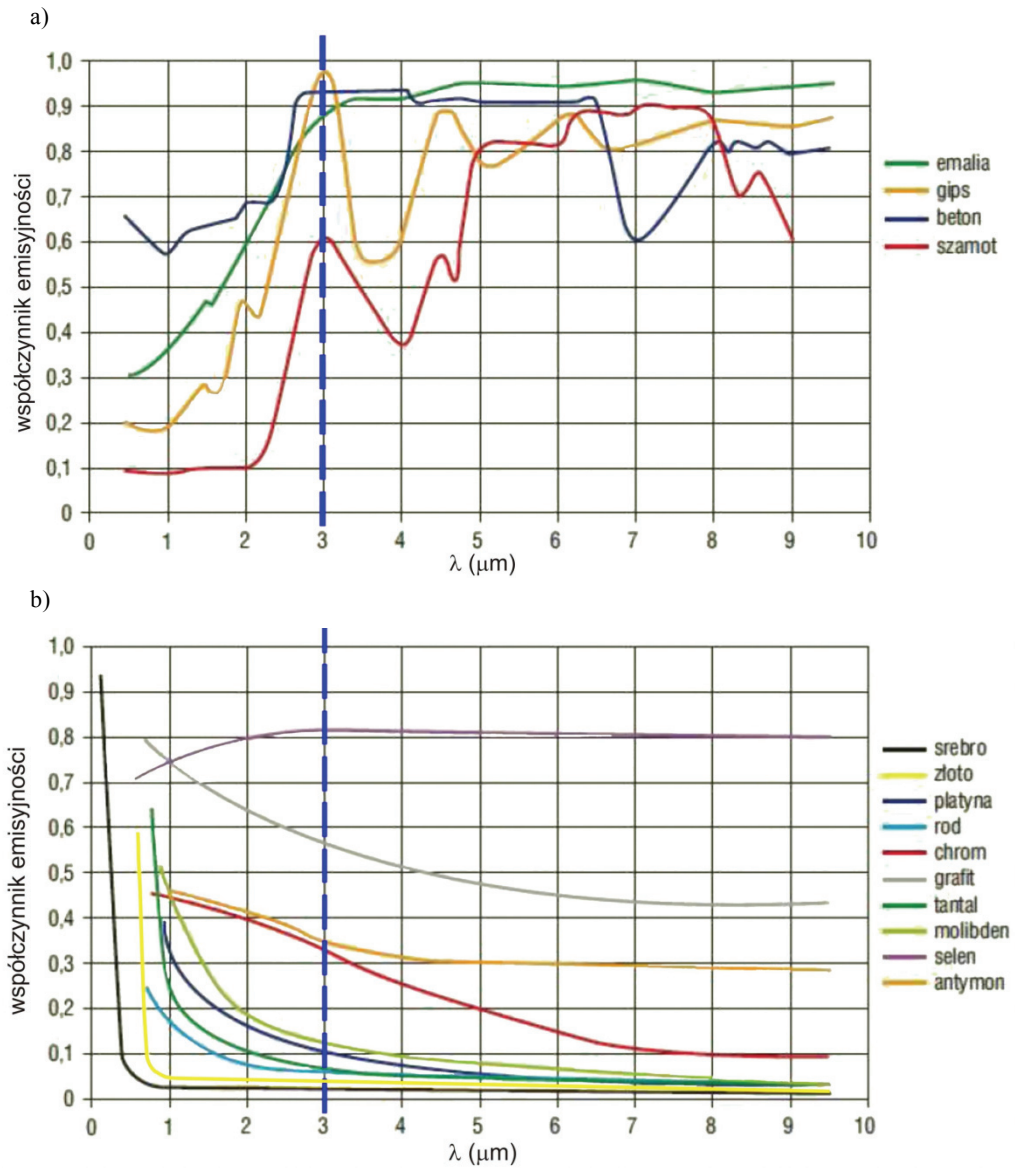
$$a_s + r_s = 1 \quad (4.33)$$

Z podanych uwag wynika, że dla rozważanej powierzchni przegrody budowlanej najistotniejszymi właściwościami radiacyjnymi są: półsferyczny współczynnik absorpcji a_s dla promieniowania słonecznego oraz półsferyczny współczynnik emisyjności ε , ze względu na emisję i absorpcję promieniowania długofalowego docierającego z całej półsfery. Wielkości te w dalszej części książki będą nazywane: współczynnik absorpcji a_s dla promieniowania krótkofalowego i współczynnik emisyjności ε . Współczynniki te odnoszą się do różnych zakresów promieniowania i decydują o tak zwanych spektralnie selektywnych właściwościach radiacyjnych danej powierzchni. Sposób przeprowadzania badań współczynników a_s oraz ε dla wybranych materiałów budowlanych przedstawiono między innymi w pracach [41], [128], [199].

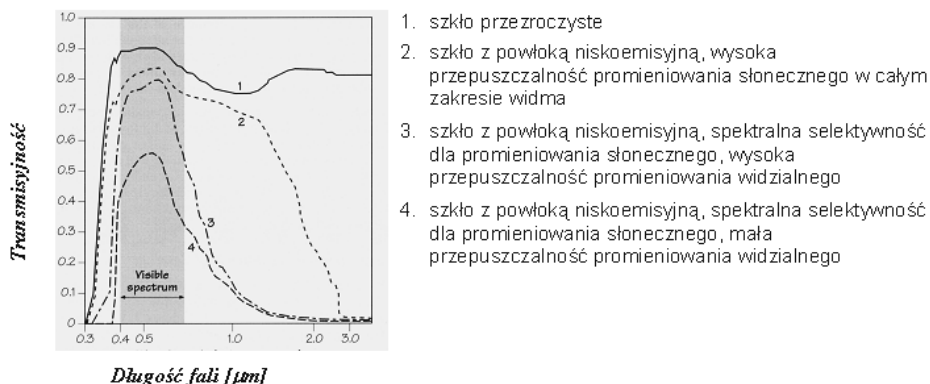
Współczynnik a_s jest funkcją długości fali promieniowania słonecznego, współczynnik emisyjności ε natomiast zmienia się wraz ze zmianą długości fali w zakresie widma promieniowania cieplnego. Współczynniki a_s oraz ε są charakterystyczne dla danej grupy materiałów, a charakterystyki radiacyjne powierzchni są różne dla różnych grup materiałowych (rys. 4.12). Powierzchnie spektralnie selektywne, stosowane jako zewnętrzne warstwy przegród budowlanych, umożliwiają kontrolowane kształtowanie bilansu promieniowania tych przegród i w konsekwencji bilansu cieplnego przegród oraz całego budynku. Oczywiście mogą one w sposób istotny wpływać na rozkład temperatury na powierzchniach przegród budowlanych, co może mieć znaczący wpływ na wyniki termowizyjnych badań tych przegród.



Rys. 4.12. Wartości współczynników absorpcyjności a_s dla promieniowania słonecznego (krótkofalowego) oraz współczynników emisyjności ε dla promieniowania cieplnego (długofalowego) dla różnych grup materiałów budowlanych [41]. Linia przerywaną zaznaczono umowną granicę ($\lambda=3,0 \mu\text{m}$) między promieniowaniem krótko- i długofalowym (odpowiednio słonecznym i cieplnym)



Rys. 4.13. Przebieg wartości współczynników absorpcyjności a_s dla promieniowania słonecznego (krótkofalowego, w umownym zakresie długości fal od 0,3 do 3,0 μm) oraz współczynników emisyjności ε dla promieniowania ciepłego (długofalowego, w umownym zakresie długości fal od 3,0 do 50,0 μm) dla: a) wybranych materiałów budowlanych, b) innych materiałów. Linia przerywaną zaznaczono umowną granicę ($\lambda = 3,0 \mu\text{m}$) między promieniowaniem krótko- i długofalowym



Rys. 4.14. Przykładowe właściwości radiacyjne powierzchni szyby pokrytej warstwami spektralnie selektywnymi [46]

Na rysunku 4.13 pokazano zmienność wartości współczynników absorpcyjności a_s dla promieniowania słonecznego (krótkofalowego) oraz współczynników emisyjności ε dla promieniowania ciepłego (długofalowego) dla materiałów budowlanych i dla innych materiałów. Wartości tych współczynników dla różnych powierzchni mogą różnić się diametralnie, co w praktyce oznacza różny wpływ tego typu powierzchni na bilans cieplny przegród budowlanych i budynków oraz różny wpływ na zobrazowanie termalne (termogramy) tych powierzchni.

Na rysunku 4.14 przedstawiono przykładowe rzeczywiste charakterystyki radiacyjne dla szyby pokrytej warstwą tlenków metali.

Rzeczywiste charakterystyki radiacyjne powierzchni spektralnie selektywnych charakteryzują się przebiegami krzywoliniowymi (rys. 4.13 i 4.14) – w analizach obliczeniowych bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków przyjmuje się najczęściej stałą wartość współczynnika a_s w całym zakresie długości fal promieniowania słonecznego oraz stałą wartość współczynnika ε w zakresie promieniowania długofalowego [126]. Wynika to z dużych trudności w uwzględnianiu zmian wartości tych współczynników w funkcji długości fali w odpowiadających im zakresach widma promieniowania. Dowolną powierzchnię, dla której przyjęto stałe wartości współczynników a_s oraz ε nazywa się również „półszarą” [126], ponieważ można ją rozpatrywać jako szarą w zakresie widma promieniowania słonecznego i jako szarą w zakresie widma promieniowania długofalowego, co pokazano na rysunku 4.14. Na rysunku 4.15 pokazano przykładowe charakterystyki radiacyjne przyjmowane do analiz numerycznych (np. obliczanie bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków).

Miarą spektralnie selektywnych właściwości radiacyjnych danej powierzchni jest współczynnik selektywności opisany równaniem [126]:

$$\eta = \frac{a_s}{\varepsilon} \quad (4.34)$$

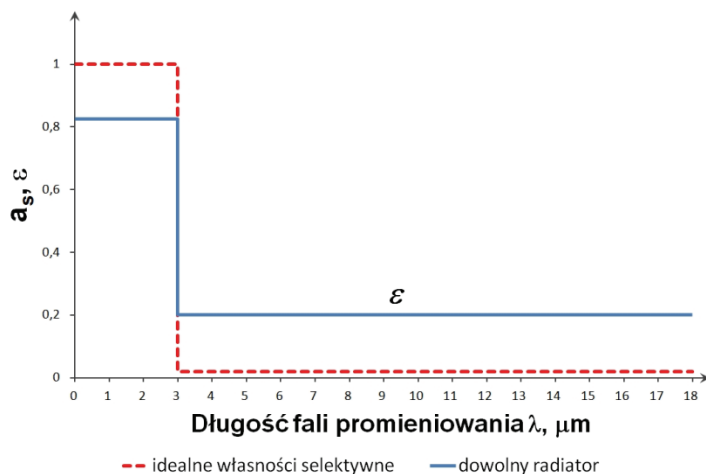
Im większy jest współczynnik selektywności η dla danej powierzchni, tym większa jest jej zdolność do absorpcji promieniowania słonecznego oraz tym mniejsza zdolność do pochłaniania i emitowania promieniowania długofalowego. Gdy natomiast współczynnik η maleje, wzrasta wielkość pochłanianego i emitowanego promieniowania długofalowego oraz maleje ilość promieniowania słonecznego pochłanianego przez tę powierzchnię.

W tabeli 4.2 zamieszczono przykładowe wartości współczynników absorpcyjności a_s dla promieniowania słonecznego (krótkofalowego) oraz współczynników emisyjności ε dla promieniowania cieplnego (długofalowego) dla różnych materiałów oraz współczynnik selektywności η (równanie (4.34)).

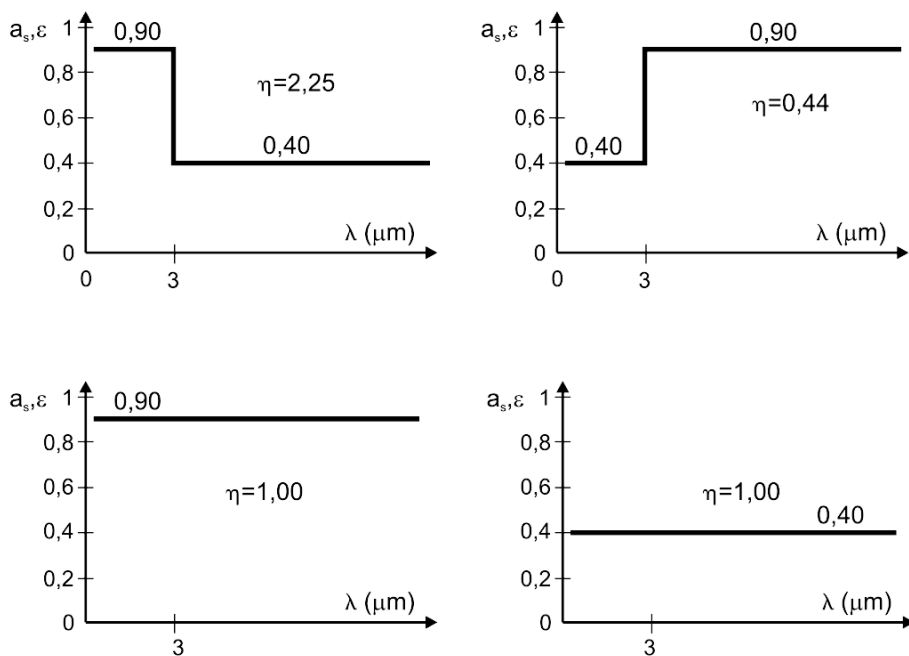
Powierzchnie spektralnie selektywne w budownictwie są stosowane głównie jako powłoki radiacyjne w zestawach szyb zespolonych i w systemach fasadowych do kon-

Tabela 4.2. Przykładowe wartości współczynników absorpcyjności a_s dla promieniowania słonecznego (krótkofalowego), współczynników emisyjności ε dla promieniowania cieplnego (długofalowego) oraz współczynnik selektywności (równanie (4.34)) dla różnych materiałów (zestawienie własne z różnych źródeł)

Powierzchnia	Absorpcyjność a_s dla promieniowania słonecznego	Emisyjność ε dla promieniowania cieplnego	a_s/ε
Aluminium anodyzowane	0,55	0,76	0,724
Aluminium utlenione	0,09	0,03	3,00
Beton	0,65	0,90	0,72
Cegła ceramiczna	0,50	0,90	0,56
Chrom utleniony na czarno	0,96	0,15	6,40
Drewno strugane	0,35	0,86	0,41
Farba biała	0,35	0,92	0,38
Farba czarna	0,92	0,95	0,97
Guma	0,90	0,90	1,00
Lakier czarny	0,96	0,96	1,00
Lakier czarny epoksydowy	0,95	0,87	1,09
Miedź galwanizowana	0,47	0,03	15,70
Miedź utleniona na czarno	0,91	0,16	5,69
Nikiel galwanizowany	0,22	0,03	7,33
Nikiel chromowany na czarno	0,90	0,15	6,00
Platyna	0,33	0,03	11,00
Srebro polerowane	0,07	0,01	7,00
Szyba zwykła	0,15	0,94	0,16
Szyba z powłoką odbijającą	0,13	0,81	0,161
Śnieg świeży	0,13	0,82	0,159
Tantal	0,59	0,02	29,50
Teflon	0,12	0,85	0,141
Złoto polerowane	0,16	0,03	5,33



Rys. 4.15. Spektralnie selektywne właściwości radiacyjne powierzchni idealnej oraz rzeczywistej przyjmowane do obliczeń (stałe wartości współczynników w odpowiadających im zakresach promieniowania)



Rys. 4.16. Przykładowe radiacyjne właściwości zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej, przyjmowane do obliczeń bilansu cieplnego i budynków, w odniesieniu do promieniowania krótko- i długofalowego (współczynnik selektywności η oblicza się z równania (4.34)) [126]

trolowanego wpływu na ich bilans cieplny. Spektralna selektywność powierzchni przegród przezroczystych polega na przepuszczaniu określonych długości fal promieniowania słonecznego w zależności od funkcji, jaką ma pełnić rozpatrywana przegroda. W przypadku szyb spektralnie selektywnych są to najczęściej dwie funkcje:

- blokowanie części podczerwonej promieniowania słonecznego, która jest odpowiedzialna za niepożądane nagrzewanie się pomieszczeń w okresie letnim (zabezpieczanie przed przegrzewaniem się pomieszczeń),
- przepuszczanie części podczerwonej promieniowania słonecznego w celu dogrzewania pomieszczeń w zimie (wspomaganie ogrzewania budynku) i/lub umożliwienie nagrzewania się urządzeń korzystających z energii słonecznej (np. ściany akumulacyjne, kolektory słoneczne).

Zasady stosowania powłok spektralnie selektywnych w zestawach szyb zespolonych i ich wpływ na roczny bilans energetyczny budynków o różnym przeznaczeniu przedstawiono między innymi w pracach [124], [125], [134], [135] i [136].

Od wielu lat w różnych ośrodkach naukowych krajowych i zagranicznych prowadzone są prace teoretyczne i eksperymentalne nad wykorzystaniem powierzchni spektralnie selektywnych, w tym również do kształtowania bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków w skali roku. Powierzchnie z maksymalną wartością współczynnika absorpcji promieniowania słonecznego (dla $\lambda < 3,0 \mu\text{m}$) oraz z minimalną możliwością emisji promieniowania długofalowego własnego (dla $\lambda > 3,0 \mu\text{m}$, rys. 4.15 charakterystyka powierzchni o idealnych właściwościach selektywnych) są wykorzystywane do pozyskiwania i konwersji promieniowania słonecznego, przede wszystkim w kolektorach słonecznych (konwersja fototermiczna) i w ogniwach fotowoltaicznych (konwersja fotoelektryczna). W warunkach klimatycznych Polski raczej rzadko stosuje się powłoki spektralnie selektywne na przegrodach nieprzeziernych (ściany, połączenia dachowe, stropodachy). Jednak gdy zachodzi potrzeba ochrony przed niekorzystnym wpływem promieniowania słonecznego (dotyczy to np. zabezpieczenia zewnętrznej powierzchni stropodachu przed nadmiernym wzrostem temperatury), rozważana powierzchnia powinna charakteryzować się minimalną wartością współczynnika absorpcji promieniowania słonecznego dla $\lambda < 3,0 \mu\text{m}$ oraz maksymalną wartością współczynnika emisyjności dla $\lambda > 3,0 \mu\text{m}$ (specjalne farby do stosowania na stropodachach).

Powierzchnie spektralnie selektywne pokrywające przegrody przezroczyste (w tym szyby okienne) są obecnie stosowane w budownictwie na szeroką skalę. Obecnie jest możliwe uzyskanie niemalże dowolnej charakterystyki radiacyjnej warstw spektralnie selektywnych dla szyb okiennych i szklanych fasad. W przypadku przegród nieprzezroczystych (ściany, stropodachy) zasadniczym problemem są jednak trudności w pokrywaniu znacznych powierzchni przegród oraz zapewnienie trwałości cech optycznych w czasie. Ze względu na przeciwstawne wymagania co do radiacyjnych cech zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych, pełnych i przezroczystych, w okresie letnim i zimowym (ochrona przed nasłonecznieniem w lecie oraz pozyski-

wanie energii promieniowania słonecznego w zimie) dobór właściwości spektralnie selektywnych dla danej powierzchni powinien być przedmiotem optymalizacji wielokryterialnej. W formułowaniu i rozwiązywaniu zagadnienia optymalizacji muszą być przyjęte kryteria optymalizacji, tj. funkcje celu oraz określone zmienne decyzyjne i ograniczenia nałożone na zmienne decyzyjne [97], [98], [99]. Niezależnie od doboru optymalnych charakterystyk spektralnie selektywnych, należy zapewnić trwałość i stabilność charakterystyk radiacyjnych w czasie w warunkach eksploatacji przegród.

Wartość współczynnika a_s może mieć duży wpływ na nagrzewanie się przegród budowlanych od promieniowania słonecznego, również w zimie. Należy jednak jednoznacznie stwierdzić, że termowizyjne badania budynków i innych obiektów budowlanych należy wykonywać co najmniej kilka godzin po zachodzie słońca i że w ten sposób eliminuje się zniekształcający wpływ nagrzewania przegród przez promieniowanie słoneczne na obraz termalny przegrody w podczerwieni (patrz rozdz. 6.4). W pomiarach termowizyjnych bardzo duże znaczenie ma wartość współczynnika emisyjności ε zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej. Podczas wykonywania badań termowizyjnych przegród pełnych (ścian, stropów, stropodachów, itp.) o współczynniku emisyjności $\varepsilon < 0,60$ lub szyb okiennych z powłokami niskoemisyjnymi należy wykazać dużą ostrożność w interpretacji termogramów (patrz rozdz. 6.4).

4.5. Wymiana ciepła przez promieniowanie między dwiema powierzchniami

Wymiana ciepła przez promieniowanie cieplne przegród budowlanych z najbliższym otoczeniem ma decydujące znaczenie i wpływ na wyniki badań termowizyjnych. Należy jednak pamiętać, że bilans cieplny badanej powierzchni przegrody budowlanej, i tym samym jej temperatura, jest wypadkową wszystkich trzech sposobów wymiany ciepła, tj. konwekcji, promieniowania i przewodzenia ciepła przez przegrodę.

Gęstość radiacyjnego strumienia ciepła q_1 emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody budowlanej nr 1, o powierzchni F_1 [m²] i temperaturze T_1 [K], jest równa:

$$q_1 = \frac{\Phi_1}{F_1} = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \quad (4.35)$$

gdzie Φ_1 – radiacyjny strumień ciepła emitowanego przez powierzchnię nr 1, natomiast ε_1 jest jej współczynnikiem emisyjności.

Analogicznie, gęstość radiacyjnego strumienia ciepła emitowanego przez powierzchnię przegrody budowlanej nr 2 jest równa:

$$q_2 = \frac{\Phi_2}{F_2} = \varepsilon_2 \sigma T_2^4 \quad (4.36)$$

Gęstość wypadkowego radiacyjnego strumienia ciepła wymienianego między powierzchniami 1 i 2 po założeniu, że temperatura powierzchni przegrody nr 1 jest wyższa od temperatury powierzchni przegrody nr 2 obliczana ze wzoru:

$$q_{1-2} = q_1 - q_2 = \frac{\Phi_{1-2}}{F_1} = \varepsilon_{1-2} \sigma \varphi_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.37)$$

gdzie: Φ_{1-2} – strumień ciepła wymieniany przez promieniowanie między powierzchniami 1 i 2, [W],

ε_{1-2} – emisyjność zastępcza, [-],

σ – stała Stefana–Boltzmann, [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$],

F_1 – pole powierzchni przegrody nr 1, [m^2],

φ_{1-2} – współczynnik konfiguracji,

T_1 – temperatura powierzchni nr 1, [K],

T_2 – temperatura powierzchni nr 2, [K].

Wartość współczynnika emisyjności zastępczej ε_{1-2} zależy od wzajemnego układu powierzchni 1 i 2 wymieniających ciepło przez promieniowanie i jest obliczana z klasycznych równań wymiany ciepła przez promieniowanie [74], [160] lub jest odczytywana z nomogramów, wykresów i z tabel [169], [187].

Można wyróżnić trzy przypadki, w których emisyjność zastępczą można obliczyć prostymi zależnościami [74] [160], [187]:

1. W przypadku powierzchni małych lub znacznie oddalonych od siebie, tzn. takich, dla których promieniowanie odbite od drugiej powierzchni, wracające na powierzchnię, z której zostało wypromieniowane, jest pomijalnie małe:

$$\varepsilon_{1-2} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (4.38)$$

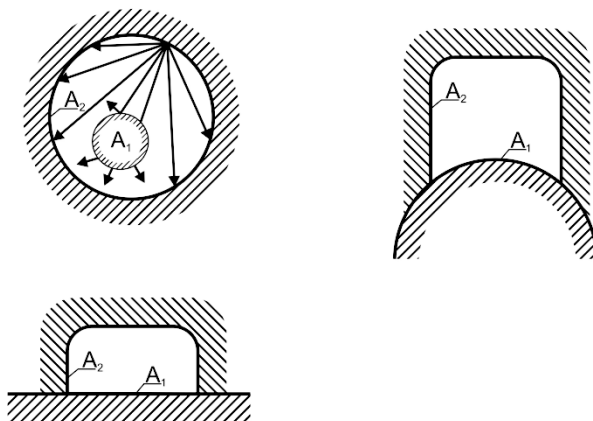
2. W przypadku powierzchni mało odległych od siebie, tzn. takich, gdy promieniowanie odbite od drugiej powierzchni wraca całkowicie na powierzchnię, która je wypromieniowała (np. szczeliny powietrzne w przegrodach budowlanych):

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.39)$$

3. W przypadku powierzchni A_1 objętej ze wszystkich stron powierzchnią A_2 – przykładowe przypadki usytuowania takich płaszczyzn wymieniających ciepło przez promieniowanie pokazano na rysunku 4.17.

Emisyjność zastępczą w tym przypadku (rys. 4.17) oblicza się ze wzoru:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (4.40)$$



Rys. 4.17. Przykładowe (klasyczne) przypadki usytuowania płaszczyzn wymieniających ciepło przez promieniowanie

Można zauważyć, że w przypadku, gdy powierzchnia A_2 jest znacznie większa od powierzchni A_1 , zastępczy współczynnik emisyjności jest w przybliżeniu równy współczynnikowi emisji ciała o mniejszej powierzchni ($\varepsilon_{1-2} \approx \varepsilon_1$). Tę właściwość wykorzystuje się między innymi w obliczaniu i analizie radiacyjnej wymiany ciepła stropodachów i ścian budynków z nieboskłonem.

W przypadku współczynnika konfiguracji φ_{1-2} , uwzględniającego wzajemne położenie rozpatrywanych powierzchni wymieniających ciepło przez promieniowanie, przyjmuje się zasadę, że suma wszystkich współczynników konfiguracji związanych z radiacyjną wymianą ciepła danej powierzchni z powierzchniami ją otaczającymi jest równa jedności. Wartości współczynników konfiguracji φ_{1-2} są przyjmowane z nomogramów, wykresów i z tabel [74], [160], [167] i [187].

W literaturze można spotkać inną postać wzoru (4.37) na obliczanie wypadkowego radiacyjnego strumienia ciepła wymienianego między dwiema powierzchniami (patrz również wzór (4.10)):

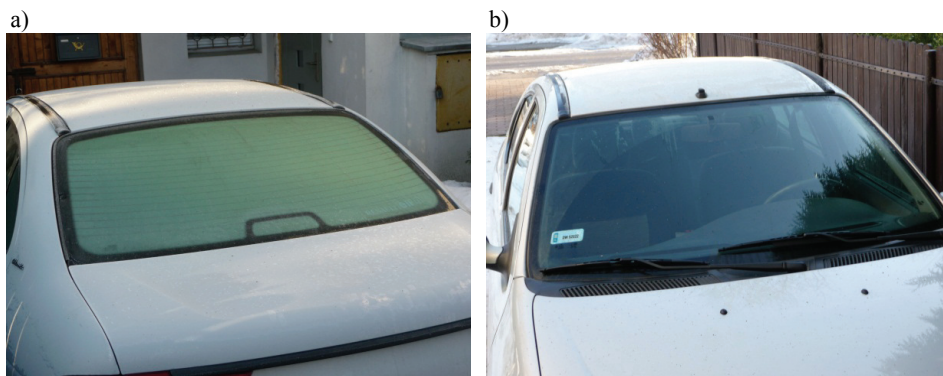
$$q_{1-2} = q_1 - q_2 = \varepsilon_{1-2} C_o \varphi_{1-2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (4.41)$$

gdzie C_o – stała promieniowania ($C_o = 5,6693 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$).

5. Radiacyjna wymiana ciepła budynku z otoczeniem

5.1. Promieniowanie ciepłe środowiska zewnętrznego

W termowizyjnych badaniach budynków i innych obiektów budowlanych kluczowym zagadnieniem jest ich wymiana ciepła przez promieniowanie ciepłe ze środowiskiem zewnętrznym, przy czym oczywiście jest ona również warunkowana konwekcyjną wymianą ciepła z otoczeniem i przewodzeniem ciepła przez przegrody. Z kolei promieniowanie ciepłe środowiska zewnętrznego jest jednym z głównych elementów, które warunkują radiacyjną wymianę ciepła obiektów budowlanych z najbliższym otoczeniem i które znacząco wpływa na obraz termalny powierzchni badanych elementów. Promieniowanie ciepłe atmosfery i najbliższego otoczenia badanych obiektów cechuje się charakterystyczną zmiennością w funkcji kąta zenitalnego, temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz stopnia zachmurzenia nieboskłonu. Występująca w środowisku naturalnym wymiana ciepła przez promieniowanie odgrywa istotną rolę w naszym życiu codziennym, co związane jest przede wszystkim z oddziaływaniem promieniowania słonecznego (krótkofalowego), które nagrzewa atmosferę, oceany, morza, grunt, budynki, najbliższe otoczenie budynków, roślinność itp. Ciała te emitują promieniowanie własne, stając się wtórnym źródłem promieniowania ciepłego i pochłaniają jednocześnie promieniowanie ciepłe pochodzące od atmosfery, gruntu i obiektów sąsiadujących – proces ten przebiega w sposób ciągły. Wymiana ciepła przez promieniowanie podczerwone oraz skutki tej wymiany odgrywają również istotną rolę w życiu codziennym, zwłaszcza gdy chodzi o efekt tzw. chłodzenia radiacyjnego, czyli obniżania się temperatury powierzchni danego ciała (np. przegrody budowlanej) poniżej temperatury otaczającego powietrza. Można podać wiele przykładów na potwierdzenie występowania tego zjawiska. Najprostszy powszechnie znanymi przykładami mogą być zjawiska tworzenia się rosy lub szronu na trawie czy też zamarzanie kałuż przy bezchmurnym nieboskłonie w godzinach rannych w temperaturze powietrza wynoszącej kilka stopni Celsjusza powyżej zera. Innym znanym przykładem na występowanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego jest



Rys. 5.1. Przykład chłodzenia radiacyjnego tylnej szyby samochodowej, samochód jest zaparkowany przodem do budynku, w bliskiej od niego odległości: a) mocno pochylona tylna szyba samochodowa „widzi” głównie zimny bezchmurny nieboskłon i w wyniku radiacyjnych strat ciepła nierekompensowanych zwrotnym promieniowaniem ciepłym atmosfery pokrywa się szronem, b) w tym samym czasie przednia szyba samochodowa, znajdująca się blisko ściany zewnętrznej budynku, nie ulega zasznieniu, ponieważ radiacyjne straty ciepła szyby są rekompensowane radiacyjnymi zyskami ciepła pochodzącymi od ściany budynku

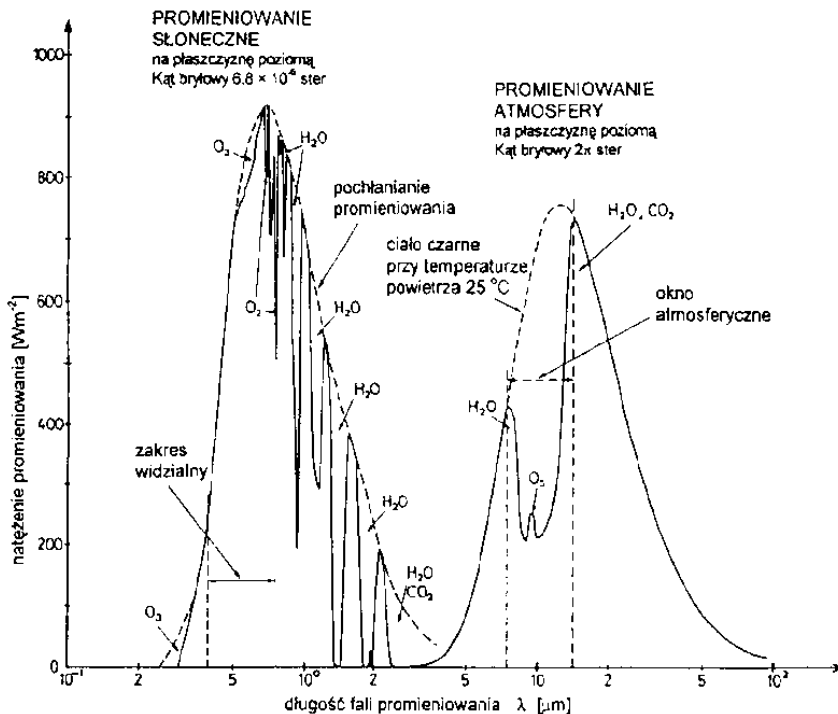
tworzenie się szronu na szybach samochodowych podczas bezchmurnych nocy w zimie, co jest ściśle związane ze znacznym wypromieniowaniem ciepła do zimniejszego i bezchmurnego nieboskłonu (rys. 5.1).

Zjawisko chłodzenia radiacyjnego od wieków jest wykorzystywane, między innymi, w krajach arabskich do pasywnego chłodzenia budynków, tj. do odpowiedniego konstruowania budynków, tak aby w kontrolowany sposób wychładzać pomieszczenia mieszkalne w nocy. Rozwiązania te są również stosowane we współczesnej architekturze w krajach o gorącym klimacie. Radiacyjna wymiana ciepła w zakresie promieniowania długofalowego występująca w środowisku naturalnym oraz skutki tej wymiany, od strony jakościowej, znane są od bardzo dawna. Natomiast ilościowe ujęcie zjawiska jest możliwe od momentu odkrycia stratosfery i powstania pierwszych prac naukowych z tego zakresu z początkiem XIX wieku. Prawdopodobnie pierwszym naukowcem, który opisał oraz podjął próbę wyjaśnienia zjawiska chłodzenia radiacyjnego był Sir Benjamin Thompson (1753–1814), którego spostrzeżenia zostały opublikowane w *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 94, 77–182, London, 1904 (cyt. w pracy [100]).

W analizie radiacyjnej wymiany ciepła przegród budowlanych z otaczającym środowiskiem zewnętrznym można wyróżnić dwa rodzaje promieniowania, determinujące również radiacyjną wymianę ciepła w środowisku naturalnym, a mianowicie promieniowanie krótkofalowe (słoneczne), występujące w umownym zakresie długości fal od 0,3 do 3,0 μm oraz promieniowanie długofalowe (ciepne, podczerwone, temperaturowe), występujące w umownym zakresie długości fal od 3,0 do 50,0 μm [36]

(rys. 5.2). W rzeczywistości promieniowanie to obejmuje zakres do $1000\ \mu\text{m}$, jednak ze względu na to, że rozkład intensywności promieniowania długofalowego przypada głównie w przedziale do $50\ \mu\text{m}$, tę wartość przyjęto uważać za umowną granicę promieniowania cieplnego. Za granicę między tymi dwoma zakresami widma przyjęto długość fali $\lambda = 3,0\ \mu\text{m}$. Źródłem promieniowania długofalowego wokół obiektów budowlanych jest promieniowanie atmosfery (promieniowanie nieboskłonu), promieniowanie gruntu, promieniowanie samych budynków oraz promieniowanie najbliższego otoczenia budynków. Promieniowanie cieplne środowiska zewnętrznego w najbliższym otoczeniu budynków może w znaczący sposób wpływać na bilans promieniowania zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych, a w konsekwencji wpływać na ich bilans cieplny, na rozkład temperatury na zewnętrznych powierzchniach przegród budowlanych oraz na wyniki termowizyjnych badań budynków.

Promieniowanie długofalowe atmosfery jest znaczącym elementem w bilansie cieplnym Ziemi, a pełna znajomość zmienności w czasie tego promieniowania, również przy powierzchni gruntu, jest bardzo istotna i niezbędna w rozpatrywaniu wielu

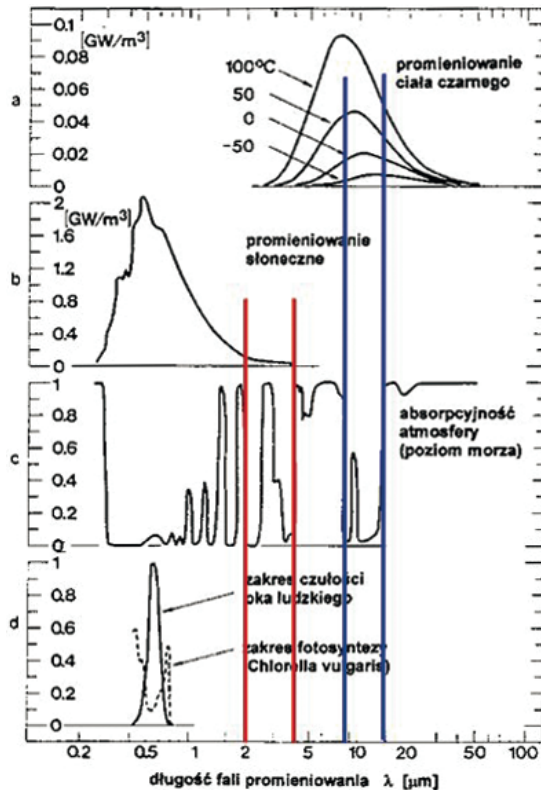


Rys. 5.2. Dwa rodzaje promieniowania warunkujące radiacyjną wymianę ciepła budynków ze środowiskiem zewnętrznym – porównanie natężenia całkowitego promieniowania krótkofalowego (słonecznego) i promieniowania długofalowego (cieplnego, podczerwonego, temperaturowego) atmosfery na płaszczyznę poziomą (temperatura powietrza 25°C) [36]

różnych zagadnień z zakresu szeroko rozumianej meteorologii, agrometeorologii, hydrologii i rolnictwa. Jest również bardzo istotna w analizie wymiany ciepła budynków z najbliższym otoczeniem oraz w interpretacji termogramów budynków, zwłaszcza gdy badania termowizyjne są wykonywane przy bezchmurnym nieboskłonie.

Na rysunku 5.3 przedstawiono w innym układzie radiacyjne właściwości środowiska naturalnego oraz dla porównania zakres widmowy czułości oka ludzkiego. Rysunki 5.2 i 5.3 pozwalają wyjaśnić istotę radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego na budynki w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego oraz wyjaśnić zasadę doboru odpowiednich właściwości radiacyjnych (w tym spektralnie selektywnych) zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej w kontekście kształtowania jej bilansu promieniowania, a w konsekwencji bilansu cieplnego w skali roku. Na rysunku 5.3a przedstawiono spektralny rozkład mocy promieniowania cieplnego dla ciała doskonale czarnego dla czterech poziomów jego temperatury; można zauważyć, że maksimum tego promieniowania przypada na zakres długości fal od 8 do 14 μm , tzn. na zakres „okna atmosferycznego”, w którym atmosfera jest prawie całkowicie przepuszczalna dla promieniowania cieplnego. I w tym właśnie zakresie promieniowania cieplnego nowoczesne kamery termowizyjne do badań budynków dokonują pomiarów, ze względu na najmniejsze pochłanianie przez atmosferę promieniowania docierającego do obiektywu kamery. Na rysunku 5.3b pokazano spektralny rozkład mocy promieniowania słonecznego – kształt krzywej ściśle koresponduje z temperaturą powierzchni Słońca, tj. ok. 6000 °C. Na rysunku 5.3c przedstawiono zmienność absorpcyjności atmosfery w funkcji długości fali promieniowania, w tym dwóch okien atmosferycznych w zakresie długości fal λ od 2,0 do 5,0 μm oraz od 8,0 do 14,0 μm . W tych właśnie zakresach promieniowania cieplnego mogą się dokonywać pomiary kamery termowizyjnej, odpowiednio, tzw. krótkofalowe (ang. *Short Wave Bands*, SWB lub SW) i długofalowe (ang. *Long Wave Bands*, LWB lub LW), patrz również rys. 4.4.

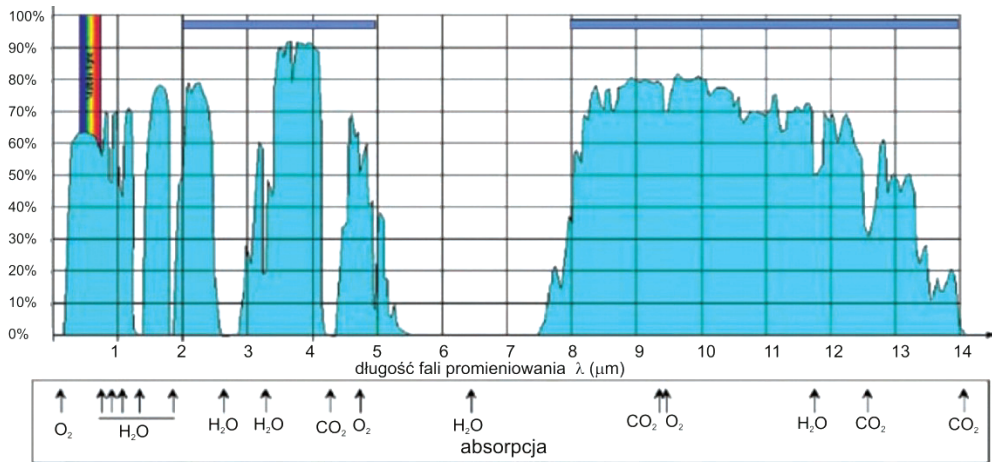
Analizując dane na rysunkach 5.2 i 5.3, można zauważyć, że po pierwsze, zasadnicze spektrum promieniowania słonecznego jest niemal całkowicie przepuszczane przez atmosferę, pomimo że występują pewne spektra absorbowane głównie przez H_2O , CO_2 i O_3 . Po drugie, atmosfera jest niemal całkowicie przepuszczalna w zakresie „okna atmosferycznego” długofalowego (LW, $\lambda = 8,0\text{--}14,0 \mu\text{m}$), na które przypada maksimum promieniowania ciała doskonale czarnego (rys. 5.3a) oraz ciała szarego, jakim jest przegroda budowlana bądź grunt. W praktyce oznacza to, że w czasie bezchmurnych nocy, zwłaszcza w zimie, radiacyjne straty ciepła płaszczyzn poziomych (grunt, stropodachy) są największe i wówczas najczęściej występuje wspomniane wcześniej zjawisko chłodzenia radiacyjnego danej płaszczyzny. Chłodzeniu radiacyjnemu ulegają również, ale w nieco w mniejszym stopniu, ściany budynków, zwłaszcza na górnych kondygnacjach budynków wysokich, co może mieć wpływ na rozkład temperatury na powierzchni ścian i na interpretację termogramów. Na rysunku 5.3d



Rys. 5.3. Widma: a) promieniowania ciała czarnego dla czterech temperatur powierzchni, b) promieniowania słonecznego poza atmosferą ziemską, c) absorpcyjności atmosfery na poziomie morza oraz dla porównania d) zakres czułości ludzkiego oka i zakres długości fal, w którym przebiega proces fotosyntezy algii (na podst. [46]). Zaznaczono również zakresy promieniowania dwóch tzw. okien atmosferycznych w zakresie długości fal λ od 2,0 do 5,0 μm (SW) oraz od 8,0 do 14,0 μm (LW). W tych właśnie zakresach promieniowania cieplnego kamery termowizyjne dokonują pomiarów (dodatkowy opis zawarty jest w tekście)

dla porównania pokazano zakres widmowy czułości oka ludzkiego, zawarty w wąskim przedziale długości fal od 0,4 do 0,7 μm . Można również zauważyć, że niemal ten sam zakres promieniowania słonecznego jest odpowiedni dla procesów fotosyntezy występującej w roślinach (linia przerywana).

Spektralne zakresy długości fal promieniowania krótko- i długofalowego, absorpcyjne właściwości atmosfery oraz zakres czułości oka ludzkiego pokazane na rysunku 5.3 są pomocne w wyjaśnieniu zasad kształtowania tak zwanych spektralnie selektywnych właściwości radiacyjnych zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych przezroczystych i pełnych (rozdz. 4.4.3). Na rysunku 5.4 przedstawiono spektralną przepuszczalność atmosfery ziemskiej w funkcji długości fali promieniowania, z pokazaniem



Rys. 5.4. Spektralna przepuszczalność atmosfery ziemskiej w funkcji długości fali promieniowania z zaznaczeniem tzw. okien atmosferycznych w zakresie długości fali od 2,0 do 5,0 μm (SW – short-wave) oraz od 8,0 do 14,0 μm (LW – long-wave) (na podstawie [93])

widzialnej części promieniowania słonecznego oraz dwóch okien atmosferycznych: w zakresie 2–5,0 μm (SW) i 8,0–14,0 μm (LW). Dane na rysunku 5.4 oczywiście korespondują z danymi na rysunkach 5.2 i 5.3.

W analizie transportu promieniowania ciepłego atmosfery w kierunku Ziemi i jego oddziaływania na budynki i budowle można wyróżnić trzy główne skale uogólnienia:

1. *Skala makro* – najbardziej ogólna, procesy radiacyjne w atmosferze, zarówno w zakresie promieniowania krótkofalowego (słonecznego), jak i długofalowego (promieniowanie atmosfery), traktowane są globalnie, zwłaszcza pod kątem tworzenia modeli cyrkulacji ogólnej w atmosferze. Prace badawcze w tym zakresie od wielu lat są wspomagane ciągłymi pomiarami satelitarnymi promieniowania atmosfery i powierzchni Ziemi. Pomiary te są również niezbędne w modelowaniu i analizie trendu zmian klimatu Ziemi. Promieniowanie z najwyższych warstw atmosfery oddziałuje i wpływa na procesy radiacyjne występujące w skali lokalnej i mikroskali [144] i [145].

2. *Skala lokalna* – obowiązuje dla obszarów aglomeracji miejskich oraz miast, informacje dotyczące docierającego promieniowania ciepłego atmosfery są wykorzystywane do analizy głównych problemów z zakresu fizyki miasta. W obrębie zagadnień, którymi fizyka miasta się zajmuje, na uwagę zasługuje bilans energii cieplnej na terenach zurbanizowanych w odniesieniu do powszechnie znanego zjawiska wyspy ciepła [79].

3. *Mikroskala* – odnosi się do pojedynczego budynku, ale radiacyjne otoczenie budynku jest oczywiście wypadkową procesów cieplnych zachodzących w skali makro i w skali lokalnej oraz procesów zachodzących w najbliższym otoczeniu budyn-

ków. Promieniowanie długofalowe atmosfery oraz najbliższego otoczenia budynku powinno być uwzględnione w analizie bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynku obejmującego okres całego roku oraz przy interpretacji termogramów, zwłaszcza wykonywanych przy bezchmurnym nieboskłonie [126], [129].

To właśnie promieniowanie cieplne w najbliższym otoczeniu budynku ma istotny wpływ na wyniki termowizyjnych badań budynków, na zakłócenia i błędy pomiarowe. Bardzo istotne jest również promieniowanie cieplne nieboskłonu, zwłaszcza bezchmurnego. Efekt bezchmurnego „zimnego nieba” może wpływać na wyniki pomiarów termowizyjnych, co oczywiście należy uwzględnić w interpretacji termogramów.

Warto również zwrócić uwagę na natężenie cieplne promieniowania środowiska zewnętrznego w najbliższym otoczeniu budynków. Natężenie może się zmieniać dla płaszczyzny poziomej w granicach od około $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ do około $320 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w zimie oraz od około $270 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ do około $440 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ poza sezonem ogrzewczym [32], [118], [119], [120]. Są to zatem wartości porównywalne z wartościami natężenia promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę poziomą (w Polsce maksymalnie do ok. 700 W/m^2) i mogą znacząco wpływać na bilans promieniowania, a w konsekwencji na radiacyjne straty ciepła, zwłaszcza przegród poziomych (stropodachów) i gruntu oraz w nieco mniejszym stopniu ścian zewnętrznych, przy bezchmurnym niebie w nocy w zimie.

Niezbędnym warunkiem prawidłowego uwzględnienia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego w bilansie cieplnym przegród budowlanych i budynków jest pełna znajomość zmienności w czasie tego promieniowania dla różnych warunków pogodowych. Powinny to być informacje w zakresie geograficznego rozkładu rocznej, sezonowej, miesięcznej i dziennej zmienności natężenia tego promieniowania w funkcji zmienności elementów meteorologicznych, takich jak stopień zachmurzenia nieba i rodzaj chmur, temperatura i wilgotność względna powietrza, ciśnienie pary wodnej oraz w funkcji kąta pochylenia rozważanej płaszczyzny [37], [116] [126], [129].

Ponieważ promieniowanie cieplne atmosfery nie jest standardowo mierzone na stacjach meteorologicznych, opracowywane modele obliczeniowe wykorzystują wielkości meteorologiczne mierzone rutynowo, takie jak temperatura powietrza, ciśnienie pary wodnej, temperatura punktu rosy i inne. Zasadniczą zaletą modeli empirycznych jest zatem to, że umożliwiają obliczanie natężenia promieniowania długofalowego atmosfery przy powierzchni gruntu na podstawie wymienionych standardowo mierzonych wielkości meteorologicznych, z możliwością przeliczania wielkości tego promieniowania docierającego do płaszczyzn ustawionych pod dowolnym kątem nachylenia. Ma to również szczególne znaczenie w sytuacji, gdy dla danej lokalizacji dysponujemy archiwalną bazą danych meteorologicznych – możliwe jest wówczas uzupełnienie tej bazy o wartości natężenia długofalowego promieniowania atmosfery docierającego do powierzchni gruntu. Model obliczeniowy natężenia cieplnego promieniowania atmosfery dla obszaru Polski przedstawiono w pracach [126] i [129].

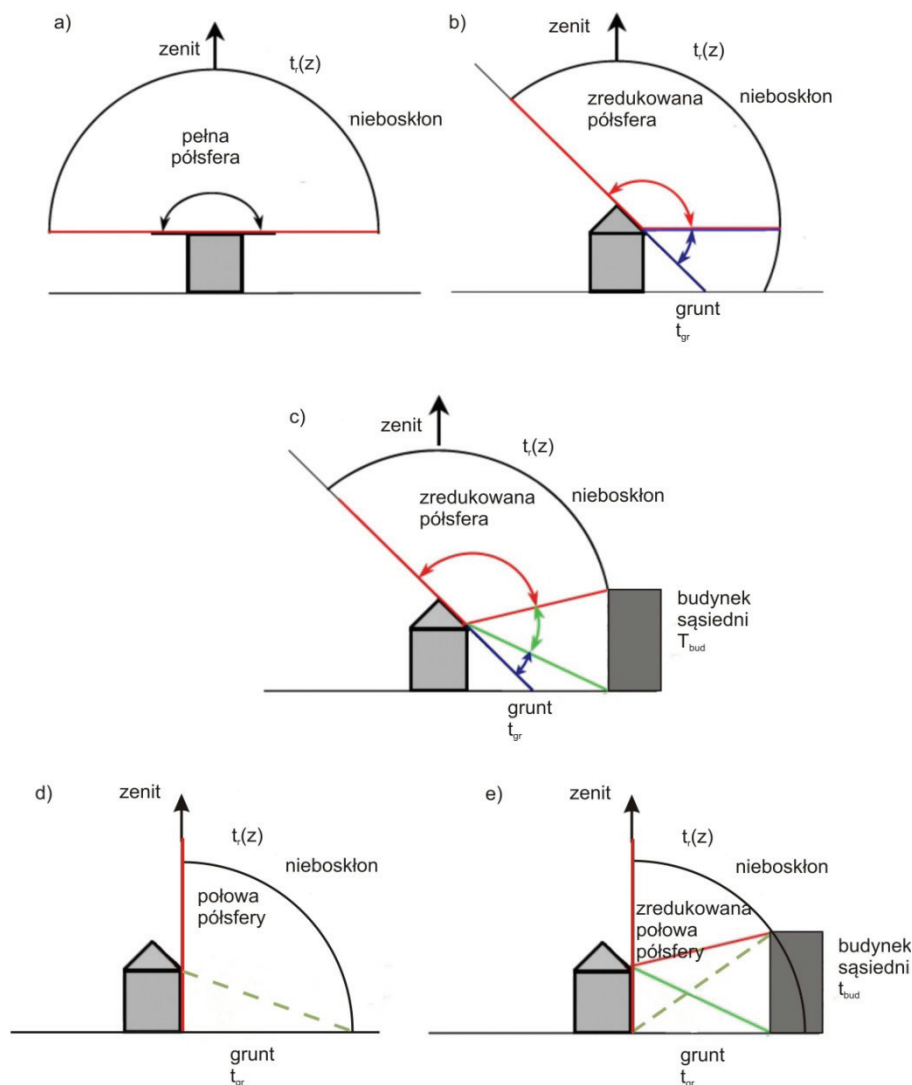
5.2. Chłodzenie radiacyjne zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych

Zewnętrzne powierzchnie przegród budowlanych nieprzerwanie pochłaniają i emitują energię promieniowania ciepłego. Na powierzchnie te oddziałuje promieniowanie słoneczne (promieniowanie krótkofalowe) oraz promieniowanie ciepłe atmosfery, gruntu i obiektów otaczających (promieniowanie długofalowe). Ilość docierającego ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego do przegrody budowlanej zależy od temperatury i wilgotności względnej powietrza zewnętrznego, od jej kąta pochYLENIA oraz od stopnia zachmurzenia nieboskłonu.

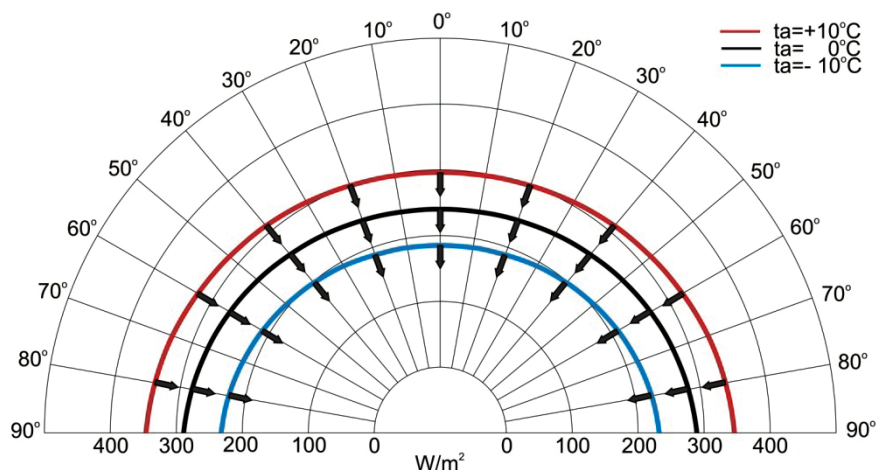
W zakresie promieniowania długofalowego na poziomą płaszczyznę oddziałuje jedynie promieniowanie nieboskłonu. Gdy kąt pochYLENIA tej płaszczyzny wzrasta, jej powierzchnia zewnętrzna „widzi” coraz to mniejszą część nieboskłonu i jednocześnie coraz to większą część gruntu i obiekty otaczające, ich łączne zaś oddziaływanie w postaci promieniowania termicznego sumuje się, by dla kąta 90° (płaszczyzna pionowa) osiągnąć wartość maksymalną [110], [118], [126], [129] (rys. 5.6). W warunkach bezchmurnego nieba w nocy do poziomej lub nachylonej pod niewielkim kątem płaszczyzny dociera najmniejsza wartość natężenia długofalowego promieniowania nieboskłonu, stanowiąc najsłabszą rekompensatę dla wypromieniowanej energii cieplnej przez tę płaszczyznę (rys. 5.5 i 5.6). W związku z tym, straty ciepła przez promieniowanie są wówczas największe, zwłaszcza że atmosfera w zakresie długości fal od 8,0 do 14,0 μm jest prawie całkowicie przepuszczalna dla promieniowania długofalowego („okno atmosferyczne”), a maksimum promieniowania zewnętrznej powierzchni rozważanej płaszczyzny przypada na fale o długości od 10,0 do 12,0 μm [46], [70] (patrz rys. 5.3). Na rysunku 5.5 pokazano typowe schematy radiacyjnej wymiany ciepła budynku z najbliższym otoczeniem [142].

W wyniku tych strat ciepła temperatura zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych, zwłaszcza stropodachów, może osiągnąć wartość niższą od temperatury otaczającego powietrza, co ściśle koresponduje ze znacznymi stratami ciepła przez promieniowanie. Występuje wówczas zjawisko tak zwanego chłodzenia radiacyjnego [22], [44], [110], [113] i [116]. W wyniku znacznych radiacyjnych strat ciepła temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu (lub gruntu) może obniżyć się w stosunku do temperatury powietrza od 4 do 7 $^\circ\text{C}$ [22], [70] a nawet o 11 $^\circ\text{C}$ [113], [116]. W warunkach bezchmurnego nieba w nocy w bilansie cieplnym ścian zewnętrznych efekt wymiany ciepła przez promieniowanie ze środowiskiem zewnętrznym jest mniejszy, co wynika z faktu, że straty ciepła przez promieniowanie przegród pionowych kompensowane są porównywalnymi zyskami energii promieniowania pochodzącej od gruntu oraz od obiektów sąsiadujących [43], [113], [114] (w przypadku stropodachów zwrotne promieniowanie atmosfery osiąga mniejszą wartość). Jednakże, w przypadku ścian budynków zlokalizowanych na obrzeżach miast oraz ścian budyn-

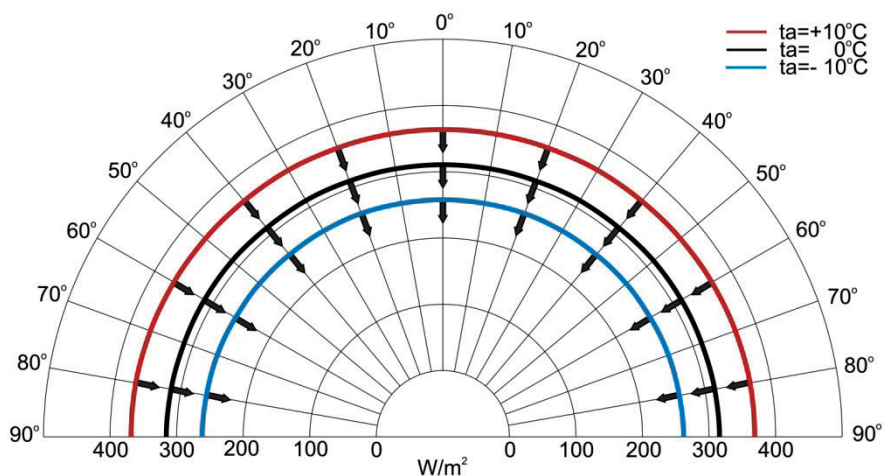
ków wysokich, nie zasłoniętych innymi budynkami, może również wystąpić zjawisko chłodzenia radiacyjnego (w nieco mniejszym stopniu), co może mieć wpływ na rozkład temperatury i na obraz termalny na powierzchniach ścian.



Rys. 5.5. Radiacyjna wymiana ciepła przegród budowlanych z otoczeniem: a) wymiana ciepła poziomego stropodachu jedynie z nieboskłonem, b) wymiana ciepła połaci dachowej z nieboskłonem i gruntem, c) wymiana ciepła połaci dachowej z nieboskłonem, gruntem i z sąsiednimi budynkami, d) wymiana ciepła ściany zewnętrznej jedynie z nieboskłonem i gruntem, e) wymiana ciepła ściany zewnętrznej z nieboskłonem, gruntem i z sąsiednimi budynkami [142]



Rys. 5.6. Natężenie długofalowego promieniowania nieboskłonu i gruntu dochodzącego do dowolnie pochylonych przegród budowlanych ($0^\circ < \beta < 90^\circ$; 0° – płaszczyzna pozioma, 90° – płaszczyzna pionowa) w warunkach bezchmurnego nieboskłonu dla różnej temperatury powietrza [126], [129]. Natężenie promieniowania długofalowego z kierunku nad horyzontem (90°) jest ok. 17–20% większe niż z kierunku zenitalnego (0°), gdyż promieniowanie cieplne atmosfery sumuje się z promieniowaniem cieplnym gruntu



Rys. 5.7. Natężenie długofalowego promieniowania nieboskłonu i gruntu dochodzącego do dowolnie pochylonych przegród budowlanych ($0^\circ < \beta < 90^\circ$; 0° – płaszczyzna pozioma, 90° – płaszczyzna pionowa) w warunkach całkowicie zachmurzonego nieboskłonu dla różnej temperatury powietrza [126], [129]. Natężenie długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego dla danej temperatury powietrza osiąga praktycznie taką samą wartość dla całej półsfery, tzn. że wówczas do ścian, połaci dachowych i do stropodachów dociera takie samo natężenie promieniowania cieplnego z otoczenia

Na rysunkach 5.6 i 5.7 przedstawiono rozkład natężenia ciepłego promieniowania atmosfery, docierającego do rozważanej płaszczyzny, w funkcji jej kąta pochylenia od 0° do 90° (0° – płaszczyzna pozioma, 90° – płaszczyzna pionowa), dla różnej temperatury powietrza zewnętrznego, dla warunków bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieboskłonu [126], [129].

Wraz ze wzrostem kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny (przegrody budowlanej) zmienia się udział poszczególnych składowych w wynikowej wartości natężenia docierającego ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego, tj. promieniowania atmosfery, gruntu i najbliższego otoczenia budynku. W aspekcie bilansu ciepłego przegród budowlanych najistotniejsza jest wynikowa wartość natężenia ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego bądź odpowiadająca jej wartość średniej temperatury promieniowania tego środowiska. W pewnych wypadkach jednak niezbędna może się okazać znajomość wartości natężenia składowych wynikowego długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, tj. promieniowania atmosfery i gruntu, które można wyznaczyć na podstawie modelu obliczeniowego przedstawionego w pracach [126] i [129].

Istotnym elementem wpływającym na ilość docierającego do powierzchni Ziemi promieniowania atmosfery są chmury. Chmury o gęstości wystarczającej do tworzenia się cienia na powierzchni Ziemi emitują promieniowanie jak ciało doskonale czarne o temperaturze równej temperaturze kropelek wody i kryształków lodu, z których są zbudowane. Obecność chmur powoduje wzrost natężenia zwrotnego promieniowania atmosferycznego padającego na powierzchnię Ziemi, gdyż promieniowanie pary wodnej i dwutlenku węgla z dolnych partii atmosfery sumuje się z promieniowaniem chmur w pasmie $8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$, tzn. w tym pasmie, w którym cząsteczki gazów nie emitują żadnego promieniowania. Wzrost natężenia zwrotnego promieniowania ciepłego atmosfery rekompensuje radiacyjne straty ciepła przegród budowlanych. Chmury „zamykają” okno atmosferyczne, wpływając na zmniejszenie radiacyjnych strat ciepła zarówno powierzchni Ziemi, jak i przegród budowlanych, zwłaszcza stropodachów, ale również i ścian (rys. 5.6 i 5.7). Z tego względu pomiary termowizyjne budynków i budowli najbezpieczniej jest wykonywać przy całkowicie zachmurzonym nieboskłonie (co oczywiście nie zawsze jest możliwe), gdyż unikamy wówczas problemów z uwzględnieniem wpływu chłodzenia radiacyjnego przegród budowlanych na rozkład temperatury na ich powierzchniach oraz problemów związanych z interpretacją termogramów.

Straty ciepła z budynku przez promieniowanie mogą stanowić do ok. 20% całkowitych strat ciepła, natomiast pominięcie lub uproszczone potraktowanie radiacyjnej wymiany ciepła budynku z otoczeniem może natomiast spowodować niedoszacowanie zużycia energii cieplnej do około 25–28% w sezonie grzewczym [70].

Moc chłodzenia radiacyjnego przegrody budowlanej może być kształtowana poprzez zastosowanie powierzchni o odpowiednich właściwościach radiacyjnych w odniesieniu do promieniowania słonecznego i długofalowego, tzw. powierzchni spek-

tralnie selektywnych (rozdz. 4.4.3). W przypadku stropodachów i ścian budynków pokrytych materiałami powszechnie stosowanymi w budownictwie, z uwagi na właściwości radiacyjne ich powierzchni zewnętrznej (powierzchnia „szara”), zjawisko chłodzenia radiacyjnego może występować jedynie w nocy. Jeżeli jednak zewnętrzna powierzchnia stropodachu zostanie wykonana z materiału o współczynniku refleksyjności dla promieniowania słonecznego powyżej 0,95 oraz współczynniku emisyjności (dla promieniowania długofalowego) równym co najmniej 0,90, to chłodzenie radiacyjne może wystąpić również w ciągu dnia [17].

Analizując wymianę ciepła przez promieniowanie, należy pamiętać, że stanowi ona jeden ze składników bilansu cieplnego zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej. Jednocześnie bowiem zachodzi wymiana ciepła przez konwekcję tej powierzchni z otoczeniem (co głównie jest związane z omywaniem budynku przez wiatr), a ponadto wpływ na zjawiska cieplne na powierzchni mają struktura przegrody i jej opór cieplny oraz warunki cieplne panujące w pomieszczeniu i na zewnątrz. Bilans cieplny zewnętrznej powierzchni przegrody jest wypadkową oddziaływań wymienionych elementów, a rozkład temperatury na powierzchni badanej przegrody budowlanej, widoczny na termogramach, jest właśnie wypadkową bilansu cieplnego na tej powierzchni.

5.3. Średnia temperatura promieniowania nieboskłonu

5.3.1. Kalorymetryczna temperatura promieniowania nieboskłonu

Od wielu lat obliczenia cieplne z zakresu fizyki budowli, zarówno w Polsce, jak i w innych krajach, przeprowadza się do założeń znacznie upraszczających wpływ radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania długofalowego na bilans cieplny przegród budowlanych, zwłaszcza stropodachów. W obliczeniach tych między innymi nie uwzględnia się możliwości wystąpienia zjawiska chłodzenia radiacyjnego stropodachów i ścian zewnętrznych, ponieważ zakłada się równość temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania nieboskłonu. W konsekwencji prowadzi to do pewnych błędów obliczeniowych, polegających na niedoszacowaniu ilości ciepła traconego przez przegrodę. Proponowaną metodę przeprowadzania obliczeń bilansu cieplnego przegród budowlanych z uwzględnieniem rzeczywistego oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, dla warunków ustalonego przenikania ciepła, przedstawiono w pracach [116] i [126]. Z drugiej jednak strony wspomniane założenie upraszczające ma już wieloletnią tradycję i znacznie ułatwia obliczenia inżynierskie w zakresie ochrony cieplnej budynków.

W szczegółowych obliczeniach cieplnych z zakresu fizyki budowli, np. w obliczaniu bilansu promieniowania zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych często wygodniej jest, zamiast natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, stosować wielkość zwaną średnią temperaturą promieniowania nieboskłonu T_r lub krótko „temperaturą nieba” (ang. *sky temperature*) [16], [44], [113] i [116]. Poprawnie należałoby ją określić jako „kalorymetryczna temperatura nieba” (nieboskłonu). Jest ona definiowana jako temperatura hipotetycznego ciała doskonale czarnego, które promieniowałoby w kierunku płaszczyzny poziomej w całym zakresie widma promieniowania taki sam strumień ciepła, jaki wypromieniowuje atmosfera przy panujących warunkach meteorologicznych. Temperatura promieniowania nieboskłonu ściśle zatem koresponduje z natężeniem promieniowania długofalowego atmosfery. Temperatura nieboskłonu zależy przede wszystkim od stopnia zachmurzenia nieba oraz od temperatury i wilgotności względnej powietrza. Jej wartość zmienia się również, podobnie jak natężenie promieniowania długofalowego atmosfery, wraz ze zmianą kąta zenitalnego; najmniejszą wartość przyjmuje w zenicie, największą natomiast nad horyzontem, gdzie praktycznie równa jest temperaturze otaczającego powietrza. Temperatura nieboskłonu jest zatem najniższa dla płaszczyzny poziomej, np. dla stropodachu i gruntu, dla których radiacyjne straty ciepła są największe (występowanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego), najwyższa zaś dla płaszczyzny pionowej, przyjmując wartości pośrednie dla pośrednich kątów pochylenia przegrody.

Średnia temperatura promieniowania nieboskłonu T_r opisana jest równaniem:

$$R_a = \sigma T_r^4 \quad (5.1)$$

w którym R_a jest natężeniem promieniowania atmosfery (dla bezchmurnego, częściowo lub całkowicie zachmurzonego nieboskłonu). Natężenie promieniowania cieplnego atmosfery dla całego zakresu widma promieniowania może być również wyrażone równaniem (patrz także równanie (4.9)):

$$R_a = \varepsilon_a \sigma T_e^4 \quad (5.2)$$

w którym ε_a jest emisyjnością nieboskłonu (dla bezchmurnego, częściowo lub całkowicie zachmurzonego nieboskłonu), T_e natomiast jest temperaturą powietrza [K]. Oznacza to, że nieboskłon zachowuje się jak ciało szare o emisyjności ε_a i temperaturze T_e . Gęstości strumieni promieniowania długofalowego atmosfery opisane równaniami (5.1) i (5.2) są równoważne, dlatego zależność między emisyjnością nieboskłonu ε_a i temperaturą nieboskłonu T_r jest następująca:

$$T_r = \varepsilon_a^{0,25} T_e \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_a = \left(\frac{T_r}{T_e} \right)^4 \quad (5.4)$$

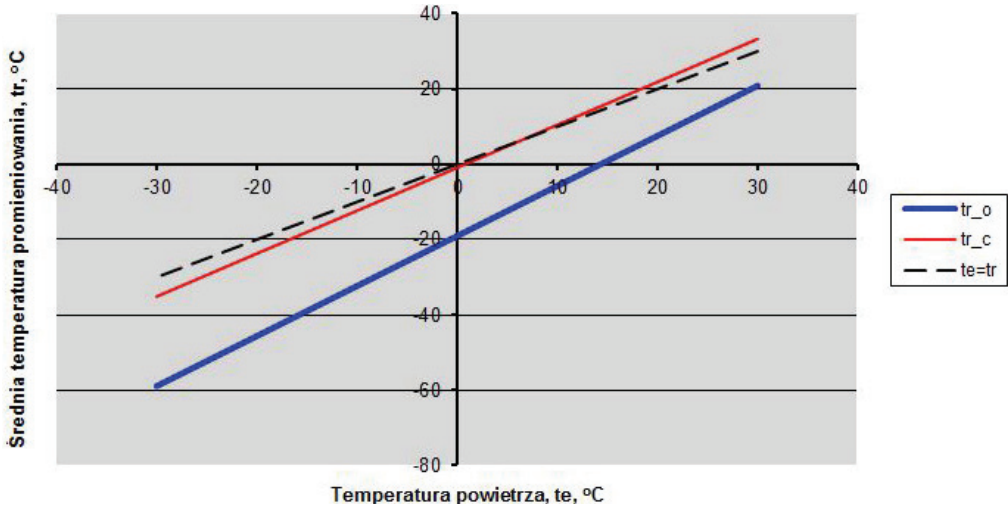
Koncepcja wprowadzenia temperatury promieniowania nieboskłonu w swych założeniach nie uwzględnia spektralnego charakteru promieniowania atmosfery, traktując atmosferę jak ciało (doskonałe) czarne. Z drugiej jednak strony, temperatura nieboskłonu jest wygodną i intuicyjną miarą natężenia promieniowania długofalowego atmosfery i może być z powodzeniem stosowana w analizie radiacyjnej wymiany ciepła dowolnej poziomej powierzchni (np. stropodachu) o stałym współczynniku emisyjności w całym zakresie widma promieniowania cieplnego. W przypadku przegród nachylonych pod różnymi kątami należy uwzględnić sumaryczne promieniowanie ciepłe atmosfery, gruntu i obiektów otaczających (rys. 5.5).

W analizie bilansu cieplnego radiatorów selektywnie emitujących promieniowanie ciepłe, np. przegród budowlanych z zewnętrznymi powierzchniami spektralnie selektywnymi, należy uwzględnić zależność zmiany wartości współczynnika emisyjności atmosfery w funkcji długości fali promieniowania ($\varepsilon_a(\lambda)$).

Średnią temperaturę promieniowania nieboskłonu t_r [$^{\circ}\text{C}$], w całym zakresie widma promieniowania cieplnego, dla płaszczyzny poziomej dla obszaru Polski można obliczać ze wzorów empirycznych opracowanych przez Nowaka [126], [129]:

a) dla warunków bezchmurnego nieba

$$t_r = -19,04 + 1,33t_e \quad (5.5)$$



Rys. 5.8. Wartości średniej kalorymetrycznej (tj. w całym zakresie promieniowania cieplnego) temperatury promieniowania nieboskłonu t_r dla płaszczyzny poziomej dla warunków bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieba [126], [129] (oznaczenia: t_{r-0} – średnia temperatura bezchmurnego nieboskłonu, t_{r-c} – średnia temperatura promieniowania nieboskłonu całkowicie zachmurzonego, t_e – temperatura powietrza, [$^{\circ}\text{C}$])

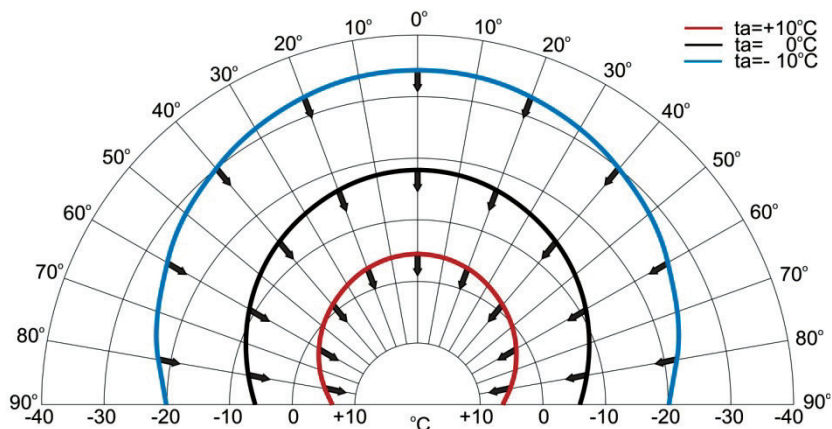
b) dla nieba całkowicie zachmurzonego

$$t_r = -0,92 + 1,14t_e \quad (5.6)$$

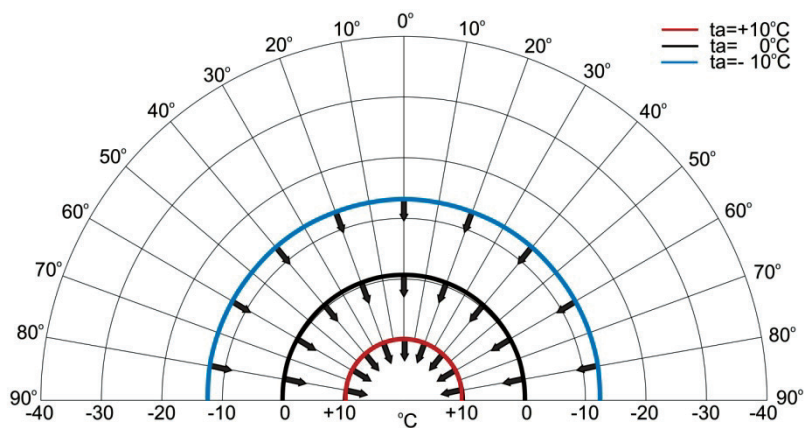
gdzie t_e jest temperaturą powietrza, [°C].

Graficzną ilustrację wzorów (5.5) i (5.6) przedstawiono na rysunku 5.8, z którego wynika, że średnia temperatura promieniowania nieboskłonu jest niższa od temperatu-

a)



b)



Rys. 5.9. Wartości średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla różnej temperatury powietrza, w funkcji kąta pochylenia przegrody budowlanej, w warunkach: a) całkowicie bezchmurnego nieboskłonu, b) całkowicie zachmurzonego nieboskłonu. Wyniki ściśle korespondują z danymi na rys. 5.6 i 5.7 (0° – płaszczyzna pozioma, 90° – płaszczyzna pionowa). Obliczenia wykonano na podstawie modelu obliczeniowego (Nowak [126], [129])

ry powietrza o ok. 20 °C w temperaturze powietrza 0 °C, o około 22 °C niższa w temperaturze powietrza –10 °C i o około 25 °C niższa w temperaturze powietrza –20 °C.

Model oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek oraz sposób obliczania wartości średniej temperatury promieniowania nieboskłonu i gruntu dla różnych kątów pochylenia przegród budowlanych (w zakresie od 0° do 90°), na podstawie badań radiometrycznych przeprowadzonych w Polsce przedstawił Nowak w pracach [126] i [129]. Przykładowe wyniki obliczeń pokazano na rysunku 5.9, na którym przedstawiono zmienność średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego w funkcji temperatury powietrza i kąta pochylenia przegrody budowlanej w zakresie od 0° do 90°, dla warunków bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieboskłonu. Wartości tej temperatury ściśle korespondują z wartościami cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego pokazanymi na rysunkach 5.6 i 5.7.

Badania potwierdziły, że dla warunków całkowitego zachmurzenia nieba średnia temperatura promieniowania nieboskłonu praktycznie jest równa temperaturze powietrza zewnętrznego (rys. 5.9b).

W warunkach bezchmurnego nieba w zimie (i również w lecie na obszarach pustynnych) temperatura promieniowania nieboskłonu może być niższa od temperatury powietrza o około 20–25 °C [17], [44], [113]. Z danych przedstawionych na rysunku 5.9a wynika, że w temperaturze powietrza 0 °C, dla warunków bezchmurnego nieba, średnia temperatura promieniowania dla stropodachu wynosi ok. –20 °C, natomiast dla ścian ok. –8 °C. W takich warunkach pogodowych, radiacyjne straty ciepła z zewnętrznej powierzchni stropodachu są największe i nieco mniejsze ze ścian zewnętrznych – w konsekwencji temperatura zewnętrznych powierzchni tych przegród może obniżyć się w stosunku do temperatury powietrza o kilka stopni Celsjusza, co może mieć wpływ na wyniki termowizyjnych badań budynków i na interpretację termogramów wykonanych w nocy przy bezchmurnym nieboskłonie.

5.3.2. Spektralna temperatura promieniowania nieboskłonu

Spektralna temperatura promieniowania nieboskłonu jest miarą jego właściwości radiacyjnych w wąskim zakresie długości fal, np. w zakresie okna atmosferycznego i może być mierzona kamerą termowizyjną, o zakresie pomiarowym np. 7,5–13 μm, ustawioną pionowo do góry. Jest to zatem wartość temperatury promieniowania nieboskłonu mierzonej w zakresie pomiarowym kamery termowizyjnej, a nie w całym zakresie widma promieniowania cieplnego oddziałującego na budynki (tj. w zakresie 3,0–50,0 μm). Analiza niektórych zagadnień z zakresu radiacyjnej wymiany ciepła przegród budowlanych z otoczeniem wymaga zastosowania zamiast „kalorymetrycznej temperatury nieboskłonu” T_r , obowiązującej dla całego zakresu promieniowania cieplnego, tak zwanej „spektralnej temperatury nieboskłonu” T_r^* , obowiązującej dla

wybranego zakresu długości fal promieniowania, od λ_1 do λ_2 (np. może to być zakres pomiarowy kamer termowizyjnych do zastosowań w budownictwie, tj. zakres 7,5–13 μm). Spektralna temperatura nieboskłonu T_r^* jest definiowana jako temperatura hipotetycznego ciała doskonale czarnego, które promieniowałoby w kierunku płaszczyzny poziomej taką samą ilość energii, jaka w warunkach rzeczywistych dociera do rozważanej płaszczyzny, w zakresie długości fal promieniowania od λ_1 do λ_2 , co można zapisać:

$$R_{\lambda_1-\lambda_2} = C(T_r^*)^n \quad (5.7)$$

gdzie $R_{\lambda_1-\lambda_2}$ – natężenie promieniowania cieplnego atmosfery w zakresie długości fal od λ_1 do λ_2 , [W/m^2], C – współczynnik proporcjonalności. Wartość wykładnika potęgę n zależy od rozpatrywanego zakresu promieniowania. Z definicji wynika, że spektralna temperatura nieboskłonu T_r^* jest znacznie niższa od kalorymetrycznej temperatury nieboskłonu T_r (tabela 5.1).

Praktycznym przykładem zastosowania spektralnej temperatury nieboskłonu T_r^* może być interpretacja termogramów uzyskanych kamerą termowizyjną, pracującą w zakresie długości fal od $\lambda_1 = 7,5 \mu\text{m}$ do $\lambda_2 = 13 \mu\text{m}$ (zakres „okna atmosferycznego”), podczas pomiaru rozkładu temperatury na zewnętrznych powierzchniach stropodachów o niewielkim kącie pochylenia. Promieniowanie cieplne zewnętrznej powierzchni prawie poziomego stropodachu ($B_{\lambda_1-\lambda_2}$) jest sumą emitowanego promieniowania własnego oraz promieniowania cieplnego atmosfery odbitego od powierzchni stropodachu, co przedstawia równanie [44]:

$$B_{\lambda_1-\lambda_2} = \varepsilon C \Theta_s^n + \rho_r c (T_r^*)^n \quad (5.8)$$

gdzie: ρ_r – współczynnik refleksyjności,

ε – współczynnik emisyjności,

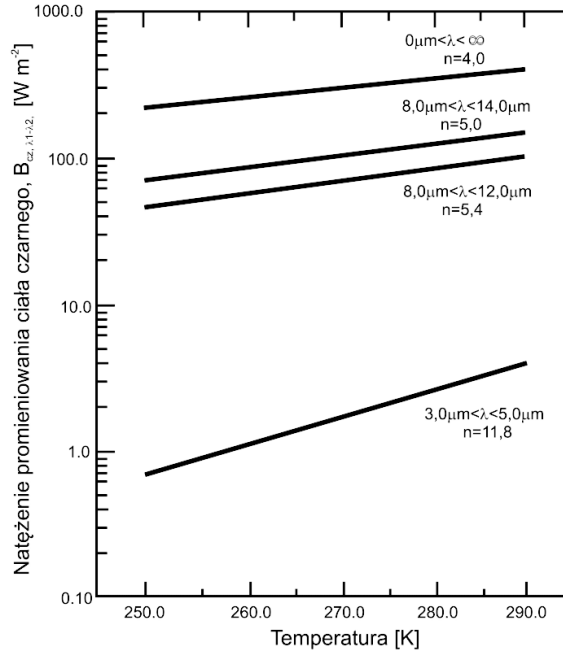
Θ_s – temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu.

W analizie tego zagadnienia należy dodatkowo wprowadzić pojęcie tzw. pozornej temperatury promieniowania $T_{s,\text{app}}$ rozpatrywanej powierzchni. Definiuje się ją jako temperaturę hipotetycznego ciała doskonale czarnego, w której ilość energii cieplnej wypromieniowanej przez to ciało jest równe sumie energii wypromieniowanej przez analizowaną powierzchnię oraz odbitego od tej powierzchni promieniowania cieplnego atmosfery. Można wykazać, że temperaturę tę oblicza się ze wzoru [44]:

$$T_{s,\text{app}}^n = \varepsilon \Theta_s^n + (1 - \varepsilon) (T_r^*)^n \quad (5.9)$$

w którym: T_r^* – spektralna temperatura nieboskłonu,

Θ_s – temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu.



Rys. 5.10. Natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego dla różnych zakresów długości fal promieniowania [44]

Występujący w równaniach (5.7)–(5.9) wykładnik potęgi n przyjmuje wartości [44]:

dla $0 < \lambda < \infty$ $n = 4$ (patrz również wzór (4.9))

$8 \mu\text{m} < \lambda < 14 \mu\text{m}$ $n = 5$

$8 \mu\text{m} < \lambda < 12 \mu\text{m}$ $n = 5,4$

$3 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$ $n = 11,2$.

Na rysunku 5.10 przedstawiono zmienność wartości natężenia promieniowania ciała (doskonale) czarnego w funkcji temperatury dla różnych zakresów długości fal promieniowania.

Pozorna temperatura promieniowania rozpatrywanej powierzchni w zakresie pomiarowym kamery termowizyjnej (7,5–13 μm) wyniesie wówczas:

$$T_{s, \text{app}} = \Theta_s [\varepsilon + (1 - \varepsilon) \beta^5]^{1/5} \quad (5.10)$$

gdzie współczynnik $\beta = (T_r^* / \Theta_s)$. Można zauważyć, gdyby spektralna temperatura niebosłonu była ekstremalnie niska, co mogłoby nastąpić jedynie w przypadku całkowicie przepuszczalnej atmosfery (idealne okno atmosferyczne), współczynnik β osiągnąłby wartość zero i wówczas:

$$T_{s, \text{app}} = \Theta_s [\varepsilon]^{1/5} \quad (5.11)$$

Tabela 5.1. Przykładowe wartości spektralnej i kalorymetrycznej (średniej) temperatury promieniowania nieboskłonu w USA [22]

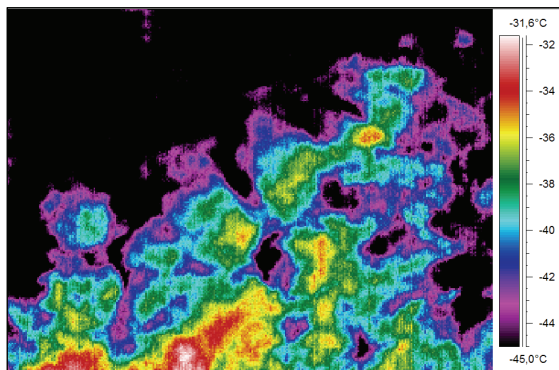
Temperatura powietrza	Temperatura promieniowania nieboskłonu	
	kalorymetryczna (T_r)	spektralna (T_r^*)
°C	°C	°C
-18,0	-48,0	-85,0
-12,0	-40,0	-74,0
-6,7	-33,0	-64,0
1,1	-25,0	-54,0
4,4	-18,0	-47,0

Z równania (5.9) wynika, że wyznaczenie pozornej temperatury promieniowania zewnętrznej powierzchni przegrody wymaga uwzględnienia spektralnej temperatury nieboskłonu. Spektralna temperatura nieboskłonu jest zawsze znacznie niższa niż kalorymetryczna temperatura nieba, ponieważ atmosfera w zakresie długości fal „okna atmosferycznego” jest niemal całkowicie przepuszczalna dla promieniowania cieplnego. Porównanie przykładowych wartości obu temperatur przedstawiono w tabeli 5.1.

Dane zawarte w tabeli 5.1 (pomiarzy w USA) nieco różnią się od tych przedstawionych na rysunku 5.9 (pomiarzy w Polsce [126]) – wartości średniej kalorymetrycznej temperatury promieniowania nieboskłonu, w danej temperaturze powietrza, w USA są niższe o około 3–4 °C, co może wynikać z różnicy w czystości atmosfery w miejscach pomiarów w obu krajach.

W dalszej części rozważań będzie wykorzystywana jedynie „kalorymetryczna temperatura nieboskłonu” (dla całego zakresu widma promieniowania cieplnego), zwana dalej „temperaturą nieboskłonu” lub „temperaturą nieba”.

Praktyczny wniosek wynikający z przedstawionych rozważań oraz z danych zawartych w tabeli 5.1 jest następujący: kamerą termowizyjną o zakresie pomiarowym 7,5–13 μm , skierowaną pionowo w bezchmurny nieboskłon, mierzymy tzw. „spektralną temperaturę nieboskłonu”, która jest znacznie niższa od tzw. „kalorymetrycznej temperatury nieboskłonu” lub krótko „temperatury nieboskłonu”, zdefiniowanej dla całego zakresu promieniowania długofalowego. W analizie bilansu cieplnego przegród budowlanych z uwzględnieniem rzeczywistego radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego w zakresie długofalowym należy oczywiście uwzględnić „kalorymetryczną temperaturę nieboskłonu”, która dla warunków bezchmurnego nieba dla płaszczyzny poziomej (stropodachy, grunt) może być niższa o około 20–25 °C od temperatury otaczającego powietrza, a dla płaszczyzny pionowej (ściana) o około 8–10 °C (rys. 5.9). Gdy niebo jest całkowicie zachmurzone, temperatura nieboskłonu, od zenitu do horyzontu, jest praktycznie równa temperaturze powietrza (rys. 5.9), natomiast dla warunków nieba częściowo zachmurzonego temperatura nieboskłonu przyjmuje wartości pośrednie.



Rys. 5.11. Termogram nieboskłonu częściowo zachmurzonego, wykonany w temperaturze powietrza -5°C . Spektralna temperatura promieniowania nieboskłonu (w zakresie pomiarowym kamery termowizyjnej $7,5\text{--}13,0\mu\text{m}$) widoczna jest na termogramie ($-31,8^{\circ}\text{C}$ – $-45,0^{\circ}\text{C}$), natomiast średnia (kalorymetryczna) temperatura promieniowania nieboskłonu wynosi około -16°C (w całym zakresie widma promieniowania ciepłego $3,0\text{--}50,0\mu\text{m}$)

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę, że w krajowej literaturze tematu zdarzają się przypadki błędnej interpretacji wyników pomiarów ogólnie nazwanej tzw. temperatury nieboskłonu. Nawet doświadczeni operatorzy kamer termowizyjnych często podają przykłady termogramów z badań temperatury nieboskłonu, komentując, że wynosi ona w granicach od ok. -40°C do ok. -80°C . Należy jeszcze raz zwrócić uwagę, że jest to „spektralna temperatura promieniowania nieboskłonu”, mierzona w zakresie pomiarowym kamery termowizyjnej ($7,5\text{--}13\mu\text{m}$). Tak zwana „średnia temperatura promieniowania nieboskłonu” dla całego zakresu widma promieniowania ciepłego ($3,0\text{--}50,0\mu\text{m}$), a więc dla całego zakresu radiacyjnego oddziaływania na budynki, w warunkach bezchmurnego nieba, dla płaszczyzny poziomej może być niższa od temperatury powietrza o około $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.8 i 5.9).

5.4. Bilans promieniowania ciepłego zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej

W szczegółowej analizie bilansu ciepłego oraz bilansu promieniowania zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej bardzo istotne jest wyznaczanie wartości natężenia długofalowego promieniowania różnicowego między powierzchniami przegród budowlanych dla różnej konfiguracji budynków i otaczającym je środowiskiem zewnętrznym. Wieloletnie doświadczenia różnych jednostek naukowo-badawczych w formułowaniu klasycznych zagadnień z zakresu modelowania obciążenia ogrzewania bądź chłodzenia budynków pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że różnicowe promieniowanie ciepłe między obudową budynków a ich najbliższym otoczeniem

może znacząco wpływać na wielkość strat i zysków ciepła, zwłaszcza przez stropodachy i dachy oraz w mniejszym stopniu przez ściany. W konsekwencji składowa długofalowego promieniowania różnicowego może stanowić znaczny udział w całkowitym bilansie cieplnym zewnętrznej powierzchni przegród. Powierzchnie zewnętrzne poziomych przegród budowlanych (stropodachów), nieosłoniętych innymi wyższymi budynkami lub obiektami naturalnymi, mogącami zakłócić radiacyjną wymianę ciepła z otoczeniem, wymieniają ciepło przez promieniowanie jedynie z nieboskłonem. Przegrody nachylone natomiast (np. połacie dachowe) oraz ściany budynków wymieniają ciepło przez promieniowanie z nieboskłonem, gruntem oraz z najbliższym otoczeniem budynku (rys. 5.5).

Różnicowe promieniowanie cieplne (R_{net}) rozpatrywanej poziomej powierzchni stropodachu (lub gruntu) jest różnicą między promieniowaniem cieplnym emitowanym przez tę powierzchnię i docierającym do niej zwrotnym promieniowaniem długofalowym atmosfery, które jest częściowo pochłaniane, a częściowo odbite od tej powierzchni:

$$R_{\text{net}} = (\varepsilon_s \sigma \Theta_e^4 + (1 - \varepsilon_s) R_a) - \varepsilon_s R_a \quad (5.12)$$

gdzie: ε_s – emisyjność powierzchni przegrody budowlanej,

R_a – natężenie promieniowania cieplnego atmosfery (dla nieba bezchmurnego, częściowo lub całkowicie zachmurzonego),

Θ_e – temperatura (K) zewnętrznej powierzchni przegrody.

Ze względu na to, że drugi wyraz w nawiasie równania (5.12), tzn. promieniowanie odbite, dla większości typowych powierzchni materiałów budowlanych stanowi wartość pomijalnie małą, równanie (5.12) można zapisać w postaci:

$$R_{\text{net}} = \varepsilon_s (\sigma \Theta_e^4 - R_a) \quad (5.13)$$

Dla poziomego stropodachu o nieselektywnych właściwościach radiacyjnych powierzchni zewnętrznej różnicowe straty ciepła przez promieniowanie długofalowe można również zapisać:

$$R_{\text{net}} = \varepsilon_s \sigma (\Theta_e^4 - T_r^4) \quad (5.14)$$

gdzie T_r – średnia temperatura promieniowania nieboskłonu, [K].

Długofalowe promieniowanie różnicowe R_{net} rozpatrywanej powierzchni przegrody budowlanej jest miarą chłodzenia radiacyjnego tej powierzchni (tzw. moc chłodzenia radiacyjnego). Równoważnym do równania (5.14) jest wyrażenie:

$$R_{\text{net}} = h_r (\Theta_e - T_r) \quad (5.15)$$

w którym h_r – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie, wyrażony w $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$.

Współczynnik h_r można zatem obliczyć ze wzoru:

$$h_r = \varepsilon_s \sigma \frac{(\Theta_e^4 - T_r^4)}{(\Theta_e - T_r)} \quad (5.16)$$

który może być również przedstawiony w postaci:

$$h_r = \varepsilon_s \sigma (\Theta_e^2 + T_r^2)(\Theta_e + T_r) \quad (5.17)$$

Niekiedy zamiast wzoru (5.17) stosowane jest również wyrażenie:

$$h_r = 4\varepsilon_s \sigma T_m^3 \quad (5.18)$$

w którym T_m – średnia arytmetyczna z temperatury Θ_e i T_r , [K].

Na podstawie przeprowadzonych badań radiometrycznych wykazano, że różnicowe straty ciepła przez promieniowanie dla gruntu w zimie, w warunkach bezchmurnego nieba w nocy, mogą wynosić od 75 do 125 W/m², ze średnią wartością 100 W/m² [144]. Dla poziomego lub o niewielkim pochyleniu stropodachu, z typową powierzchnią zewnętrzną, straty te mogą wynosić do około 70 W/m² [42], [44] i [126].

Różnicowe straty ciepła przez promieniowanie długofalowe rozważanej powierzchni przegrody budowlanej maleją wraz ze wzrostem stopnia zachmurzenia nieba i wilgotności względnej otaczającego powietrza. I właśnie dlatego zaleca się, aby termowizyjne badania budynków wykonywać w nocy przy zachmurzonym nieboskłonie, dzięki czemu unika się problemów związanych z chłodzeniem radiacyjnym przegród i jego wpływem na rozkład temperatury badanych powierzchni przegród oraz problemów związanych z interpretacją termogramów.

Analizując zjawisko chłodzenia radiacyjnego, należy pamiętać, że radiacyjne straty ciepła zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej zależą nie tylko od wielkości długofalowego promieniowania różnicowego między promieniowaniem własnym a docierającym promieniowaniem cieplnym atmosfery i najbliższego otoczenia budynku (promieniowanie netto), ale również od konwekcyjnej wymiany ciepła danej powierzchni z otaczającym powietrzem i od przewodzenia ciepła przez przegrodę.

Konwekcyjna wymiana ciepła może osłabiać bądź wzmacniać efekt chłodzenia radiacyjnego. Gdy temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej jest wyższa od temperatury powietrza, występująca konwekcyjna wymiana ciepła wspomaga wychładzanie powierzchni – konwekcja powoduje straty ciepła do otoczenia. Gdy natomiast temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody osiągnie wartość niższą od temperatury otaczającego powietrza, konwekcyjna wymiana ciepła stanowi zyski ciepła dla przegrody i przeciwdziała chłodzeniu radiacyjnemu. Radiacyjna wymiana ciepła zewnętrznej powierzchni przegrody z otoczeniem zależy zatem nie tylko od czynników bezpośrednio determinujących tę wymianę, tzn. od temperatury powie-

trza, od temperatury powierzchni przegrody, od stopnia zachmurzenia nieba i zawartości wilgoci w powietrzu, ale również od współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję, który jest funkcją głównie prędkości wiatru i chropowatości powierzchni. Im mniejsza jest prędkość wiatru w trakcie występowania zjawiska chłodzenia radiacyjnego, tym większa pozostaje różnica między temperaturą powierzchni przegrody a temperaturą powietrza. Na te procesy nakłada się oczywiście równoczesne przewodzenie ciepła przez przegrodę, które zależy między innymi od jej właściwości izolacyjnych.

W trakcie występowania zjawiska chłodzenia radiacyjnego dla ustabilizowanych warunków wymiany ciepła (stała mała prędkość wiatru lub brak wiatru, bezchmurne niebo) radiacyjne straty ciepła przegrody są równoważone zyskami ciepła przez konwekcję. Przegroda osiąga wówczas najniższą temperaturę, jaką można uzyskać w danych warunkach wymiany ciepła. Można wykazać, że ustabilizowaną temperaturę zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej oblicza się ze wzoru [126]:

$$v_e = t_e - \frac{R_{\text{net}}}{h_{ce}} \quad (5.19)$$

gdzie: v_e – ustabilizowana temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody, [°C],

t_e – temperatura powietrza, [°C],

R_{net} – długofalowe promieniowanie różnicowe, [W/m²],

h_{ce} – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na zewnętrznej powierzchni przegrody, [W/(m²·K)],

Drugi wyraz prawej strony równania (5.19) określa temperaturę, o jaką obniży się temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody w stosunku do temperatury otaczającego powietrza. Do wykonania obliczeń niezbędne są dane dotyczące temperatury powietrza, punktu rosy, stopnia zachmurzenia nieba i prędkości wiatru. Miarą chłodzenia radiacyjnego rozważanej powierzchni przegrody jest natężenie długofalowego promieniowania różnicowego R_{net} tej powierzchni.

5.5. Poprawka temperaturowa do obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego

W dotychczasowych klasycznych obliczeniach cieplnych z zakresu fizyki budowli (np. obliczanie strat ciepła przez przegrody budowlane, wyznaczanie rozkładu temperatury w przegrodzie itp.) wpływ cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego uwzględnia się w sposób, który nie odzwierciedla rzeczywistych zmian elementów tego środowiska i ich oddziaływania na przegrody budowlane. Dla okresu zimowego, w modelu ustalonej wymiany ciepła, zakłada się równość temperatury powietrza t_e i średniej temperatury promieniowania nieboskłonu t_r , ($t_e = t_r$). Jak wykazano wcześ-

niej, temperatura nieboskłonu może być dla powierzchni poziomej (np. dla stropodachu), przy bezchmurnym niebie w nocy, niższa od temperatury powietrza nawet o około 20–25 °C. Tak znaczne różnice między temperaturą t_e i t_r powoduje często występowanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego, tj. obniżenie się temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu o kilka stopni w stosunku do temperatury otaczającego powietrza, co jest ściśle związane ze znacznymi stratami ciepła przez promieniowanie. Stąd wartość gęstości strumienia ciepła przepływającego (traconego) przez stropodach, obliczana przy założeniu równości temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania nieboskłonu, może się znacznie różnić od wartości rzeczywistej. Interesująca wydaje się więc odpowiedź na pytanie, jaką wartość powinna mieć obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego (dla okresu zimowego), aby przyjęty model ustalonego, jednokierunkowego przepływu ciepła uwzględnił rzeczywiste radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane, w zakresie promieniowania cieplnego. Analizę tego problemu przedstawiono poniżej.

W obliczeniach z zakresu bilansowania cieplnego przegród budowlanych i budynków często stosuje się tzw. skorygowaną słoneczną temperaturę powietrza t_{ec} definowaną następująco [7], [51]:

$$t_{ec} = t_e + \frac{a_s I_s}{h_e} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_e} \quad (5.20)$$

gdzie: t_e – temperatura powietrza zewnętrznego, [°C],

a_s – współczynnik absorpcji promieniowania słonecznego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody,

I_s – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego, [W/m²],

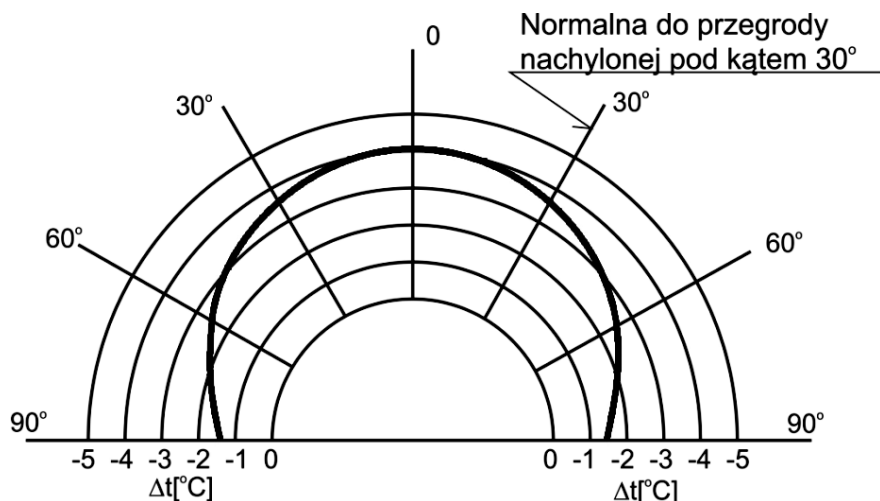
ε – współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni przegrody,

ΔR – różnica między promieniowaniem długofalowym środowiska zewnętrznego, docierającym do danej płaszczyzny, i promieniowaniem ciała czarnego o temperaturze otaczającego powietrza, [W/m²],

h_e – współczynnik przejmowania ciepła przez powierzchnię zewnętrzną, [W/(m²·K)].

Z postaci równania (5.20) wynika, że skorygowana temperatura powietrza t_{ec} dla różnych przegród budowlanych, w tych samych warunkach meteorologicznych, w tym samym czasie może być różna ze względu na różne właściwości radiacyjne powierzchni zewnętrznych, na różny kąt pochylenia bądź inne zorientowanie względem stron świata.

Wyrażenie $\varepsilon \Delta R$ jest równoważne różnicowemu promieniowaniu długofalowemu R_{net} przegrody budowlanej. Dla stropodachów w okresie zimowym i dla wszystkich przegród w nocy równanie (5.20) można zapisać [126]:



Rys. 5.12. Poprawki temperaturowe Δt w funkcji kąta pochylenia przegrody budowlanej; 0° – przegroda pozioma, 90° – przegroda pionowa (współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni przegrody $\varepsilon = 0,90$), wyznaczone na podstawie badań [126]

$$t_{ec} = t_e - \frac{R_{net}}{h_e} = t_e + \Delta t \quad (5.21)$$

gdzie Δt – poprawka temperaturowa, [°C].

Przykładowe poprawki Δt dla przegród o różnym kącie pochylenia przedstawiono na rysunku 5.12.

Różnicowe radiacyjne straty ciepła zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej R_{net} , obliczane ze wzorów (5.14) i (5.15), dla warunków bezchmurnego nieba są skierowane na zewnątrz i mają wartość ujemną. Stąd poprawka temperaturowa Δt , uwzględniająca rzeczywiste oddziaływanie długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane, jest ujemna i obniża temperaturę powietrza zewnętrznego, przyjmowanego do obliczeń cieplnych. Średnią temperaturę promieniowania nieboskłonu, występującą w równaniach (5.14) i (5.15), oblicza się ze wzoru:

$$t_r = \left(\frac{R_a}{\sigma} \right)^{0,25} - 273,15 \quad (5.22)$$

w którym R_a – natężenie promieniowania długofalowego atmosfery, [W/m²].

Temperaturę zewnętrzną powierzchni przegrody budowlanej, z uwzględnieniem rzeczywistego radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania długofalowego, można obliczyć z zależności [116, 126]:

$$\nu_e = \frac{\frac{t_i}{R} + t_e h_c + t_r h_r}{h_c + h_r + \frac{1}{R}} \quad (5.23)$$

a gęstość strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę ze wzoru:

$$q = \frac{t_i - \nu_e}{R} \quad (5.24)$$

gdzie: ν_e , t_i , t_e , t_r – temperatura odpowiednio: zewnętrznej powierzchni przegrody, powietrza w pomieszczeniu, powietrza na zewnątrz oraz średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego – w przypadku stropodachów (czyli przegród prawie poziomych) jest to średnia temperatura promieniowania niebosłonu, [°C],

h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, [W/(m²·K)],

h_r – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie, [W/(m²·K)],

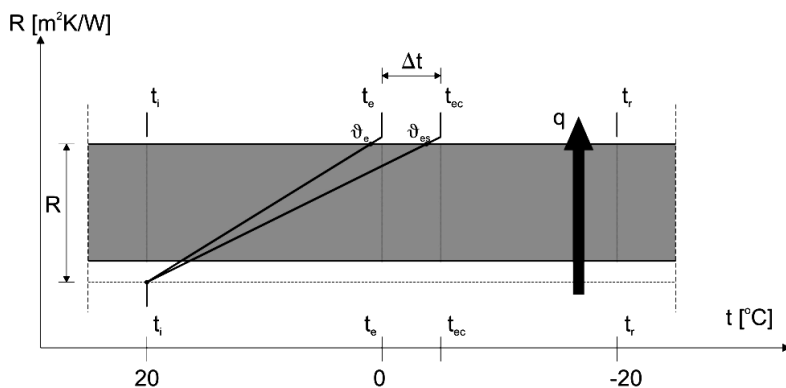
R – opór cieplny przegrody budowlanej (nie uwzględnia oporu przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej), [m²·K/W].

Oznaczenia wielkości występujących w równaniach od (5.20) do (5.24) pokazano również na rysunku 5.17.

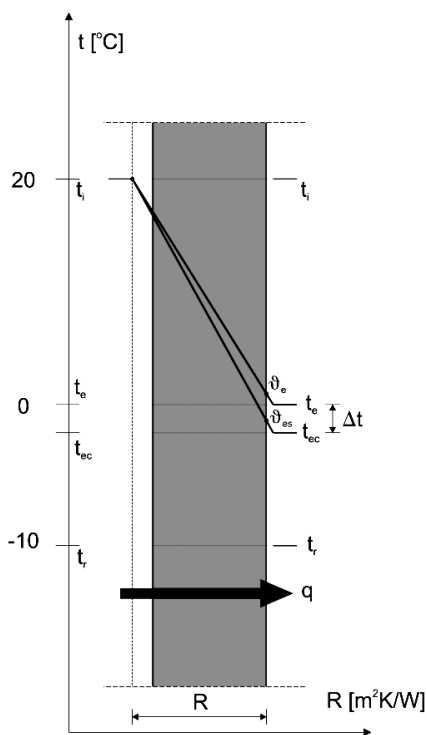
Podsumowując powyższe rozważania, można stwierdzić, że wykonywanie obliczeń strat ciepła przez przegrody budowlane, w ustalonym stanie przepływu, po założeniu równości temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego jest zbyt dużym uproszczeniem i może prowadzić do znaczących błędów w określaniu wielkości strat ciepła. W celu ograniczenia tych błędów zaleca się w obliczeniach metodą tradycyjną (stan ustalony przepływu) uwzględniać rzeczywiste cieplne promieniowanie środowiska zewnętrznego poprzez wprowadzenie poprawki temperaturowej Δt , obniżającej obliczeniową temperaturę powietrza zewnętrznego. Wartość tej poprawki będzie prawdopodobnie różna w różnych regionach kraju w zależności od stopnia zanieczyszczenia atmosfery oraz frekwencji dni pogodnych i pochmurnych na danym obszarze. Dobór poprawki temperaturowej Δt powinien być uzasadniony stosownymi pomiarami oraz analizą danych meteorologicznych dla danej lokalizacji.

Poprawka temperaturowa Δt zależy (wzory od (5.20) do (5.24)) od oporu cieplnego przegrody, kąta jej pochylenia, właściwości emisyjnych jej powierzchni zewnętrznej, od temperatury powietrza na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia, temperatury niebosłonu, prędkości wiatru, od stopnia zachmurzenia nieba oraz od frekwencji dni pogodnych i pochmurnych w czasie zimy dla danej lokalizacji. Ze względu na charakter zmian długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego oddziałującego

a)



b)



Rys. 5.13. Schemat wymiany ciepła i rozkład temperatury w przegrodzie jednowarstwowej w warunkach ustalonej wymiany ciepła, z uwzględnieniem rzeczywistego radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania cieplnego: a) rozkład temperatury w stropodachu pełnym, b) rozkład temperatury w ścianie zewnętrznej. Opór cieplny R przegrody nie uwzględnia oporu przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej. Poprawka temperaturowa Δt dla stropodachu wynosi $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, natomiast dla ścian $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (patrz rys. 5.12). Pozostałe oznaczenia jak we wzorach od (5.20) do (5.24)

na przegrody budowlane wartości poprawek Δt powinny być zróżnicowane dla stropodachów, dla przegród pochylonych (np. połacie dachowe) i dla ścian. Zaleca się skorygować obliczeniową wartość temperatury powietrza (wzór (5.21)) o poprawkę temperaturową Δt ; dla Wrocławia i okolic – do obliczeń można przyjąć $\Delta t = -4$ °C dla stropodachu oraz $\Delta t = -2$ °C dla ścian oraz wartości pośrednie dla przegród pochylonych (połacie dachowe).

Podane rozważania jednocześnie wskazują na istotny wpływ radiacyjnej wymiany ciepła przegród budowlanych na wyniki pomiarów termowizyjnych przy bezchmurnym lub częściowo zachmurzonym nieboskłonie w nocy. Aby uniknąć problemów związanych z interpretacją termogramów wykonanych w takich warunkach, mniej doświadczeni operatorzy kamer termowizyjnych powinni wykonywać badania, przynajmniej na początkowym etapie zdobywania doświadczenia pomiarowego, przy pełnym zachmurzeniu nieboskłonu.

6. Badania termowizyjne w budownictwie

6.1. Diagnostyka termiczna budynków

Termowizyjne badania budynków, coraz częściej wykonywane w naszym kraju, są jednym z najbardziej skutecznych narzędzi diagnostyki cieplnej budynków, obejmującej badania ich obudowy termicznej i instalacji wewnętrznych, lokalnych źródeł ciepła, zawilgocenia przegród oraz infiltracji powietrza przez nieszczelności przegród. Termiczna obudowa budynków składa się ze wszystkich przegród, przez które następują straty ciepła (ściany zewnętrzne, stropodachy, dachy, okna i drzwi balkonowe, podłogi na gruncie itp.). Bardzo rzadko wykonuje się diagnostykę termiczną budynków całorocznie chłodzonych (np. magazyny do przechowywania produktów spożywczych o temperaturze powietrza od 0° do $+5^{\circ}\text{C}$ czy też mroźnie składowe do przechowywania mięsa o temperaturze powietrza od -27 do -32°C). W tym wypadku badania termowizyjne należałoby przeprowadzić w okresie lata w celu identyfikacji mostków cieplnych, przez które następują nadmierne zyski ciepła do chłodzonych pomieszczeń.

Diagnostyki termicznej budynku nie należy utożsamiać jedynie z badaniami termowizyjnymi, jest to pojęcie znacznie szersze, a badania termowizyjne stanowią jej podstawowy element składowy. Diagnostyka termiczna budynków jest bardzo wyspecjalizowaną dziedziną badawczą opartą przede wszystkim na doświadczeniach wynikających z laboratoryjnych metod pomiarowych. Bardzo istotnym elementem w tej diagnostyce jest doświadczenie zespołu badawczego. Zakres badań i dobór metod pomiarowych zależy głównie od celu badań, złożoności badanego obiektu, doświadczenia zespołu badawczego, dostępności aparatury pomiarowej, od środków finansowych oraz od panujących warunków pogodowych. W diagnostyce cieplnej budynków o różnym przeznaczeniu ma zastosowanie duża liczba metod i technik pomiarowych. Większość niezbędnych pomiarów wiąże się z bezpośrednimi pomiarami wielkości fizycznych, opisujących główne składowe bilansu cieplnego budynków, w tym wiąże się z pomiarami:

- izolacyjności cieplnej przegród stanowiących obudowę termiczną budynku (pomiar lokalnego oporu cieplnego przegrody budowlanej za pomocą tzw. ścianki

pomocniczej, zwanej powszechnie ciepłomierzem, w konsekwencji pośrednio pomiar wartości współczynnika przenikania ciepła przegrody),

- szczelności obudowy budynku na przenikanie powietrza (np. metoda *blower door*),
- rzeczywistego strumienia powietrza wentylacyjnego, w poszczególnych pomieszczeniach i w budynku (skuteczność wentylacji grawitacyjnej i mechanicznej),
- eksploatacyjnej temperatury powietrza w pomieszczeniach,
- sprawności instalacji wewnętrznej i wymiennika ciepła (lub innych źródeł ciepła w budynku).

Ze względu na wymagania komfortu cieplnego ludzi i jakości powietrza w pomieszczeniach istotne znaczenie mają:

- eksploatacyjna temperatura odczuwalna (związana z radiacyjną i konwekcyjną wymianą ciepła użytkownika z otoczeniem),
- temperatura powierzchni wszystkich przegród w pomieszczeniach, jej wartość i zmienność w czasie,
- prędkość ruchu powietrza w pomieszczeniach oraz rzeczywisty strumień powietrza wentylacyjnego.

Przy pomiarach wymienionych wielkości fizycznych stosuje się różne metody diagnostyki pomiarowej, a w podejmowaniu decyzji o ewentualnym ich zastosowaniu należy mieć na uwadze często wysoki koszt niektórych badań. Badania diagnostyczne mogą również wiązać się z bezpośrednimi pomiarami wielkości fizycznych opisujących:

- elementy klimatu zewnętrznego, w tym pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza, kierunku i prędkości wiatru, ciśnienia pary wodnej oraz rzadziej natężenia promieniowania słonecznego (promieniowania całkowitego, bezpośredniego, rozproszonego i odbitego), padającego na różnie zorientowane płaszczyzny, intensywność opadów, zwłaszcza deszczu i zawilgocenia przegród,
- mikroklimat pomieszczeń (temperatura i wilgotność względna powietrza, prędkość ruchu powietrza, średnia temperatura promieniowania),
- właściwości cieplno-fizyczne przegród budowlanych, w tym między innymi pomiar gęstości strumienia ciepła (wyznaczanie oporu cieplnego i w konsekwencji współczynnika przenikania ciepła), badania laboratoryjne pobranych próbek (gęstość pozorna ρ , współczynnik przewodzenia ciepła λ) itp.,
- stopień i zasięg zawilgocenia przegród,
- infiltrację powietrza przez nieszczelności przegród.

Badania mikroklimatu pomieszczeń mogą być również uzupełnione badaniami innych wielkości, np. akustycznych właściwości pomieszczeń i przegród budowlanych, natężenia promieniowania światła dziennego na poziomie płaszczyzny roboczej, promieniowania radonu itp.

Ogólny podział metod pomiarowych przedstawia się następująco:

- Pomiary bezpośrednie – są najbardziej dokładne i jeżeli jest to możliwe, metoda pomiaru bezpośredniego powinna być preferowana w porównaniu z innymi metodami. Istotnym elementem jest uwzględnienie innych aspektów, nie tylko tech-

nicznych, np. bardzo pomocnym czynnikiem jest współpraca z właścicielem budynku, z lokatorami i z użytkownikami, z gospodarzem budynku (dysponującymi wiedzą na temat historii budynku, przeprowadzonych remontów lub modyfikacji instalacji c.o.) itp. Do metody pomiarów bezpośrednich zalicza się również metodę badań termowizyjnych.

- Obserwacje – metoda jest stosowana w badaniach socjologicznych nad zachowaniami mieszkańców. Wadą tej metody jest zwykle wysoki koszt, pracochłonność i czasochłonność.
- Ankietowanie – metoda polega przede wszystkim na wykonywaniu wywiadów, ankiet i prowadzeniu raportów:
 - wywiad – jest szybką i często skuteczną metodą zdobywania informacji, w tym drogą telefoniczną,
 - prowadzenie dziennika pomiarowego – dawniej dziennik prowadzony był przez użytkownika mieszkania lub budynku, obecnie tę rolę przejęły rejestratory wielopunktowe,
 - ankiety – umożliwiają uzyskiwanie jednorodnych informacji od znacznej grupy badanych; są głównym źródłem uzyskiwania informacji w badaniu komfortu cieplnego ludzi w pomieszczeniach.

W analizie cieplnego bilansu budynku, w ramach wykonywania audytu energetycznego bądź certyfikatu energetycznego dla budynku, bardzo pomocne są dane pomiarowe możliwe do uzyskania od inwestora, np. odczyty liczników energii cieplnej, zestawienie rocznych rachunków za ogrzewanie i energię elektryczną, tj. dane z ostatnich 3–5 lat.

Wymienione specjalistyczne (określone) badania termiczne budynków, o dosyć zróżnicowanym zakresie, obecnie rzadko są wykonywane pojedynczo, ale niektóre z nich są niezbędnym uzupełnieniem badań termowizyjnych.

Bardzo istotnym elementem w ocenie energetycznej budynku jest rzetelna identyfikacja jego cech fizycznych, niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń wskaźników energetycznych. Na podstawie wieloletniego doświadczenia ekspertyzowego Autor może jednoznacznie stwierdzić, że prawidłowa ocena izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, z pozoru prosta pod względem obliczeniowym, w rzeczywistości jest zadaniem dosyć trudnym i kłopotliwym. Często nie dysponujemy dokumentacją projektową budynku i wówczas należy przeprowadzić inwentaryzację wymiarową oraz inwentaryzację układu i grubości warstw poszczególnych przegród. Należy również zwrócić uwagę, że szczegółowa analiza i ocena wszystkich przegród, a w szczególności węzłów konstrukcyjnych, mostków termicznych i miejsc występowania nieciągłości izolacji cieplnej, jest w praktyce bardzo trudna lub wręcz niemożliwa.

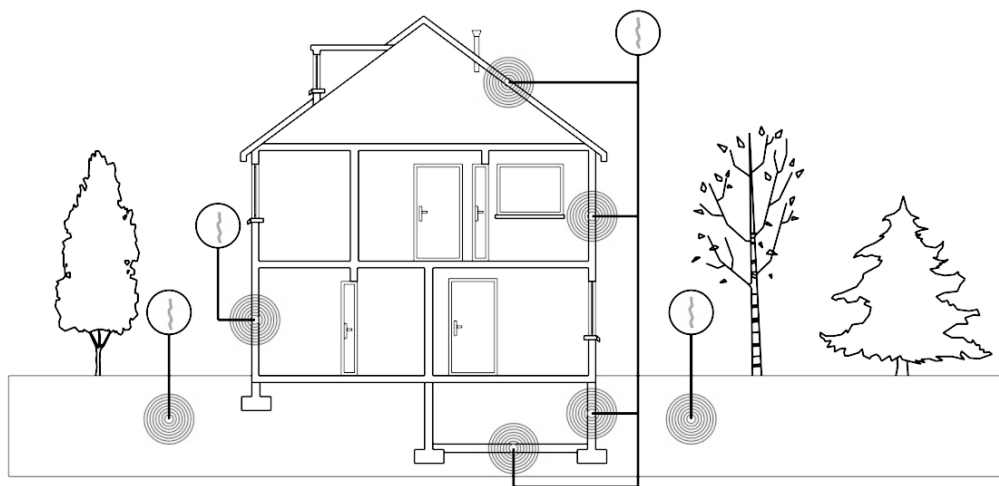
Nieco łatwiejsze zadanie występuje w przypadku, gdy jest dostępna i zgodna ze stanem faktycznym dokumentacja projektowa. Na podstawie danych zawartych w dokumentacji można oszacować wartości współczynników przenikania ciepła oraz zasięg mostków termicznych, pod warunkiem jednak dysponowania odpowiednim

oprogramowaniem komputerowym lub katalogami mostków termicznych. Bardzo pomocne w tym względzie są oczywiście pomiary budynków kamerą termowizyjną.

Budowę i układ warstw przegród budowlanych można często ustalić na podstawie znajomości okresu wzniesienia budynku, doświadczeń w realizacji ekspertyz dla tego typu budynków oraz na podstawie cech charakterystycznych dla budynków z danego okresu wznoszenia budynków i danej technologii (np. technologia wielkoblokowa, wielkopłytkowa, tradycyjna). Wymiary liniowe przegród natomiast najczęściej przyjmuje się z dokumentacji projektowej i wrywkowo sprawdza się na budynku istniejącym. W trakcie dokonywania diagnostyki cieplnej budynku często niezbędne jest ustosunkowanie się do aktualnego stanu technicznego budynku, tj. niezbędne jest ustosunkowanie się do stanu technicznego elementów konstrukcyjnych i wykończeniowych oraz do poszczególnych przegród. W tym przypadku bardzo przydaje się doświadczenie w wykonywaniu ekspertyz budowlanych w zakresie oceny stanu technicznego, oceny konstrukcyjnej i mykologiczno-budowlanej budynków.

Na rysunku 6.1 przedstawiono przykładową lokalizację punktów pomiarowych w czasie badania budynków w zakresie ochrony cieplnej [95], przy czym należy nadmienić, że badania rozkładu temperatury w gruncie wokół budynku wykonuje się praktycznie jedynie w badaniach naukowych.

W ostatnich latach, w diagnostyce termicznej budynków w Polsce, badania termowizyjne zdecydowanie dominują nad innymi badaniami i są to głównie badania służące do oceny jakościowej przegród budowlanych pod względem cieplnym. Gdy celem badań termowizyjnych jest ilościowa ocena cieplnych właściwości przegrody budowlanej, np. wyznaczenie wartości współczynnika przenikania ciepła przegrody poprzez



Rys. 6.1. Przykładowa lokalizacja punktów pomiarowych w trakcie cieplnych badań budynku (na podstawie [95])



Rys. 6.2. Podstawowy sprzęt operatora kamery termowizyjnej: 1) kamera termowizyjna, 2) aparat fotograficzny, 3) dalmierz laserowy, 4) rejestrator z sondami do pomiaru temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz temperatury powierzchni przegród (termopary), 5) anemometr z rejestratorem do pomiaru prędkości wiatru, 6) pirometr, 7) zapasowe akumulatory do kamery, 8) statyw, 9) czarna matowa taśma samoprzylepna

pomiar jej oporu cieplnego, stosujemy dodatkowo mierniki płytowe, popularnie zwane ciepłomierzami, oraz termopary. Zagadnienie to omówiono w rozdziale 6.3.6.

W termowizyjnych badaniach budynków podstawowym narzędziem pomiarowym jest oczywiście kamera termowizyjna. Ale oprócz kamery operator kamery powinien być wyposażony w inną niezbędną aparaturę badawczą, pokazaną na rysunku 6.2 – są to: aparat fotograficzny, dalmierz laserowy, anemometr z rejestratorem do pomiaru prędkości wiatru, rejestrator wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza, termopary z rejestratorem, pirometr oraz czarna matowa taśma samoprzylepna. Dodatkowe akcesoria służą do pomiaru i rejestracji niezbędnych wielkości pomocniczych niezbędnych do kontroli pomiarów i interpretacji termogramów.

Badania termowizyjne budynków najczęściej stanowią pojedyncze zadanie badawcze, bez konieczności wykonywania wszystkich wymienionych w tym rozdziale pomiarów. Niemniej jednak w trakcie pomiarów termowizyjnych należy dodatkowo mierzyć inne niezbędne wielkości meteorologiczne (temperaturę i wilgotność względną powietrza oraz prędkość wiatru) oraz parametry mikroklimatu badanych pomieszczeń (patrz rozdz. 6.3.5).

6.2. Badania termowizyjne a badania nieniszczące

6.2.1. Wstęp

Badania termowizyjne należą do grupy badań nieniszczących (ang. *nondestructive testing* – NDT lub *thermographic nondestructive testing* – TNDT). Badania nieniszczące mają na celu wykrycie wad materiału lub ewentualnie określenie właściwości elementu lub konstrukcji bez wprowadzania trwałych zmian w ich cechy materiałowe i bez ich zniszczenia [57]. Uogólniając, badania nieniszczące opierają się na związku zachodzącym między stanem badanego obiektu i właściwościami fizycznymi badanego materiału, w tym właściwościami cieplnymi. Poza metodą termiczną, bazującą na technice termometrii i termografii, do badań nieniszczących należą również: metody radiologiczne (wykorzystujące promieniowanie X , γ i β), metody akustyczne (w tym metoda emisji akustycznej), metody magnetyczne, elektryczne, elektromagnetyczne, mikrofalowe, optyczne oraz metody penetracyjne. Każda z tych metod charakteryzuje się określonymi warunkami zastosowania i ograniczeniami, a niekiedy na jednym obiekcie stosuje się kilka metod badawczych.

Wymienione metody badań nieniszczących dzielą się, między innymi, na aktywne i pasywne (bierne). Metody aktywne są to metody, w których badany obiekt jest poddawany kontrolowanemu działaniu czynnika zewnętrznego, a w odpowiedzi na to działanie zawarta jest informacja o nieciągłości lub o defekcie materiału (metody ultradźwiękowe, penetracyjne, radiologiczne oraz tzw. termografia aktywna). W metodach pasywnych badany obiekt jest obciążony zgodnie z zaprojektowaną funkcją użytkową i dodatkowo pozostaje jedynie pod działaniem otoczenia (metoda emisji akustycznej, niektóre metody magnetyczne, kontrola wizualna i optyczna oraz tzw. termografia pasywna).

Badania termowizyjne obejmują nieniszczącą ocenę i kontrolę badanego obiektu. Jest to metoda badań nieniszcząca, niekontaktowa i nieinwazyjna, mająca na celu przewidywanie lub rozpoznawanie termicznych uszkodzeń badanego elementu na podstawie rozkładu temperatury na jego powierzchni. Tą metodą można również identyfikować zawilgocenia przegród, infiltrację powietrza przez nieszczelności przegród oraz awarie instalacji wodnej lub grzewczej. W termowizyjnym procesie badawczym budynków i innych obiektów budowlanych można wyróżnić kilka głównych grup zagadnień, a mianowicie:

- zapoznanie się z obiektem badań (wizja lokalna, zapoznanie się z dokumentacją techniczną, z warunkami terenowymi, z historią obiektu),
- przyjęcie metody pomiarowej (termografia pasywna lub aktywna),
- wykonanie pomiarów (przed pomiarami określenie emisyjności powierzchni materiałów) przy odpowiednich warunkach pogodowych,
- komputerowa obróbka obrazów termalnych,

- jakościowa i/lub ilościowa ocena badanego obiektu (w tym interpretacja termogramów),
- opracowanie raportu z badań.

W budownictwie najczęściej jest stosowana metoda pasywna termografii podczerwonej, którą wykorzystuje się głównie do identyfikacji wad i nieciągłości izolacji cieplnej w termicznej obudowie budynków, przy czym w zdecydowanej większości przypadków jest to ocena jakościowa, a nie ilościowa. W praktyce oznacza to, że metoda termografii pasywnej sprowadza się do oceny termicznej obudowy budynków (zwłaszcza ścian zewnętrznych, okien i połączeń dachowych) pod kątem stanu izolacyjności cieplnej przegród i wskazaniu miejsc występowania mostków termicznych, to jest do wskazania miejsc zwiększonych strat ciepła w stosunku do pozostałej części przegrody. Na podstawie tak przeprowadzanych i najczęściej stosowanych termowizyjnych badań jakościowych nie można wyznaczyć, np. oporu cieplnego badanych przegród. Jest to możliwe, jednak dopiero pod warunkiem przeprowadzenia w tym samym czasie dodatkowych ciągłych pomiarów natężenia strumienia przepływającego ciepła (za pomocą mierników płytowych, tzw. ciepłomierzy) oraz temperatury powietrza po obu stronach przegrody i temperatury granicznych powierzchni przegrody. Możliwe jest również wyznaczenie współczynnika przenikania ciepła poprzez równoczesny pomiar temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego i środowiska wewnątrz pomieszczeń oraz temperatury obu powierzchni przegrody [103] czy też tylko temperatury powietrza i powierzchni po obu stronach przegrody [192] i [193] (rozdz. 6.3.6). Jednak tego typu badania, mające na celu ilościową ocenę przegród, tj. wyznaczenie całkowitego oporu cieplnego i tym samym współczynnika przenikania ciepła, ze względu na przyczyny podane w rozdziale 6.3.6 w praktyce są przeprowadzane niezmiennie rzadko.

Aby na podstawie badań termowizyjnych można było uzyskać dane umożliwiające identyfikację i analizę nieprawidłowości w termicznej obudowie budynków lub stanu izolacji cieplnej w różnych obiektach budowlanych, niezbędne jest jednocześnie zapewnienie kilku podstawowych warunków:

1. Musi istnieć różnica temperatury między badanym obiektem a otoczeniem, zwana kontrastem termicznym. W przypadku termografii pasywnej jest to niezbędna minimalna różnica temperatury powietrza po obu stronach przegrody (w granicach od 15–20 °C, rozdz. 6.3.5), natomiast w przypadku termografii aktywnej jest to różnica temperatury zapewniona dzięki użyciu dodatkowego stymulującego i kontrolowanego źródła ciepła o odpowiedniej mocy.

2. W zależności od potrzeb badawczych, należy dysponować sprzętem (głównie kamerą termowizyjną) o odpowiednich do zakresu i rodzaju badań parametrach technicznych do gromadzenia i analizy danych w postaci sekwencji obrazów termalnych oraz do pomiarów parametrów środowiskowych po obu stronach przegród (rys. 6.3).

3. Operator kamery termowizyjnej powinien mieć niezbędną wiedzę z zakresu podstaw budownictwa, fizyki budowli, termofizycznych właściwości materiałów bu-

dowlanych, podstaw wymiany ciepła, w tym radiacyjnej wymiany ciepła, wymiany ciepła przez przegrody budowlane, z zakresu mostków termicznych, radiacyjnej wymiany ciepła budynku ze środowiskiem zewnętrznym, dyfuzji pary wodnej przez przegrody oraz wiedzę z zakresu obliczania niezbędnych cieplno-wilgotnościowych charakterystyk przegród budowlanych i budynków itp.

4. Operator kamery powinien mieć niezbędne doświadczenie i wiedzę o zasadach wykonywania termowizyjnych badań budynków i innych obiektów budowlanych (badań termowizyjnych w budownictwie) oraz niezbędną wiedzę i doświadczenie do poprawnej interpretacji termogramów. Jak już wspomniano wcześniej, niestety w Polsce, w przeciwieństwie do innych krajów, nie ma obowiązku odbywania szkoleń specjalistycznych i uzyskiwania formalnych uprawnień (certyfikatów) na poziomie I, II i III do wykonywania badań termowizyjnych, a świadectwa ukończenia szkolenia w zakresie termowizyjnych badań budynków mają jedynie charakter informacyjny (nie poświadczają, że dana osoba jest przygotowana do wykonywania badań, ale jedynie że ukończyła szkolenie). To powoduje, że w Polsce badania termowizyjne w budownictwie wykonują często osoby zupełnie do tego nieprzygotowane.

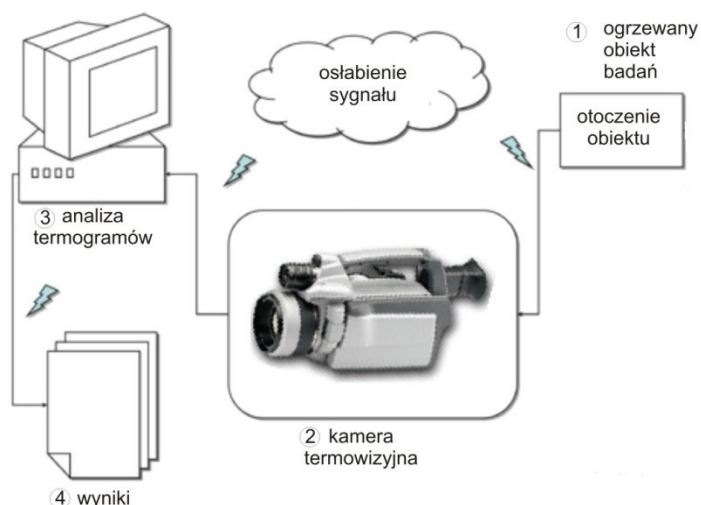
Kamera termowizyjna dokonuje pomiaru temperatury powierzchni badanego elementu, bez możliwości pomiaru temperatury jego wnętrza lub „patrzenia przez element”. W każdej zatem dziedzinie zastosowań badań termowizyjnych, tj. w budownictwie, medycynie, energetyce, przemyśle, ratownictwie, w zastosowaniach wojskowych itp. podstawą analizy, wnioskowania i interpretacji termogramów jest powierzchniowy rozkład temperatury badanego obiektu. W przypadku przegrody budowlanej, na podstawie powierzchniowego rozkładu pola temperatury oraz informacji na temat warunków termalnych panujących po obu stronach przegrody na 2–3 dni przed pomiarami i w trakcie pomiarów, wnioskujemy o jej właściwościach cieplnych, o szczelnościach na przewiewanie powietrza czy też o jej zawilgoceniu.

W procesie analizy sekwencji termogramów posługujemy się mechanizmami przetwarzania obrazów cyfrowych w postaci specjalistycznych programów komputerowych, które umożliwiają, między innymi, poprawę jakości uzyskanych obrazów, ich analizę numeryczną i statystyczną, eliminowanie zakłóceń, wyostrenie interesujących fragmentów termogramów itp. Programy te o coraz większych możliwościach przetwarzania termogramów niestety mogą być wykorzystywane przez nieuczciwych operatorów kamer termowizyjnych do nadinterpretacji termogramów i do przedstawiania wyników „pod zleceniodawcę”.

6.2.2. Termografia pasywna

Tradycyjne termowizyjne badania budynków i innych obiektów budowlanych polegają na identyfikacji rozkładu temperatury na ich powierzchniach granicznych, tj. na powierzchniach zewnętrznych i na powierzchniach od strony pomieszczenia, bez kon-

trolowanej zewnętrznej ingerencji i stymulacji cieplnej w ich stan termodynamiczny. W miejscach nieciągłości lub braku izolacji cieplnej w przegrodach budowlanych, ograniczających ogrzewaną (ewentualnie chłodzoną) kubaturę budynku, na powierzchniach granicznych przegród powstaje zróżnicowane pole temperatury, które może być stosowane do identyfikacji niejednorodności cieplnych w przegrodach. *Przy czym wyraźnie należy podkreślić, że nie każde zróżnicowanie pola temperatury na powierzchniach przegród świadczy o ich wadach w zakresie ochrony cieplnej* (patrz rozdz. 6.6 i 6.7). Na podstawie otrzymanego powierzchniowego rozkładu temperatury (termogramu) badanej przegrody budowlanej wnioskuje się o stanie izolacyjności cieplnej przegrody (ocena jakościowa). W praktyce oznacza to, że termiczną obudowę budynków bada się „w stanie takim jakim jest”, bez dodatkowego kontrolowanego wymuszenia termicznego. Oczywiście, badania należy prowadzić zgodnie z obowiązującymi zasadami wykonywania pomiarów termowizyjnych w budownictwie (rozdz. 6.3.5). W tym przypadku wykrywanie wewnętrznych niejednorodności materiałowych w przegrodach budowlanych metodą termograficzną opiera się na związku zewnętrznego pola temperaturowego z przewodnictwem cieplnym badanej przegrody budowlanej i z różnicą temperatury po obu stronach przegrody. Tego typu badania budynków są badaniami klasycznymi, od wielu lat najczęściej stosowanymi i umownie, ale w praktyce bardzo rzadko nazywanymi „termografią pasywną”, najczęściej określa się je jako „termografia w podczerwieni” lub po prostu „badania termowizyjne” (ewentualnie „badania termograficzne”). Na rysunku 6.3 przedstawiono typowy schemat klasycznych badań termowizyjnych metodą pasywną, stosowaną w budownictwie do oceny jakościowej budynków i innych obiektów budowlanych oraz w innych dziedzinach gospodarki.



Rys. 6.3. Schemat klasycznych badań według metody termografii pasywnej (na podstawie [89])

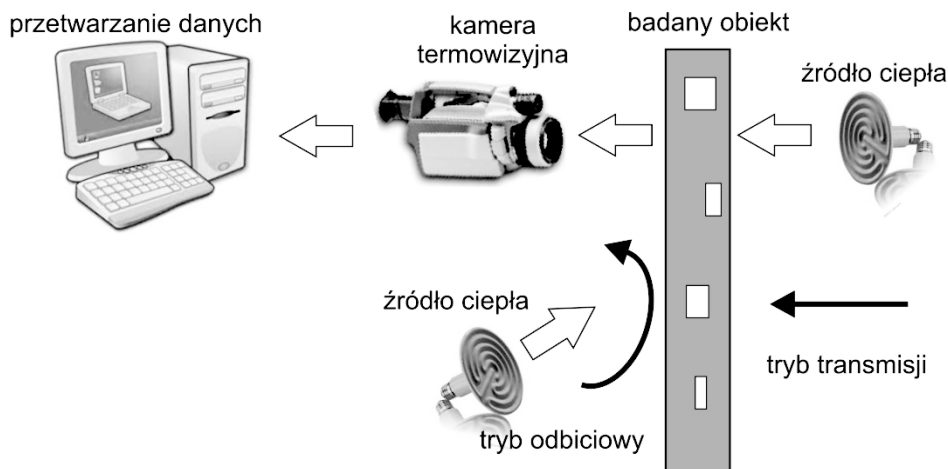
Tradycyjna pasywna metoda badań termowizyjnych (metoda jakościowa) jest najczęściej stosowana w pomiarach w budownictwie, przede wszystkim w pomiarach budynków oraz w innych dziedzinach pomiarów użytkowych. Przykłady zastosowania tej metody badawczej w budownictwie przedstawiono w rozdziale 6.7.

6.2.3. Termografia aktywna

Termografia aktywna służy do wykrywania defektów lub wtrąceń materiałowych w przypowierzchniowej warstwie badanego materiału (przegrody budowlanej) oraz do wyznaczania nieznanych właściwości cieplnych materiałów tworzących badany element. Metoda aktywna termografii podczerwonej polega na świadomym i kontrolowanym zewnętrznym wymuszaniu (wzbudzaniu) ciepłym badanego elementu źródłem ciepła o dużej mocy, rzędu kilku lub kilkudziesięciu kW, w celu wywołania kontrastu termicznego między obszarami zawierającymi defekty (wtrącenia) materiałowe a obszarem jednorodnym i na cyklicznej rejestracji obrazów termalnych podczas stygnięcia elementu po wyłączeniu stymulującego źródła ciepła. Istotą termografii aktywnej jest badanie termicznej odpowiedzi przegrody (materiału) w funkcji czasu na kontrolowaną stymulację zewnętrznym impulsem ciepła o odpowiedniej mocy. Niejednorodności w budowie przegród są widoczne w postaci zróżnicowanych obszarów termalnych, których temperatura różni się od temperatury pozostałej części badanej przegrody, co wynika z ich odmiennych właściwości przewodzenia ciepła. Odpowiedź przegrody podczas jej stygnięcia jest cyklicznie rejestrowana za pomocą kamery termowizyjnej. Obrazy termalne stygnącej powierzchni, tj. czasowe sekwencje rozkładu temperatury na badanej powierzchni, zawierają informacje o położeniu defektów podpowierzchniowych i umożliwiają identyfikację głębokości i wielkości tych defektów (wtrąceń materiałowych) oraz nieciągłości materiału. Pomiar rozkładu temperatury na powierzchniach przegrody można prowadzić zarówno po stronie pobudzanej (tzw. tryb odbiciowy), jak i po stronie tylnej (tzw. tryb transmisyjny, rys. 6.4).

Tryb transmisyjny termografii aktywnej jest stosowany do wykrywania wtrąceń materiałowych (defektów) położonych głęboko, tj. bliżej nienapromieniowywanej strony badanej przegrody. Natomiast tryb odbiciowy jest wykorzystywany do wykrywania wtrąceń materiałowych (defektów) położonych płytko pod napromieniowywaną cieplnie powierzchnią. Termogramy stygnącej powierzchni są wykonywane w stałych odstępach czasu, co umożliwia obserwowanie dynamiki zmian temperatury powierzchni w miejscach jednorodnego materiału i w częściach o budowie niejednorodnej. Dzięki odpowiedniej obróbce i interpretacji termogramów stygnącej powierzchni możliwe jest uzyskanie informacji o obszarach nieciągłości materiałowej badanego elementu oraz zidentyfikowanie tych miejsc.

Jedną z prostych metod obróbki danych pomiarowych jest wyznaczenie tzw. kontrastu temperaturowego – może to być kontrast absolutny, chwilowy i standardowy, które oblicza się następująco [89], [146]:



Rys. 6.4. Układ stanowiska do badań za pomocą termografii aktywnej dla trybu pracy odbiciowego i transmisyjnego (na podstawie [89])

Kontrast absolutny C_a :

$$C_a(t) = T_p(t) - T_{pj}(t) \quad (6.1)$$

gdzie: $T_p(t)$ – temperatura w dowolnie wybranym punkcie powierzchni badanego materiału, [°C],

$T_{pj}(t)$ – temperatura w punkcie powierzchni nad jednorodnym obszarem bez defektu, [°C].

Kontrast bieżący $C_b(t)$ wyznacza się ze wzoru:

$$C_a(t) = \frac{C_a(t)}{T_{pj}(t)} = \frac{T_p(t) - T_{pj}(t)}{T_{pj}(t)} \quad (6.2)$$

Kontrast standardowy $C_s(t)$ oblicza się ze wzoru:

$$C_s(t) = \frac{T_p(t) - T_p(t_0)}{T_{pj}(t) - T_{pj}(t_0)} \quad (6.3)$$

gdzie: $T_p(t_0)$ – temperatura przed stymulacją cieplną badanej powierzchni w dowolnie wybranym jej punkcie, [°C],

$T_{pj}(t_0)$ – temperatura przed stymulacją cieplną w punkcie badanej powierzchni nad obszarem jednorodnym, [°C].

Pozostałe oznaczenia jak we wzorze (6.1).

Głębokość zalegania szukanego defektu bądź wtrącenia materiałowego można określić na podstawie czasu stygnięcia badanego elementu, dla którego kontrast temperaturowy dla punktów powierzchni zawierających defekty jest największy. W początkowym etapie stygnięcia elementu zwiększenie kontrastu temperaturowego wiąże się zazwyczaj z akumulacją energii cieplnej w obrębie nieciągłości materiałowej. Powoduje to powstanie różnicy temperatury, co skutkuje również dwukierunkowym przepływem ciepła (przepływem ciepła „na boki” wtrącenia) i w konsekwencji powoduje zwiększenie kontrastu. To zjawisko ogranicza możliwość zastosowania tej metody badawczej do lokalizacji wtrąceń materiałowych położonych w głębi badanego materiału. Za pomocą zatem termografii aktywnej w trybie odbiciowym można zidentyfikować jedynie defekty (wtrącenia) leżące w warstwie przypowierzchniowej, przy czym grubość tej warstwy zależy od właściwości ciepło-fizycznych badanego materiału oraz od mocy cieplnej wzbudzenia termicznego. Przykłady zastosowania termografii aktywnej do identyfikacji cieplnych właściwości wtrąceń materiałowych przedstawiono w pracach [139], [140] i [141].

W zależności od charakteru stymulacji cieplnej, akwizycji obrazów termalnych i sposobu przetwarzania danych rozróżnia się cztery podstawowe techniki pobudzania i analizy danych w termografii aktywnej – są to:

- termografia impulsowa (ang. *pulsed thermography*),
- termografia modulacyjna (ang. *lock-in thermography*),
- termografia impulsowo-fazowa (ang. *pulsed-phase thermography*),
- termografia wibracyjna (ang. *vibrothermography*).

Poniżej przedstawiono ogólny opis każdej z tych technik pomiarowych:

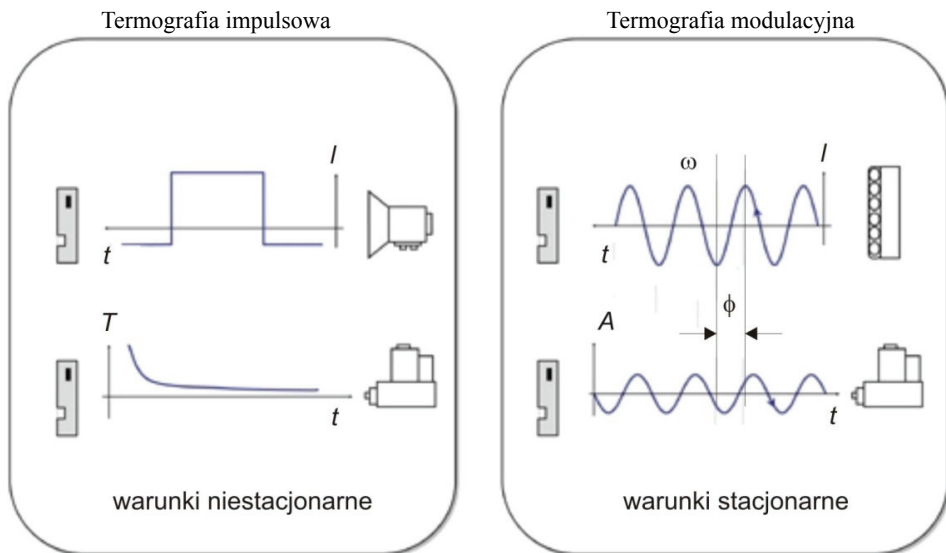
1. *Termografia impulsowa* – jako pobudzenie stosuje się energię cieplną, która jest dostarczona do badanej powierzchni za pomocą impulsu ciepła, a następnie rozkład temperatury powierzchni podczas stygnięcia jest rejestrowany sekwencyjnie kamerą termowizyjną. Podpowierzchniowe nieciągłości materiałowe (defekty bądź wtrącenia materiałowe) zmieniają drogę rozprzestrzeniania się strumienia ciepła, a co za tym idzie zmieniają kontrast temperaturowy w miejscu nad powierzchnią zawierającą owe nieciągłości. Poprzez analizę mierzonego sekwencyjnie kontrastu temperaturowego można uzyskać ilościowe dane o głębokości, wielkości i o charakterze wtrąceń materiałowych. W tej metodzie pomiarowej istnieje możliwość umieszczenia źródła ciepła:

- a) po tej samej stronie próbki, po której znajduje się kamera termowizyjna (tryb odbiciowy),
- b) po stronie przeciwnej (tryb transmisyjny).

Identyfikacja wad w badanej próbce za pomocą kontrastu temperaturowego, czyli różnicy temperatury nad regionem z defektem i regionem jednorodnym, zależy od kilku czynników: od przewodności cieplnej materiałów, głębokości zalegania wtrącenia, grubości badanego elementu, warunków środowiskowych, od czułości urządzenia i od emisyjności badanej powierzchni. W tej metodzie termografii aktywnej zamiast nagłego ogrzewania stosuje się niekiedy pobudzenie strumieniem zimnego powietrza,

następnie obserwuje rozkład temperatury powierzchni w czasie jej samoczynnego ogrzewania się.

2. *Termografia modulacyjna* – w tej metodzie pomiarowej badany obiekt jest pobudzany harmonicznym strumieniem ciepła. Wyznacza się amplitudę i kąt przesunięcia fazowego odpowiedzi stymulowanego materiału względem sygnału pobudzającego o znanej częstotliwości. Największą wadą tej metody jest wymaganie wykonania testów dla wielu częstotliwości, natomiast zaletą jest niezależność od emisyjności powierzchni. W metodzie wykorzystuje się teorię fal termicznych i może być zastosowana między innymi do wykrywania obszarów nieciągłości w powłokach, materiałach kompozytowych, do wykrywania wad w stali, w materiałach niemetalicznych itp. Na rysunku 6.5 przedstawiono porównanie metody termografii aktywnej impulsowej i modulacyjnej.



Rys. 6.5. Porównanie zasady działania metody termografii aktywnej impulsowej i modulacyjnej (na podstawie [89])

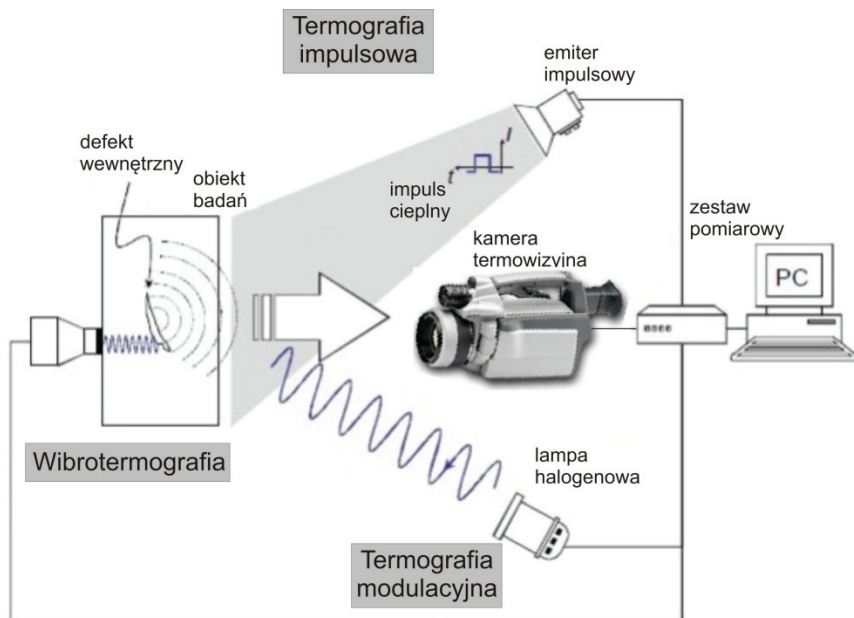
3. *Termografia impulsowo-fazowa* – metoda pomiarowa, która łączy w sobie zalety termografii impulsowej i modulacyjnej, jednocześnie eliminując ich wady. Powierzchnia badanego elementu, podobnie jak w termografii impulsowej, jest pobudzana impulsem cieplnym i podobnie, za pomocą kamery termowizyjnej sekwencyjnie rejestruje się rozkład temperatury na tej powierzchni w czasie jej stygnięcia. Zarejestrowane zależności obniżającej się temperatury powierzchni w czasie są następnie poddane analizie za pomocą dyskretnej transmitancji Fouriera [146]. Obrazy termalne mogą być przedstawione jak w termografii modulacyjnej i dzięki temu można uzyskać ciekawe funkcje w odniesieniu do bardziej tradycyjnych metod obliczania kontrastu

w termografii impulsowej. Należy jednak podkreślić, że zasadniczą różnicą między termografią impulsowo-fazową a modulacyjną jest to, że w termografii impulsowo-fazowej przeprowadza się analizę nieustalonego stanu wymiany ciepła przy stygnięciu badanej próbki. W termografii modulacyjnej natomiast wykorzystuje się ustalony stan periodyczny wymiany ciepła w wyniku harmonicznej stymulacji cieplnej badanego elementu.

4. *Wibrotermografia* – w metodzie termografii aktywnej stosuje się do badań struktury obiektu fale ultradźwiękowe o zakresie częstotliwości od 0 do 20 Hz. Pobudzenie obiektu wibracjami powoduje wytworzenie odpowiedzi w postaci fali cieplnej, rejestrowanej przez kamerę termowizyjną. Zaletą metody jest możliwość wykrywania defektów, których nie można zidentyfikować za pomocą innych rodzajów termografii aktywnej (defekty typu rozwarstwienia i pęknięcia).

Na rysunku 6.6 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego do badań z pomocą termografii aktywnej w trybie impulsowym, modulacyjnym i dla wibrotermografii.

Termografia aktywna wymaga stosowania specjalistycznej aparatury i obecnie w Polsce jest stosowana jedynie w badaniach naukowych. Więcej informacji na temat termografii aktywnej można znaleźć w pracach: Shepard (1997 [166]), Vavilov i inni 1997 [196], Grinzato (1998 [48]), Maldague i inni (1998 [88], 2001 [89], 2002 [90], 2002 [91]), Avdelidis i inni (2003 [10], 2004 [11], 2004 [12]), Maierhoffer i inni (2004



Rys. 6.6. Układ stanowiska pomiarowego do badań za pomocą termografii aktywnej w trybie impulsowym, modulacyjnym i dla wibrotermografii (na podstawie [89])

[85], 2005 [86] i 2006 [87]), Rybiński i inni (2005 [158]), Omar i inni (2005 [147]) Olfieruk (2008 [146]), Nowak, Kucypera (2010 [139], 2010 [134], 2011 [140]) oraz Arndt (2010 [6]).

6.3. Istota badań termowizyjnych

6.3.1. Wstęp

W zagadnieniach związanych z racjonalnym użytkowaniem energii cieplnej w budynkach o różnym przeznaczeniu ważną rolę odgrywa prawidłowe rozpoznanie stanu istniejącego termicznej obudowy budynków. Dotyczy to zwłaszcza identyfikacji miejsc występowania i zasięgu liniowych oraz punktowych mostków cieplnych. Ma to istotne znaczenie zwłaszcza w budynkach poddawanych termomodernizacji zarówno na etapie przed, jak i po zakończeniu procesu inwestycyjnego oraz podczas oddawania do użytkowania budynków nowych. Badania termowizyjne powinny należeć do podstawowych badań budynków i stanowić część procesu inwestycyjnego na etapie odbioru technicznego nowych i termomodernizowanych budynków istniejących.

Miejsca nieciągłości lub braku izolacji cieplnej w elementach tworzących termiczną obudowę budynku skutkują różnicą temperatury na powierzchniach poszczególnych przegród budowlanych. Rozkład temperatury na analizowanej powierzchni może być zatem wykorzystywany do identyfikacji niejednorodności cieplnych spowodowanych:

- nieciągłością lub brakiem izolacji,
- zawartością wilgoci w przegrodzie lub
- infiltracją powietrza przez nieszczelności obudowy budynku.

Wartość i rozkład temperatury na granicznych powierzchniach przegród budowlanych są wypadkową przede wszystkim przenikania ciepła przez przegrody, na które składa się wymiana ciepła przez konwekcję, przewodzenie i promieniowanie oraz infiltracja powietrza przez nieszczelności przegród i wymiana wilgoci przez przegrody (w tym wilgoci kondensacyjnej). Czynniki te wpływają nie tylko na straty ciepła i efektywność energetyczną budynków, ale również są bardzo istotne z punktu widzenia użytkowników budynków, ze względu na zapewnienie komfortu cieplnego w pomieszczeniach, na zdrowie i na bezpieczeństwo użytkowników.

Przepływ ciepła jest głównym mechanizmem kształtowania się rozkładu temperatury na granicznych powierzchniach przegród budowlanych. Przepływ ciepła z pomieszczenia na zewnątrz powoduje wzrost temperatury zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych, zwłaszcza w miejscach mostków cieplnych liniowych, co z kolei wpływa na wysokość i rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej i na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia. Uogólniając można stwierdzić, że przepływ ciepła może prowadzić do zwiększenia lub do obniżenia

nia temperatury powierzchni przegród w zależności od konfiguracji materiałów o różnych wartościach współczynników przewodzenia ciepła, geometrii mostków cieplnych i/lub nadmiernej infiltracji przez przegrody budowlane.

Zawilgocenie przegród budowlanych, w tym kondensacja powierzchniowa pary wodnej, obniżają temperaturę powierzchni przegród. Duża pojemność cieplna wody powoduje gromadzenie się energii cieplnej (np. w izolacji cieplnej stropodachu przy nagrzewaniu słonecznym) poprzez nagrzewanie się zawilgoconej izolacji cieplnej, co może być identyfikowane przez kamerę termowizyjną w porze nocnej. Generalnie, wilgoć pogarsza właściwości cieplne przegród (wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła) i powoduje zwiększenie strat ciepła – zjawisko to z czasem narasta, powodując z każdym rokiem zwiększanie się strat ciepła i zwiększanie ryzyka kondensacji pary wodnej w przegrodach budowlanych oraz pogarszanie parametrów komfortu cieplnego w pomieszczeniach.

Z kolei nadmierna infiltracja powietrza przez nieszczelności przegród budowlanych powoduje zwiększanie strat ciepła przez dodatkowe tzw. mostki cieplne konwekcyjne. Jest to zwłaszcza niebezpieczne w przypadku okien, szczególnie w okolicach nadproży okiennych (ryzyko kondensacji i rozwoju grzybów pleśniowych) oraz w połaciach dachowych w przypadku przemieszczania się zimnego powietrza w szczelinie wentylacyjnej między płytami gipsowo-kartonowymi (GK) i izolacją cieplną.

Termografia podczerwona jest metodą pomiaru, na podstawie której jesteśmy w stanie wnioskować o stanie izolacji cieplnej badanej przegrody. Badania termowizyjne służą przede wszystkim do *jakościowej* oceny przegród budowlanych w zakresie poprawności doboru izolacji cieplnej w przegrodach, tj. do wskazania miejsc nieciągłości lub braku izolacji cieplnej (mostki cieplne), poprzez pomiar temperatury na powierzchni przegrody oraz wskazania zasięgu (obszaru) jej występowania. Możliwa jest również termograficzna ocena *ilościowa* przegród budowlanych, np. możliwe jest wyznaczenie wartości całkowitego oporu cieplnego przegrody i określenie współczynnika przenikania ciepła, pod warunkiem jednak pomiaru w tym samym czasie innych niezbędnych wielkości związanych z przenikaniem ciepła przez badane przegrody, co w praktyce jest dosyć kłopotliwe. Jak wspomniano wcześniej, możliwe jest również określenie współczynnika przenikania ciepła poprzez pomiar temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania środowiska po obu stronach przegrody oraz temperatury powierzchni granicznych przegrody. Należy przede wszystkim zauważyć, że definicja współczynnika przenikania ciepła U [$W/(m^2 \cdot K)$], określona dla stacjonarnych warunków przepływu ciepła, stoi w dużej sprzeczności z rzeczywistym przepływem ciepła przez przegrody budowlane, który zawsze jest nieustalony w czasie (rozdz. 2.3). W tego typu badaniach należy bezwzględnie przestrzegać zasad pomiarów współczynnika przenikania ciepła U w budynkach istniejących. Ponadto trudność polega również na wyznaczeniu rzeczywistego oporu przejmowania ciepła po zewnętrznej stronie przegród, który głównie zależy od prędkości wiatru (patrz rozdz.

2.2.4). W usługowych badaniach budynków praktycznie niemal zawsze wykonuje się pomiary termowizyjne mające na celu jakościową ocenę przegród budowlanych.

Termografia podczerwona jest bezkontaktową metodą badawczą umożliwiającą detekcję, wizualizację, rejestrację i przetwarzanie rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu przez pomiar natężenia promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekt. Metoda ta jest oparta na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania podczerwonego (zwanego również cieplnym, długofalowym lub temperaturowym), emitowanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego i przekształceniu tego promieniowania na obraz widzialny. Natężenie emitowanego promieniowania podczerwonego jest funkcją temperatury i współczynnika emisyjności badanej powierzchni, co umożliwia odwzorowanie graficzne tej temperatury w postaci barwnego termogramu.

Zarejestrowane przez urządzenie termograficzne promieniowanie cieplne powierzchni przegrody budowlanej zależy nie tylko od temperatury i emisyjności powierzchni, promieniowanie to pochodzi także z najbliższego otoczenia i jest ono odbijane przez badany obiekt. Na docierające do detektora kamery termowizyjnej promieniowanie cieplne obiektu i promieniowanie od niego odbite ma także wpływ absorpcja promieniowania przez atmosferę na trasie pomiaru. Jednak, gdy pomiary termowizyjne budynków są wykonane zgodnie z obowiązującymi zasadami, wpływ promieniowania cieplnego odbitego od badanej powierzchni i absorbowanego przez atmosferę na trasie pomiaru najczęściej jest pomijalnie mały.

Kamera termowizyjna umożliwia obserwację rozkładu temperatury na badanej powierzchni jako obraz termalny zwany termogramem, który jest wynikiem pomiaru temperatury wykonanego na podstawie detekcji promieniowania podczerwonego, emitowanego z powierzchni obiektu, np. przez ściany budynku. Termogram jest obrazem dwuwymiarowym rozkładu temperatury w poszczególnych punktach tej powierzchni i zawiera dwie zasadnicze informacje:

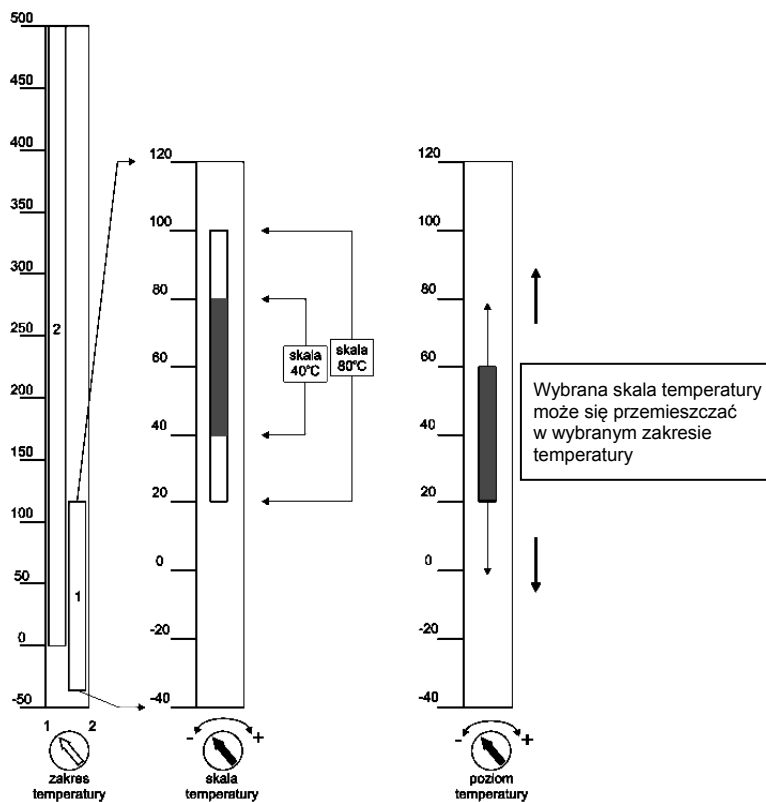
- temperaturę w danym miejscu badanej powierzchni,
- zasięg obszarów izotermicznych.

Warto zwrócić uwagę, że te dwie zasadnicze informacje pojawiły się na termogramach od samego początku stosowania kamer termowizyjnych i w tym względzie praktycznie niewiele się zmieniło (rys. 1.2–1.4). Naturalnie, opracowywanie wyników pomiarów termowizyjnych przed 20–30 laty było bardziej żmudne i pracochłonne, należało między innymi korzystać z krzywych kalibracyjnych dla danego typu obiektywu w postaci wykresów dla danej kamery, mniejsza była również dokładność odczytywanych (tj. mierzonych) wartości temperatury na badanej powierzchni (ówczesne termogramy nie zawierały skali temperatury, jak to jest obecnie, patrz rys. 1.2–1.4). Oczywiście od wyprodukowania pierwszej kamery termowizyjnej nastąpił kolosalny postęp w rozwoju elektroniki, w możliwościach rejestracji, wizualizacji i przetwarzania danych pomiarowych, ale przede wszystkim zdecydowanie poprawiła się dokładność pomiarów. Zmienił się też sposób prezentacji wyników badań przez dodanie skali

i zakresu mierzonej temperatury bezpośrednio na termogramie. Natomiast podstawowa zasada, jakie informacje ma zawierać termogram (punkty 1 i 2 powyżej) przez te wszystkie lata, pozostała niezmienna.

Informacje zawarte na termogramie są wypadkową wielu czynników wpływających na pomiar temperatury badanej powierzchni (rozdz. 6.4), ale podstawowym i bardzo istotnym elementem badań termograficznych jest właściwa analiza i interpretacja termogramów (rozdz. 6.6).

W celu osiągnięcia możliwie największej rozdzielczości termicznej i dokładności pomiarów, przed badaniami w kamerze termowizyjnej należy ustawić, między innymi, zakres pomiarowy przewidywanej do zmierzenia temperatury, natomiast system kamery automatycznie dobiera tzw. skalę temperatury, która widoczna jest po prawej stro-



Rys. 6.7. Etapy ustawiania odpowiedniego poziomu planowanej do zmierzenia temperatury badanej powierzchni – operator kamery ustawia w systemie kamery przewidywany zakres pomiarowy temperatury, a system kamery automatycznie dobiera tzw. skalę temperatury, widoczną po prawej stronie termogramu. Skala temperatury może automatycznie „przemieszczać się” w wybranym zakresie temperatury, w zależności od wartości mierzonej temperatury badanej powierzchni

nie termogramu (rys. 6.7). Skala temperatury obrazuje rozkład kolorów w zakresie temperatury widocznej na termogramie, przy czym najwyższej temperaturze odpowiada górny koniec skali, a najniższej dolny.

Termogram pokazuje rozkład temperatury w szerokim zakresie barw od ciemno-granatowego do jasnożółtego (czasami od czerni do bieli), które korespondują odpowiednio z niskimi i wysokimi temperaturami powierzchni. Jasne i ciemne obszary odnoszą się do temperatury powierzchni badanego obiektu i są zapisywane w postaci pliku graficznego i dzięki temu możliwa jest komputerowa analiza rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu, zarówno w wybranym obszarze, jak i wzdłuż wybranej linii (przekroju). W praktycznych badaniach termowizyjnych do zobrazowania rozkładu temperatury na badanych powierzchniach stosuje się tzw. palety kolorów, umożliwiające natychmiastową lokalizację termalnych defektów badanej powierzchni oraz ułatwiające interpretację termogramów. Paleta kolorów na termogramie odwzorowuje kolorystyczne odpowiedniki skali temperatury.

Na rysunku 6.8 przedstawiono termogramy nieocieplanego stropodachu pełnego ogrzewanej hali laboratoryjnej z wybranymi przykładowymi paletami kolorów, jakie mogą być zastosowane na termogramach. Na zdjęciu stropodachu widoczne są wytopienia śniegu w miejscach liniowych mostków termicznych, które stanowią wypełnienia betonowe (tzw. beton pachwinowy) między żelbetowymi płytami panwiowymi oraz świetlik dachowy. Liniowe mostki cieplne tworzą charakterystyczną siatkę o wymiarach zbliżonych do kwadratu, co jest również widoczne na poszczególnych termogramach.

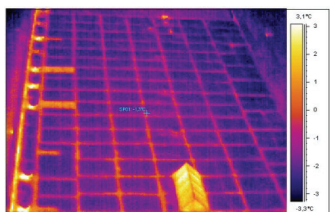
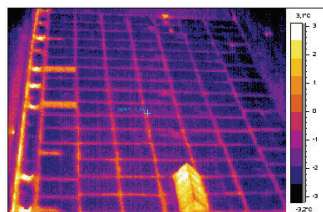
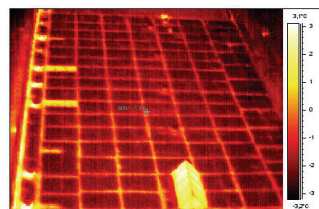
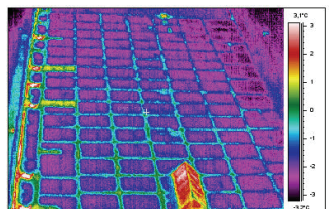
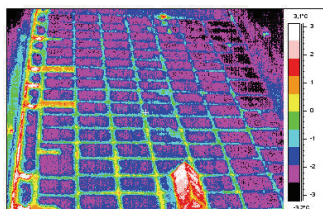
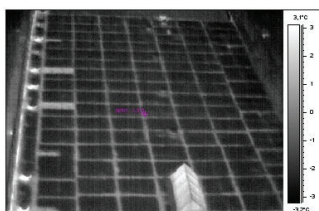
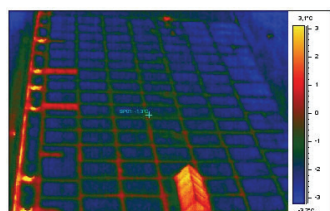
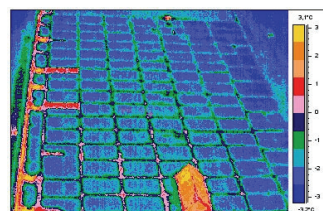
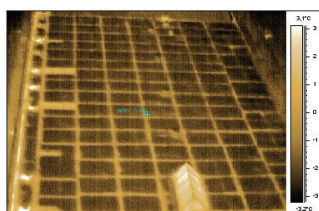
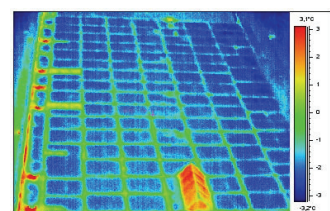
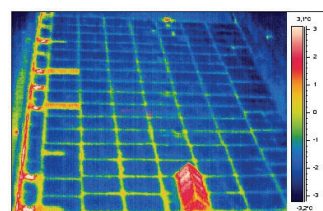
Stosowanie konkretnej palety barw na termogramach jest związane głównie z osobistymi preferencjami operatora kamery i z wieloletnią tradycją stosowania tych barw w konkretnych zastosowaniach badań termowizyjnych. Jednak dla niektórych zastosowań termowizji są palety barw, które lepiej odwzorowują obraz termalny badanego elementu niż inne. Na przykład w zastosowaniach termowizji do pomiarów urządzeń elektrycznych najczęściej stosuje się paletę roztopionego żelaza (ang. *iron* lub *iron-bow*), która odzwierciedla zmianę kolorów od żelaza zimnego do roztopionego. Identyfikacja małej różnicy temperatury wymaga stosowania palet o dużym kontraście, np. paletę tęczy (ang. *rain* lub *rainbow*), która bardzo dobrze sprawdza się w termograficznych badaniach budynków. Temperatura reprezentowana przez kolor palety jest arbitralna i może zależeć od zakresu i skali temperatury przyjętych przez operatora kamery. Nie ma ścisłych reguł dotyczących wyboru palety barw dla poszczególnych zastosowań, a operatorzy kamer termowizyjnych opierają się na własnych preferencjach na bazie doświadczeń z różnymi paletami dla specyficznych zastosowań kamery, różnych obiektów badań i różnych typów identyfikowanych defektów.

Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, że wybór palety kolorów na termogramie może znacząco wpływać na interpretację termogramów i może być w nieuczciwy lub nieprzemyślany sposób stosowany przez niedoświadczonych operatorów kamer termowizyjnych (patrz również rozdz. 6.6).

Przykładowe palety kolorów na termogramach



stropodach – zdjęcie

roztopione żelazo (*iron*)roztopione żelazo 10 (*iron 10*)ogień (*flame*)tęcza (*rain* lub *rainbow*)tęcza 10 (*rain 10*)szara (*grey*)rozgrzany węgiel (*hotcoal*)medyczna (*medical*)złota (*gold*)średniozielona (*midgreen*)tęcza 900 (*rain 900*)

Rys. 6.8. Przykładowe palety kolorów na termogramach nieocieplanego stropodachu pełnego nad ogrzewaną halą laboratoryjną (temperatura powietrza zewnętrznego -2°C , temperatura powietrza w hali 18°C)

Historycznie rzecz ujmując, w pierwszych zastosowaniach termowizji do badań budynków najbardziej popularna była już dzisiaj praktycznie niestosowana, tzw. paleta (skala) szarości (ang. *grey*), co prawdopodobnie miało związek z małą dostępnością

na ówczesnym rynku do kolorowych klisz fotograficznych (w tamtym okresie termogramy były fotografowane odpowiednio przystosowanym i zamontowanym do specjalnej przystawki aparatem fotograficznym z filtrami kolorów), a następnie skala tęczy (ang. *rain* lub *rainbow*). Obecnie najpopularniejszą paletą w zastosowaniach budowlanych i najczęściej prezentowaną w publikacjach jest paleta roztopionego żelaza (ang. *iron*). Autor niniejszego podręcznika w zdecydowanej większości przypadków stosuje intuicyjną paletę tęczy, która na termogramach odwzorowuje naturalne kolory widma światła białego i która umożliwia wzmocnienie obrazowania przy małych różnicach temperatury badanej powierzchni.

Zakres typowych badań w budownictwie przedstawiono w rozdziale 6.3.2.

6.3.2. Podstawa pomiaru termowizyjnego

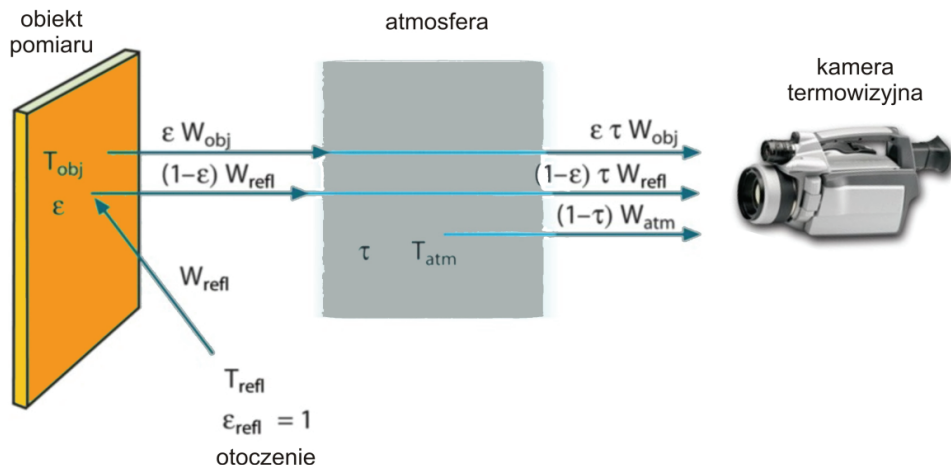
Kamera termowizyjna dokonuje pomiaru promieniowania cieplnego docierającego do detektora kamery. Poniżej przedstawiono ogólny opis i założenia modelu obliczeniowego stosowanego przez konstruktorów kamer termowizyjnych do określania rozkładu temperatury na badanej powierzchni. Znajomość tego modelu i jego założeń upraszczających może być pomocna w analizie wpływu czynników zewnętrznych na dokładność pomiaru temperatury oraz w interpretacji termogramów.

Podstawową zależnością stosowaną przez system kamery termowizyjnej jest tzw. podstawowe równanie promieniowania, w którym mierzone promieniowanie podczerwone jest sumą trzech składowych (rys. 6.9) [93]:

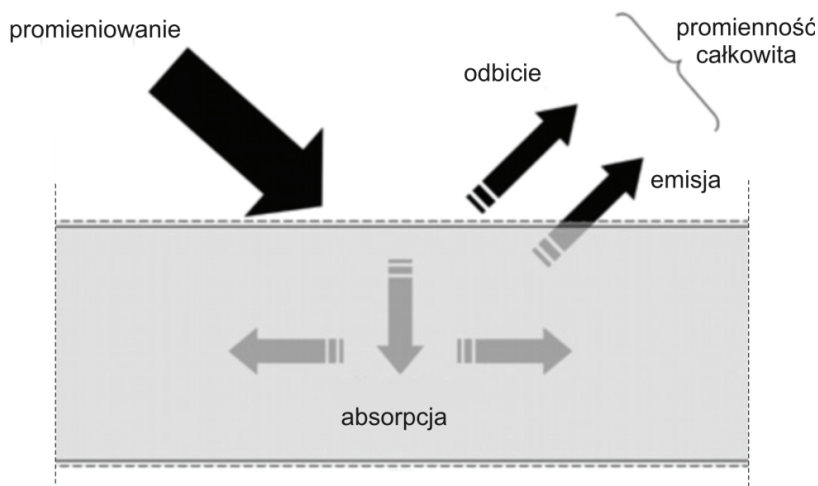
- a) promieniowania pochodzącego z samego obiektu – wielkość tej składowej zależy od współczynnika emisyjności i temperatury powierzchni (wzór (4.9)),
- b) promieniowania cieplnego pochodzącego z otoczenia, a odbitego od badanej powierzchni – wielkość tej składowej zależy od współczynnika odbicia powierzchni,
- c) promieniowania własnego atmosfery znajdującej się między kamerą i badanym obiektem.

Suma składowych strumieni ciepłych a) i b), tj. promieniowania cieplnego własnego danej powierzchni i strumienia cieplnego odbitego od tej powierzchni, a pochodzącego z otoczenia, stanowi wielkość, która jest nazywana „promienność całkowita” powierzchni (ang. *radiosity*) (rys. 6.10) lub „jasność promieniowania” [74]. Składowe te są częściowo pochłaniane (tłumione) przez atmosferę znajdującą się na drodze pomiaru.

Poza wymienionymi głównymi składowymi promieniowania cieplnego, docierającymi do obiektywu kamery, na trasie pomiaru mogą pojawić się trudne do oszacowania czynniki zakłócające, np. niekontrolowane źródła promieniowania cieplnego. Gdy jednak pomiary termowizyjne wykonywane są zgodnie z przedstawionymi wcześniej zasadami pomiarów, wpływ tych zakłóceń jest pomijalnie mały.



Rys. 6.9. Schemat układu strumieni ciepłych typowych badań termowizyjnych wykonywanych w budownictwie (na podstawie [93])



Rys. 6.10. Definicja promienności całkowitej (zwanej również jasnością promieniowania) badanej powierzchni przegrody budowlanej nieprzeźiernej (ang. *radiosity*) – jest to suma gęstości emitowanego przez powierzchnię radiacyjnego strumienia ciepła i gęstości radiacyjnego strumienia ciepła odbitego od badanej powierzchni, a pochodzącego z otoczenia

Wzór (6.4), stanowiący podstawę pomiaru termowizyjnego, wyprowadzono dla następujących założeń:

- emisyjność obiektu jest znana i jednakowa w całym polu widzenia kamery, zakłada się, że badane ciało jest szare,

- otoczenie, o znanej temperaturze, badanego obiektu emituje promieniowanie cieplne jak ciało (doskonale) czarne ($\varepsilon = 1$),
- dla powierzchni emitującej promieniowanie spełnione jest prawo Lamberta,
- transmisja atmosfery, o znanej temperaturze i wilgotności względnej, jest stała dla promieniowania cieplnego na trasie między obiektem i obiektywem kamery.

Całkowita zatem moc promieniowania docierającego do obiektywu kamery jest wyrażona wzorem, który stanowi podstawę pomiaru termowizyjnego [93]:

$$W_{\text{tot}} = \varepsilon \tau W_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \tau W_{\text{refl}} + (1 - \tau) W_{\text{atm}} \quad (6.4)$$

- gdzie: $\varepsilon \tau W_{\text{obj}}$ – emisja promieniowania cieplnego z obiektu,
 ε – współczynnik emisyjności badanej powierzchni,
 τ – współczynnik przepuszczalności atmosfery,
 W_{obj} – moc cieplnego promieniowania obiektu,
 $(1 - \varepsilon) \tau W_{\text{refl}}$ – emisja promieniowania odbitego, a pochodzącego od źródeł w otoczeniu,
 $(1 - \varepsilon)$ – współczynnik odbicia badanej powierzchni,
 $(1 - \tau) W_{\text{atm}}$ – emisja promieniowania cieplnego z atmosfery na trasie pomiaru.

Temperatura badanego obiektu obliczana jest przez system komputerowy kamery termowizyjnej przy założeniu, że znane są następujące parametry pomiaru, które operator kamery wprowadza do systemu kamery:

- wartość współczynnika emisyjności badanej powierzchni (stały i jednakowy dla całej powierzchni) – jest to podstawowy parametr powierzchni badanego obiektu,
- temperatura otoczenia – jest niezbędna do kompensacji promieniowania odbitego od badanej powierzchni,
- temperatura atmosfery,
- wilgotność względna powietrza,
- odległość kamery od obiektu.

Trzy ostatnie parametry, tj. temperatura atmosfery, wilgotność względna powietrza oraz odległość kamery od obiektu, są niezbędne do korekty obrazu termalnego ze względu na pochłanianie promieniowania cieplnego na drodze od obiektu do obiektywu kamery oraz na zmniejszanie się transmisyjności atmosfery wraz ze zwiększaniem odległości. Wpływ wilgotności względnej powietrza na pomiar wzrasta w razie dużej jej wartości oraz dużej odległości stanowiska pomiarowego od obiektu.

Badania termowizyjne budynków należy wykonywać zgodnie z zasadami podanymi w rozdziale 6.3.5, szczególnie dotyczy to odpowiednich warunków pogodowych i wtedy ostatnia składowa w równaniu (6.4), odpowiedzialna za promieniowanie cieplne atmosfery znajdującej się między kamerą i badanym obiektem, jest pomijalnie mała. Wówczas kamerą termowizyjną mierzymy tzw. promienność całkowitą obiektu, to znaczy sumę emitowanego (składowa (a)), odbitego (składowa (b)) i niekiedy przepuszczanego przez przegrody przeźierne promieniowania cieplnego.

Parametrem, który w największym stopniu wpływa na wartość i dokładność mierzonej temperatury badanego elementu metodą termograficzną jest współczynnik emisyjności powierzchni, którego wartość dobieramy z tablic lub mierzymy na obiekcie. Na wyniki pomiarów wpływają również czynniki zewnętrzne, przede wszystkim środowiskowe. Zagadnienia te zostały przedstawione w rozdziale 6.4.1 i 6.4.2.

6.3.3. Zalety i ograniczenia badań termowizyjnych

Termograficzne badania budynków i innych obiektów budowlanych cechują się licznymi zaletami, które decydują o przewadze tej techniki pomiarowej nad innymi metodami. Do zalet badań termowizyjnych można zaliczyć:

- jest to metoda nieniszcząca, bezkontaktowa i nieinwazyjna,
- pomiary odbywają się w czasie rzeczywistym, jest to metoda praktycznie bezynercyjna, gdyż promieniowanie cieplne emitowane przez badaną powierzchnię dociera do kamery z prędkością fali elektromagnetycznej i jest natychmiast przez nią rejestrowane,
- dużą dokładność i szybkość pomiaru temperatury badanej powierzchni,
- pomiar nie zakłóca pola temperatury badanej powierzchni,
- pomiar temperatury odbywa się na relatywnie dużej powierzchni (w przypadku badań budynków są to powierzchnie od kilku do nawet kilkuset metrów kwadratowych),
- pomiary można prowadzić z odległości od kilku do kilkudziesięciu metrów od badanego obiektu, co ma znaczenie w przypadku pomiarów powierzchni trudno dostępnych,
- mierzone są wartości temperatury poszczególnych obszarów badanej powierzchni oraz identyfikowany jest zasięg obszarów izotermicznych,
- nie ma potrzeby wykwaterowania użytkowników budynków,
- promieniowanie cieplne (podczerwone, długofalowe, temperaturowe) jest promieniowaniem bezpiecznym dla otoczenia i dla operatora kamery termowizyjnej,
- metoda gwarantuje szeroki zakres zastosowań do badań w budownictwie – szczegółowe omówienie tego zagadnienia przedstawiono w rozdziale 6.7.1,
- wykrywalność nieciągłości izolacji cieplnej w przegrodach budowlanych i w instalacjach przemysłowych jest dużo większa niż z użyciem innych metod pomiarowych,
- szeroki zakres mierzonej temperatury (od kilkudziesięciu stopni Celsjusza poniżej zera do kilkudziesięciu i kilkuset stopni Celsjusza, a po zastosowaniu odpowiednich obiektów nawet do 2000 °C),
- możliwość elektronicznej archiwizacji danych pomiarowych,
- możliwość rejestracji i przetwarzania termogramów w dużej liczbie opcji termogramów kolorowych, wśród których jest do wyboru kilka podstawowych i kilka-

dziesiąt dodatkowych tzw. palet kolorów (rodzajów termogramów kolorowych), które w zależności od rodzaju badanego obiektu i warunków pomiarowych mogą ułatwić interpretację termogramów,

- możliwość precyzyjnej obróbki termogramów specjalistycznymi programami komputerowymi,
- w porównaniu do innych metod badawczych jest najbardziej efektywną metodą pomiarów, co oznacza, że gwarantuje najlepsze wyniki w stosunku do poniesionych kosztów badania.

Termowizyjna metoda badań budynków i innych obiektów budowlanych ma również wady i ograniczenia, które w wielu przypadkach eliminują tę technikę pomiarową.

Do wad i ograniczeń badań termowizyjnych można zaliczyć:

- ograniczenie pomiarów budynków mieszkalnych, użyteczności publicznej i produkcyjnych do sezonu ogrzewczego – wymagania minimalnej różnicy temperatury powietrza po obu stronach przegrody to 10 K, a absolutne minimum to 5 K; na podstawie wieloletniego doświadczenia pomiarowego Autor zaleca jednak wartość minimalnej różnicy temperatury na poziomie co najmniej 15 K, optymalna wartość to 20 K (ograniczenie do okresu zimowego),
- w przypadku budynków chłodzonych całorocznie (np. magazyny chłodnicze o temperaturze od 0 do +5 °C, komory zamrażalnicze o temperaturze od –27 do –32 °C) badania termowizyjne należy wykonywać w nocy w okresie lata (ograniczenie do okresu letniego),
- silne uzależnienie przeprowadzania pomiarów od dogodnych warunków pogodowych (brak opadów atmosferycznych, mgły, mżawki, mała prędkość wiatru itp.), stabilna temperatura powietrza na 2–3 dni przed pomiarami i w trakcie pomiarów (patrz rozdz. 6.3.5),
- pomiary należy wykonywać kilka godzin po zachodzie słońca, niedopuszczalne jest wykonywanie pomiarów w ciągu dnia przy widocznym słońcu (pomiary można wykonywać w ciągu dnia, ale jedynie przy całodziennym zachmurzeniu gęstymi chmurami kłębiastymi – patrz dodatkowy komentarz w rozdz. 6.3.5),
- wymaganie dobrego dostępu do badanego budynku lub innego obiektu – wymaganie braku przeszkód terenowych, odpowiedniego „kąta patrzenia” kamery na badaną przegrodę (kąt między normalną do badanej powierzchni i osią obiektywu kamery – optymalny kąt pomiarowy to do 30°, dopuszczalny kąt to do 45°, a w wyjątkowych przypadkach nie powinien przekraczać 50°, w zależności od właściwości radiacyjnych badanej powierzchni),
- wymaganie znajomości wartości współczynnika emisyjności badanej powierzchni i średniej temperatury promieniowania otoczenia,
- badania przegród przeziernych, głównie okien, z założenia są obarczone pewnymi błędami; poprawne wykonanie termowizyjnych badań okien wymaga zastosowania odpowiednich warunków pomiarowych i aparatury w laboratorium; ba-

dania okien w budynkach są badaniami porównawczymi, względnymi (zagadnienie to omówiono w rozdz. 6.7.3),

- wciąż jeszcze wysoki koszt kamery (mimo obniżania cen) i aparatury pomocniczej, a w przypadku termografii aktywnej także wysoki koszt aparatury do stymulacji cieplnej,
- wysoki koszt specjalistycznego oprogramowania komputerowego do obróbki termogramów.

Uwzględnienie w pomiarach wskazanych zalet i ograniczeń metody badawczej oraz przestrzeganie procedury i podstawowych zasad wykonywania pomiarów pozwala na efektywne wykorzystanie badań termowizyjnych w budownictwie.

6.3.4. Procedura wykonywania badań termowizyjnych

Wykonywanie termowizyjnych badań budynków i obiektów budowlanych sprowadza się do przestrzegania procedury badawczej przedstawionej w normie PN-EN 13187:2001 [217]. Ponieważ norma ta jest tłumaczeniem normy ISO 6781:1983 [220], dotyczącej pomiarów lekkich domów w technologii szkieletu drewnianego (z wypełnieniem wełną mineralną), poniżej przedstawiono tę procedurę badawczą uzupełnioną o wnioski wynikające z wieloletniego doświadczenia Autora w wykonywaniu pomiarów termowizyjnych i ekspertyz budowlanych. Tak skonstruowana procedura wykonywania badań termowizyjnych jest następująca:

Etap I – etap organizacyjny, którego głównym zadaniem jest:

- zapoznanie się z obiektem badań – przeprowadzenie wizji lokalnej z oceną możliwości technicznych wykonania pomiarów i dostępu do obiektu,
- zapoznanie się z dostępną dokumentacją techniczną, z zakresem uprzednio przeprowadzonych prac remontowych, z historią obiektu itp.,
- ustalenie orientacji budynków względem stron świata,
- określenie emisyjności powierzchni materiałów (rozdz. 6.4.1),
- określenie przewidywanego rozkładu temperatury na powierzchniach przegród, na podstawie doświadczeń pomiarowych, ewentualnie wprowadzenie danych geometrycznych i materiałowych do programów komputerowych symulujących trójwymiarową (3D) i/lub dwuwymiarową (2D) wymianę ciepła przez przegrody budowlane,
- oszacowanie wpływu skutków powodowanych przez wentylowane warstwy powietrzne, np. w ścianach i/lub połaciach dachowych, oszacowanie wpływu wentylacji, szachtów instalacyjnych, szybów windowych, rozmieszczenia grzejników itp. na rozkład temperatury na powierzchniach przegród,

- uzgodnienie całkowitego odsunięcia mebli od ścian w przypadku badań danego lokalu mieszkalnego (lub pomieszczenia biurowego) od strony wewnętrznej lub odsunięcie mebli w stopniu umożliwiającym przepływ ciepła podczas badania danego pomieszczenia jedynie od strony zewnętrznej,
- w przypadku budynków jeszcze nieużytkowanych, spowodowanie ich normalnego (docelowego) ogrzewania na 2–3 dni przed i w trakcie pomiarów,
- ustalenie szczegółowego zakresu, terminu i warunków wykonania badań, po przeprowadzeniu czynności jak wyżej,
- śledzenie prognozy pogody i rejestrowanie temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego na 2–3 dni przed i w trakcie pomiarów (rozdz. 6.3.5), temperaturę powietrza należy mierzyć z dokładnością do $\pm 0,5$ °C,
- odnotowywanie informacji na temat zachmurzenia, opadów atmosferycznych, wilgotności względnej powietrza zewnętrznego oraz prędkości i kierunku wiatru w dniach poprzedzających pomiar i w czasie pomiaru.

Etap II – główny etap badań, polegający na przeprowadzeniu termowizyjnych badań obiektu, tzn. głównym zadaniem tego etapu jest:

- wyregulowanie kamery termowizyjnej zgodnie z instrukcją oraz wprowadzenie do systemu kamery niezbędnych parametrów wejściowych, tj. współczynnika emisyjności powierzchni (rozdz. 6.4.1), zakresu pomiarowego temperatury, temperaturę powietrza, temperaturę promieniowania, odległość od obiektu, wilgotność względną powietrza itp., w celu uzyskania możliwie największej rozdzielczości termicznej w warunkach pomiaru i dokładności pomiaru temperatury,
- stabilizacja temperaturowa kamery termowizyjnej przez ok. 30 min przed rozpoczęciem pomiarów od strony zewnętrznej i również przez ok. 30 min przed rozpoczęciem pomiarów w budynku,
- wykonanie pomiarów termowizyjnych zgodnie z zasadami wykonywania pomiarów (patrz poniżej) – badania termowizyjne budynków powinno się wykonywać od strony zewnętrznej oraz od strony pomieszczeń,
- wykonanie termogramów wybranych fragmentów badanej przegrody od strony zewnętrznej, w tym:
 - termogramów części przegrody bez defektów – najczęściej są to miejsca o najmniejszym zróżnicowaniu rozkładu temperatury na powierzchni,
 - termogramów części przegrody z defektami izolacji cieplnej (brak izolacji lub mniejsza grubość), z infiltracją powietrza lub z fragmentami zawilgoconymi – w takich przypadkach zróżnicowanie temperatury badanej powierzchni najczęściej jest największe,

- w trakcie pomiarów należy:
 - rejestrować temperaturę i wilgotność względną powietrza zewnętrznego i w pomieszczeniach mierzyć prędkość i kierunek wiatru, rejestrować inne zjawiska meteorologiczne występujące w trakcie wykonywania pomiarów i mające wpływ na wyniki pomiarów,
 - zaznaczyć na planie i numerować kolejne stanowiska pomiarowe oraz numerować kolejne termogramy, zapisywać (lub nagrywać) uwagi i odległości każdego stanowiska od obiektu oraz inne informacje, które mogą być przydatne w interpretacji termogramów,
 - umiejscowić każdy termogram na planie dołączonym do raportu z badań,
 - wykonywać zdjęcia fotograficzne badanych fragmentów obiektu niezależnie od wykonywania zdjęć aparatem wbudowanym w kamerę, który daje gorszą jakość zdjęć,
- w przypadku badania powierzchni dobrze odbijających promieniowanie cieplne (o dużym współczynniku odbicia) najlepiej jest je badać z różnych pozycji, należy unikać badania w kierunku prostopadłym do powierzchni (rozdz. 6.4.1),
- pomiary od strony zewnętrznej poza ewidentnym uzyskaniem oglądu całego budynku, pozwalają również na wytypowanie lokali mieszkalnych (bądź pomieszczeń biurowych) do szczegółowych badań od strony pomieszczenia,
- wykonanie pomiarów termowizyjnych od strony wewnętrznej w wybranych pomieszczeniach, zwracając uwagę na czynniki wpływające na współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni przegrody, tj. na ruch powietrza w pomieszczeniu, źródła promieniowania cieplnego (grzejniki, oświetlenie, włączone urządzenia itp.) oraz na powierzchniową kondensację wilgoci,
- opracowanie (obróbka) termogramów, ich analiza, przeprowadzenie interpretacji termogramów oraz opracowanie wniosków i zaleceń dla zlecającego badania; termogramy powinny być przedstawione w sposób ujednolicony, co ułatwia porównywanie wyników badań dla badanych grup budynków,
- ze względu na wykazany szeroki zakres czynności podczas badań, zaleca się, aby zespół pomiarowy składał się co najmniej z dwóch osób.

Etap III – wykonanie raportu z badań – układ raportu z badań termowizyjnych jest w dużym stopniu zbieżny z układem poprawnie wykonanej ekspertyzy budowlanej. Dla zleceniodawcy najważniejszą częścią raportu jest:

- ocena stanu izolacyjności cieplnej termicznej obudowy budynku, identyfikacja mostków cieplnych, miejsc infiltracji powietrza oraz miejsc zawilgocenia przegród wraz z jednoznaczną interpretacją termogramów,

- ustalenie przyczyn występujących nieprawidłowości,
- podanie wniosków i zaleceń wynikających z przeprowadzonych badań i analiz.

Niekiedy, zgodnie z ustalonym wcześniej zakresem prac, w raporcie należy ustosunkować się do projektu budowlanego w części dotyczącej ochrony cieplnej budynków (sprawdzenie obliczeń cieplno-wilgotnościowych, rozwiązania detali, izolacji mostków cieplnych itp.) i/lub do wykonawstwa robót w zakresie izolacji termicznych, z podaniem jednoznacznej oceny i wniosków.

Do raportu z badań termowizyjnych należy bezwzględnie dołączyć zarejestrowane dane świadczące o poprawności przeprowadzonych badań, w tym przebieg temperatury powietrza zewnętrznego na 2–3 dni przed pomiarem i w trakcie pomiarów, przebieg temperatury powietrza wewnątrz budynku, zarejestrowaną wilgotność względną powietrza po obu stronach przegrody, prędkość i kierunek wiatru, informację o czasie przeprowadzonych badań (data, godzina rozpoczęcia i zakończenia), informacje o braku opadów atmosferycznych itp. oraz dokument poświadczający ważność kalibracji kamery.

Na rynku dostępne są specjalistyczne programy komputerowe do sporządzania raportów z badań termowizyjnych. Jednak zdaniem autora programy te mogą stanowić jedynie uzupełnienie właściwego raportu z badań, np. w postaci załącznika. Sugerowany zakres i zawartość raportu z badań termograficznych przedstawiono w rozdziale 6.8.

6.3.5. Zasady wykonywania badań termowizyjnych

Głównym problemem wykonywania termowizyjnych pomiarów budynków i obiektów budowlanych, zarówno pomiarów jakościowych, jak i ilościowych, jest wyeliminowanie czynników zakłócających obrazy termalne badanych elementów i utrudniających interpretację termogramów. Dotyczy to zarówno czynników istotnie wpływających na pomiary, jak i tych przypadkowych. Aby tego uniknąć, w trakcie badań termowizyjnych należy bezwzględnie przestrzegać zasad wykonywania tego typu pomiarów. Dotyczy to zarówno 2–3 dniowego okresu przed badaniami, jak i spełnienie odpowiednich wymagań w trakcie badań.

Środowisko termiczne wewnątrz ogrzewanych budynków i obiektów budowlanych jest zazwyczaj stabilne i raczej nie powoduje większych zakłóceń pomiarowych. Natomiast niestabilne środowisko zewnętrzne jest najczęstszą przyczyną zakłóceń i błędów pomiarowych, głównie dotyczy to wielkości meteorologicznych, zmieniających się w cyklu rocznym, sezonowym, miesięcznym, tygodniowym i dobowym. Wpływ czynników zewnętrznych na pomiary termowizyjne, takich jak promieniowanie sło-

neczne, prędkość wiatru, zachmurzenie oraz opady atmosferyczne omówiono w rozdziale 6.4.2.

Zasady wykonywania badań termowizyjnych w budownictwie są zawarte w normie PN-EN 13187:2001 [217]. Poniżej przedstawiono te zasady uzupełnione o wnioski (sugestie) wynikające z doświadczeń pomiarowych autora:

- Minimalna różnica temperatury powietrza po obu stronach badanej przegrody powinna wynosić 10 K (według normy absolutne minimum to 5 K). Doświadczenie pomiarowe autora wskazuje jednak, że najdokładniejsze wyniki badań uzyskuje się przy różnicy temperatury powietrza co najmniej 15 K, a optymalna różnica temperatury to ok. 20 K. Dotyczy to zarówno budynków ogrzewanych (badania termowizyjne w zimie), jak i budynków całorocznie chłodzonych (badania termowizyjne w lecie). W praktyce oznacza to, że w zimie optymalna temperatura powietrza zewnętrznego do badań termowizyjnych zawiera się w przedziale od -3 do $+3$ °C, najlepiej przy całkowitym zachmurzeniu nieba.
- Oczywiście można wykonywać pomiary w niższej temperaturze powietrza zewnętrznego, np. w temperaturze w zakresie od -10 do -15 °C, w zależności od technicznych możliwości kamery termowizyjnej. Taki pomiar teoretycznie daje dokładniejsze wyniki badań z uwagi na większą różnicę temperatury powietrza po obu stronach przegrody. Z drugiej jednak strony, występowanie temperatury powietrza na poziomie -10 do -15 °C jest związane z występowaniem warunków bezchmurnego nieboskłonu, zarówno w dzień (oddziaływanie promieniowania słonecznego na budynki), jak i w nocy (chłodzenie radiacyjne przegród budowlanych, rozdz. 5.2). W takich warunkach pogodowych występuje zdecydowanie większa niestabilność termiczna otoczenia i większe wahania temperatury powietrza. Badanie termowizyjne w takich warunkach pogodowych wymaga od operatora kamery dużego doświadczenia pomiarowego i szerokiej wiedzy z zakresu radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego na budynek oraz radiacyjnej wymiany ciepła budynku z otoczeniem.
- Z podanych rozważań wynika, że bardzo korzystne warunki do termowizyjnego badania budynków występują podczas całkowitego zachmurzenia i w temperaturze powietrza zewnętrznego około 0 °C. Wówczas występują małe wahania temperatury powietrza, najczęściej przez kilka dni. W takich warunkach stabilna jest również temperatura otoczenia wokół budynków.
- Zaleca się zatem, aby wykonywać pomiary podczas pełnego zachmurzenia nieboskłonu wieczorem i w nocy, dzięki czemu unika się problemów związanych z chłodzeniem radiacyjnym przegród budowlanych i z interpretacją termogramów. W przypadku badań przy bezchmurnym nieboskłonie należy bardzo ostrożnie podejść do interpretacji termogramów.
- Na co najmniej 2–3 dni przed pomiarami nie może być zbyt dużych wahań temperatury powietrza zewnętrznego, przebieg tej temperatury powinien być stabilny i wynosić średnio od około $+5,0$ °C do około -5 °C (oczywiście temperatura po-

wietrza może być niższa, ale również stabilna). Przebieg temperatury powietrza zewnętrznego powinien być rejestrowany z krokiem czasowym, np. co 15–20 minut i dołączony do raportu z badań.

- W czasie pomiarów temperatura powietrza zewnętrznego może się zmieniać nie więcej niż $\pm 5^{\circ}\text{C}$, natomiast w pomieszczeniu $\pm 2^{\circ}\text{C}$ temperaturę należy rejestrować z zadanyim krokiem czasowym, np. co 15–20 minut, przebieg temperatury w pomieszczeniu również powinien być dołączony do raportu z badań.
- Należy zmierzyć lub przyjąć z tabel współczynnik emisyjności badanej powierzchni (rozdz. 6.4.1),
- Bezpieczne pomiary wykonuje się, gdy współczynnik emisyjności badanej powierzchni wynosi powyżej 0,8 (takim współczynnikiem charakteryzuje się większość tradycyjnych materiałów elewacyjnych), zaleca się zachować ostrożność, gdy współczynnik emisyjności mieści się w przedziale od 0,6 do 0,8, a bardzo dużą ostrożność należy zachować podczas wykonywania badań i interpretacji termogramów powierzchni o współczynniku emisyjności mniejszym niż 0,6 (patrz rozdz. 6.4.1).
- Niedopuszczalne jest wykonywanie pomiarów w ciągu dnia, ale pomiary w ciągu dnia są wyjątkowo dopuszczalne jedynie przy całodziennym całkowitym zachmurzeniu nieba chmurami kłębiastymi, w miesiącach od listopada do lutego. W miesiącach październik, marzec i kwiecień, nawet przy całkowicie zachmurzonym niebie, istnieje ryzyko zbyt silnego oddziaływania na budynki rozproszonego promieniowania słonecznego, które może zakłócić wyniki pomiarów.
- W czasie pomiarów nie mogą występować opady atmosferyczne, mgła i smog.
- Na trasie pomiarów nie może być przeszkód terenowych i zadymienia.
- Prędkość wiatru nie powinna przekraczać 2,0 m/s – wprawdzie dostępne są tabele ze współczynnikami korekcyjnymi do wyników badań, uwzględniającymi prędkość wiatru do 8 m/s, to jednak ze względu na możliwość znacznego schładzania badanej powierzchni i wprowadzania zakłóceń pomiarowych nie zaleca się wykonywać badań, gdy prędkość wiatru przekracza 2,0 m/s. Prędkość wiatru mierzymy na wysokości ok. 1,5 m nad terenem, prędkość wiatru na poziomie 5 czy 10 kondygnacji (odpowiednio ok. 15 i ok. 30 m nad terenem) jest zdecydowanie większa, co znacznie zakłóca wyniki pomiarów. Absolutnie nie zaleca się wykonywania pomiarów przy prędkości wiatru powyżej 5 m/s. Optymalne warunki pomiarowe to bezwietrzna pogoda lub mała prędkość wiatru do 1 m/s.
- Wymagany jest odpowiedni „kąt patrzenia” kamery na badaną przegrodę (kąt między normalną do badanej powierzchni i osią obiektywu kamery powinien wynosić maksymalnie do 30° , a w wyjątkowych przypadkach nie powinien przekraczać 45°). Stąd, należy zachować szczególną ostrożność w pomiarach górnych kondygnacji budynku wielopiętrowego w przypadku zbyt bliskiej odległości stanowiska pomiarowego od budynku lub w pomiarach powierzchni

nachylonej pod dużym kątem, np. absolutnie nie należy badać skośnych połaci dachowych z poziomu terenu.

- Jeżeli to możliwe, w interpretacji termogramów należy korzystać z „termogramów odniesienia” (rozdz. 6.6) lub z wyników symulacji komputerowych dwu- lub trójwymiarowego przepływu ciepła przez przegrody budowlane.

Przestrzeganie podanych zasad pozwala na prawidłowe wykonanie badań termowizyjnych, na poprawną interpretację termogramów i wyciąganie prawidłowych wniosków z badań, co z kolei skutkuje przedstawieniem najważniejszych dla zleceniodawcy wniosków i zaleceń.

Dla porównania przedstawiono wymagania, jakie powinny być spełnione w krajach skandynawskich [220] podczas badania budynków o lekkiej drewnianej konstrukcji szkieletowej:

- w okresie co najmniej 24 godzin przed początkiem pomiarów temperatura powietrza zewnętrznego nie powinna się różnić więcej niż o ± 10 °C od temperatury występującej na początku pomiarów,
- w okresie co najmniej 24 godzin przed rozpoczęciem badań i w trakcie badań różnica temperatury powietrza po obu stronach przegrody powinna wynosić nie mniej niż $3/U$, gdzie U jest teoretyczną wartością współczynnika przenikania ciepła przegrody, ale nie mniejszą niż 5 °C, (warunek $3/U$ oznacza, że dla przegrody o współczynniku przenikania ciepła równym 0,30 [W/(m²·K)], minimalna różnica temperatury powietrza po obu stronach przegrody powinna wynosić co najmniej 10 °C),
- w 12-godzinny okresie przed pomiarami i podczas pomiarów przegroda nie powinna być bezpośrednio nasłoneczniona,
- w czasie pomiarów temperatura powietrza zewnętrznego nie powinna zmieniać się więcej niż ± 5 °C, a temperatura powietrza wewnątrz budynku nie więcej niż ± 2 °C w stosunku do ich wartości na początku badań.

Wymagania te są nieco łagodniejsze, jeżeli chodzi o niezbędny czas stabilizacji temperatury w termicznej obudowie drewnianego budynku szkieletowego, wypełnionego wełną mineralną, ze względu na znacznie mniejszą masę termiczną takich budynków w porównaniu z budynkami wznoszonymi w Polsce.

Jak już wspomniano wcześniej, zasady wykonywania badań termowizyjnych w budownictwie w Polsce są zawarte w jednej normie PN-EN 13187:2001 [217]. W innych krajach, poza wymienioną, obowiązują jeszcze inne normy wyszczególnione poniżej:

- ASTM C 1060-90 (2003): *Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings* [218],
- ASTM E 1186-03: *Standard Practices for Air Leakage Site Detection in Building Envelopes and Air Barrier Systems* [219],

- ISO 6781: *Thermal Insulation – Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes – Infrared Method* [220],
- ISO-18436-1: *Condition monitoring of machines – Thermography Part 1: General procedures* [228],
- ISO-18436-7: *Condition monitoring and diagnostics of machined – Requirements for qualification and assessment of personnel, Part 7: Thermography* [230],
- Canadian General Standards Board, Document 149-GP-2MP, *Manual for Thermographic Analysis of Building Enclosures* [221],
- British Standard: *Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method. ISO6781:1983 modified. Canadian National Master Specifications (NMS), Section 02 27 13, Thermographic Assessment; Building Envelope* [222],

Podczas wykonywania termograficznych badań budynków w Polsce oczywiście należy przestrzegać postanowień przedstawionych w normie [217].

6.3.6. Termowizyjne badania ilościowe

Termowizyjne badania budynków służą głównie do jakościowej oceny przegród budowlanych i stąd na ich podstawie nie można dokonać ilościowej oceny cieplnych właściwości przegród budowlanych, np. nie można wyznaczyć całkowitego oporu cieplnego lub współczynnika przenikania ciepła, bez przeprowadzania w tym samym czasie dodatkowych pomiarów innych wielkości. Mimo że jakościowe badania termowizyjne budynków są wystarczające do oceny stanu izolacji cieplnej w przegrodach, w literaturze tematu od lat podejmowane są próby ilościowej oceny przegród z wykorzystaniem badań termowizyjnych – można wyróżnić trzy główne metody rozwiązania tego problemu:

- Metoda 1 – mierzona jest jedynie temperatura powietrza i powierzchni przegrody po obu jej stronach – jest to metoda najprostsza, ale najmniej dokładna.
- Metoda 2 – mierzona jest temperatura powietrza i powierzchni przegrody po obu jej stronach oraz gęstość strumienia przewodzonego ciepła – jest to metoda bardziej dokładna, ale też bardziej pracochłonna.
- Metoda 3 – mierzona jest temperatura powietrza i powierzchni przegrody po obu jej stronach (podobnie jak w metodzie 1) oraz prowadzone są pomiary radiometryczne po obu stronach przegrody – metoda dokładna, ale również pracochłonna.

W każdym przypadku termowizyjnie mierzona jest temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody oraz temperatura powierzchni od strony pomieszczenia. Temperatura ta może być mierzona również kontrolnie bezkontaktowo pirometrem lub metodą kontaktową termoparami.

Poniżej przedstawiono ogólny opis poszczególnych metod badań.

Metoda 1 – pomiary jedynie odpowiedniej temperatury. W tej metodzie stosuje się dwa podejścia, polegające albo na zdefiniowaniu tak zwanego indeksu temperaturowego, albo na wykonaniu klasycznych pomiarów i obliczeń z zakresu ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła przez przegrody budowlane. Indeksy temperaturowe mają za zadanie wstępnie oszacować wartość współczynnika przenikania ciepła badanej przegrody budowlanej. Najczęściej cytowanym jest powszechnie znany tzw. indeks temperaturowy TI (znany obecnie jako bezwymiarowa temperatura powierzchni przegrody), podany w postaci:

$$TI = \frac{v_i - t_e}{t_i - t_e} \quad (6.5)$$

lub

$$TI = \frac{t_i - v_e}{t_i - t_e} \quad (6.6)$$

gdzie: v_i – temperatura przegrody od strony pomieszczenia, [°C],
 v_e – temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody, [°C],
 t_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, [°C],
 t_e – temperatura powietrza zewnętrznego, [°C].

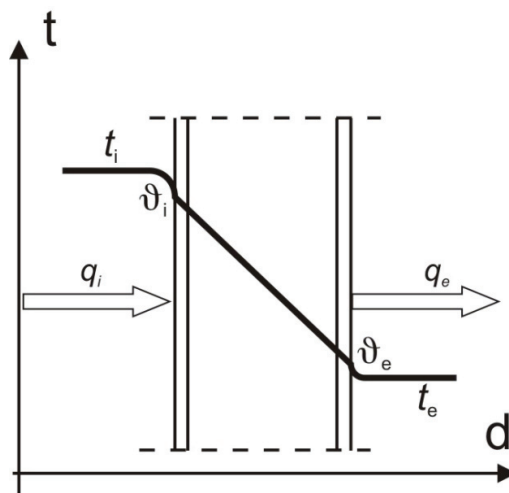
Częściej stosowany jest indeks temperaturowy opisany równaniem (6.5) ze względu na bardziej stabilną temperaturę powierzchni przegrody od strony pomieszczenia. Indeks temperaturowy TI może być przybliżoną miarą izolacyjności cieplnej przegrody budowlanej. Prosta postać wyrażenia (6.5) umożliwia zestawianie ze sobą wyników pomiarów wykonywanych w różnych warunkach pogodowych i porównywanie różnych przegród. Z równania (6.5) wynika również, że im większa jest wartość indeksu TI , tym większy jest opór cieplny przegrody.

Wartość współczynnika przenikania ciepła przegrody budowlanej można również wyznaczyć, korzystając z klasycznych równań ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła przez przegrodę. W takich warunkach przepływu ciepła przez ścianę zewnętrzną gęstości strumienia ciepła napływającego na przegrodę, przewodzonego przez przegrodę oraz przejmowanego na zewnętrznej powierzchni przegrody są sobie równe i opisane równaniami (6.7)–(6.9). Na rysunku 6.10 pokazano schemat ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła przez przegrodę budowlaną.

Poszczególne gęstości strumienia ciepła wynoszą:

$$q_i = h_i(t_i - v_i) \quad (6.7)$$

$$q_R = \frac{(v_i - v_e)}{R} \quad (6.8)$$



Rys. 6.11. Schemat ustalonego przenikania ciepła przez przegrodę budowlaną

$$q_e = h_e (\vartheta_e - t_e) \quad (6.9)$$

Zachodzi również związek:

$$q = U (t_i - t_e) \quad (6.10)$$

- gdzie: t_i, t_e – temperatura powietrza, odpowiednio, w pomieszczeniu i na zewnątrz, [°C],
 ϑ_i, ϑ_e – temperatury powierzchni przegrody, odpowiednio, od strony pomieszczenia i powierzchni zewnętrznej, [°C],
 h_i – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, [W/(m²·K)],
 h_e – współczynnik przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody, [W/(m²·K)],
 R – opór cieplny przegrody, [m²·K/W],
 U – współczynnik przenikania ciepła, [W/(m²·K)],
 q_i, q, q_e – gęstość strumienia ciepła, odpowiednio, napływającego na przegrodę, przewodzonego przez przegrodę i odpływającego z przegrody, [W/m²].

Jednocześnie zachodzi zależność:

$$q_i = q_R = q_e = q \quad (6.11)$$

Korzystając z równania (2.43) oraz z równań (6.7) i (6.9), można obliczyć wartość współczynnika przenikania ciepła U – gdy znana jest wartość temperatury zewnętrznej powierzchni przegrody:

$$U = \frac{h_e (\nu_e - t_e)}{t_i - t_e} \quad (6.12)$$

oraz gdy znana jest temperatura przegrody od strony pomieszczenia:

$$U = \frac{h_i (t_i - \nu_i)}{t_i - t_e} \quad (6.13)$$

Można zauważyć, że wzory (6.12) i (6.13) są mocno wrażliwe na wartości współczynników h_i oraz h_e , ale prostota tych wzorów jest pozorna, ponieważ o ile wartości temperatury powietrza po obu stronach przegrody oraz temperatury powierzchni przegrody można zmierzyć dokładnie, o tyle problem stwarza wyznaczenie lub przyjęcie wartości współczynników przejmowania ciepła. Współczynniki przejmowania ciepła h_i oraz h_e są sumą składowych związanych z konwekcyjną i radiacyjną wymianą ciepła powierzchni przegrody budowlanej z otoczeniem. W warunkach rzeczywistych wartość współczynnika przejmowania ciepła h_e może się zmieniać w granicach od około 14,0 W/(m²·K), dla warunków bezwietrznych, do około 35,0 W/(m²·K) przy większym wietrze (wartość normowa wynosi 25,0 W/(m²·K)). Natomiast wartość współczynnika przejmowania ciepła h_i może się zmieniać w granicach od około 7,5 W/(m²·K) do około 11,5 W/(m²·K) (wartość normowa wynosi 8,0 W/(m²·K)). Przyjmowanie normowych wartości tych współczynników powoduje wyznaczenie jedynie przybliżonej wartości współczynnika przenikania ciepła przegrody budowlanej. Natomiast wyznaczenie wartości tych współczynników za pomocą pomiarów wymaga, między innymi, precyzyjnego pomiaru prędkości wiatru przy zewnętrznej powierzchni ściany lub prędkości ruchu powietrza w pomieszczeniu przy powierzchni wewnętrznej. I dlatego stosowanie wzoru (6.13) gwarantuje uzyskiwanie bardziej „stabilnych” i dokładniejszych wartości współczynnika przenikania ciepła w porównaniu do wzoru (6.12), również z uwagi na bardziej stabilną temperaturę ν_i w porównaniu do temperatury ν_e .

Oczywiście pomiary termowizyjne wartości temperatury granicznych powierzchni przegrody należy wykonać zgodnie z zasadami podanymi w rozdz. 6.3.5.

Metoda 2 – pomiar gęstości strumienia ciepła. W tej metodzie wyznaczania współczynnika przenikania ciepła dla przegrody budowlanej za pomocą badań termowizyjnych, badania jak w metodzie 1, należy uzupełnić o pomiary gęstości strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę. Współczynnik przenikania ciepła U dla przegrody jest wyznaczany pośrednio poprzez pomiar oporu cieplnego przegrody, a następnie wyznaczeniu wartości jej całkowitego oporu cieplnego, korzystając ze wzorów (6.8) i (6.10). W tym celu w trakcie pomiarów termowizyjnych należy w tym samym czasie dodatkowo mierzyć:

- gęstość strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę za pomocą mierników płytowych (tzw. ciepłomierzy) – badanie metodą ścianki pomocniczej,
- temperaturę powierzchni przegrody (kamerą termowizyjną i dodatkowo termoparami),
- temperaturę powietrza po obu stronach przegrody,
- prędkość wiatru przy powierzchni zewnętrznej i prędkość przepływu powietrza tuż przy przegrodzie w pomieszczeniu.

Pomiar gęstości strumienia ciepła metodą ścianki pomocniczej, w warunkach ustalonych, opiera się na założeniu równości gęstości strumienia ciepła przenikającego przez badaną przegrodę i przenikającego przez umieszczony na badanej przegrodzie miernik płytowy o odpowiednio małym oporze cieplnym.

Zasady wykonywania pomiarów gęstości strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę są następujące:

- Należy stosować co najmniej 2, a doświadczenie badawcze pokazuje, że wskazane jest stosowanie od 3 do 5 mierników płytowych (ciepłomierzy), losowo rozmieszczonych do ściany zewnętrznej od strony pomieszczenia. Najczęściej stosowane są mierniki płytowe o wymiarach 90×90 mm lub 250×250 mm. W przypadku miernika 500×500 mm można stosować 1 miernik na ścianie.
- Mierniki płytowe mają za zadanie mierzyć gęstość jednokierunkowego strumienia ciepła, nie mogą zatem znajdować się w obszarze dwukierunkowego przepływu ciepła, np. zbyt blisko ościeży okiennych i drzwiowych lub zbyt blisko naroży pionowych i poziomych. Można przyjąć zasadę, że minimalna odległość ciepłomierza od wymienionych elementów powinna wynosić co najmniej 2,5 grubości badanej ściany, co w przypadku ściany o sumarycznej grubości 40 cm oznacza montaż mierników płytowych w odległości co najmniej 1,0 m od naroża.
- W pobliżu mierników nie mogą być meble, obrazy i źródła ciepła zakłócające pomiary, również nie może być użytkownik pomieszczeń.
- Czas trwania pomiarów – nie ma jednoznacznej odpowiedzi na pytanie jak długo powinien trwać pomiar: kilka czy kilkadziesiąt godzin, kilka, kilkanaście czy nawet kilkadziesiąt dni, gdyż zależy to od:
 - temperatury powietrza po obu stronach przegrody, jej zmian w czasie oraz od 2–3 dniowego przebiegu poprzedzającego pomiar,
 - oporu cieplnego przegrody, jej pojemności cieplnej oraz od orientacji względem stron świata,
 - wpływu warunków atmosferycznych (opadów, nasłonecznienia, kierunku i prędkości wiatru itp.),
 - w niektórych opracowaniach sugeruje się [159], że pomiar przebiega odpowiednio długo, gdy uśredniony opór cieplny przegrody obliczony na podstawie danych z ostatniej doby różni się nie więcej niż o 5% od średniej obliczonej dla przedostatniej doby,

- termicznej masy przegrody – doświadczenie wskazuje, że czas pomiaru zależy głównie od masy przegrody, przy czym na 2–3 dni przed pomiarami powinny występować stabilne warunki pogodowe (patrz rozdz. 6.3.3), a zalecany minimalny czas pomiarów to co najmniej 6–7 dni,
- pomiary powinny trwać w okresie pełnej wielokrotności 24 godzin,
- O ile jest to możliwe, badana ściana powinna mieć orientację północną, dzięki czemu zostanie wyeliminowany zakłócający wpływ nasłonecznienia.
- Wskazane jest wykonywanie pomiarów w czasie dni z pełnym zachmurzeniem nieboskłonu (ograniczenie wpływu chłodzenia radiacyjnego przegród).

Wszystkie dane pomiarowe powinny być rejestrowane w takich samych odstępach czasu, np. co 5–10 minut. Jako wynik badań oblicza się uśrednioną z całego okresu pomiarowego wartość oporu cieplnego przegrody, następnie po wyznaczeniu oporów przejmowania ciepła oblicza się całkowity opór cieplny przegrody i jej współczynnik przenikania ciepła.

Wyniki badań powinny być opracowane statystycznie.

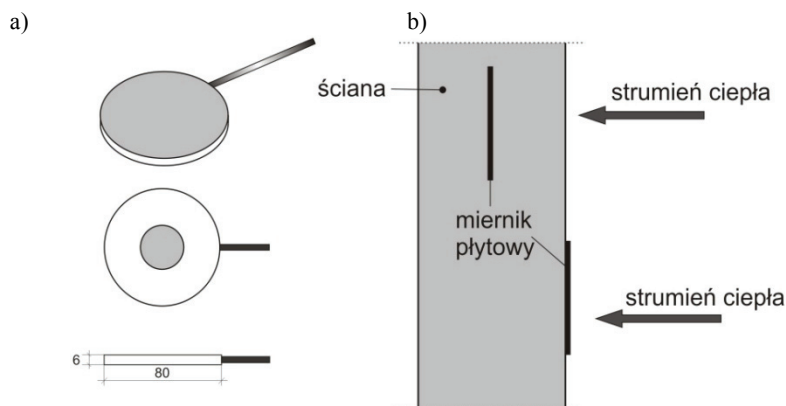
Ponieważ opisane badania są pracochłonne, przed zasadniczymi pomiarami należy wykonać termowizyjne badania budynku od strony zewnętrznej w celu wytypowania mieszkania reprezentatywnego, w którym zostaną przeprowadzone badania szczegółowe z użyciem ciepłomierzy.

Na rysunku 6.12 pokazano miernik płytowy, popularnie zwany ciepłomierzem, do pomiaru gęstości strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę budowlaną. Ciepłomierze umieszczamy zawsze po cieplejszej stronie przegrody, tj. w budynkach ogrzewanych na przegrodach (najczęściej na ścianach zewnętrznych) od strony pomieszczenia, natomiast w budynkach całorocznie chłodzonych na zewnętrznej powierzchni przegród.

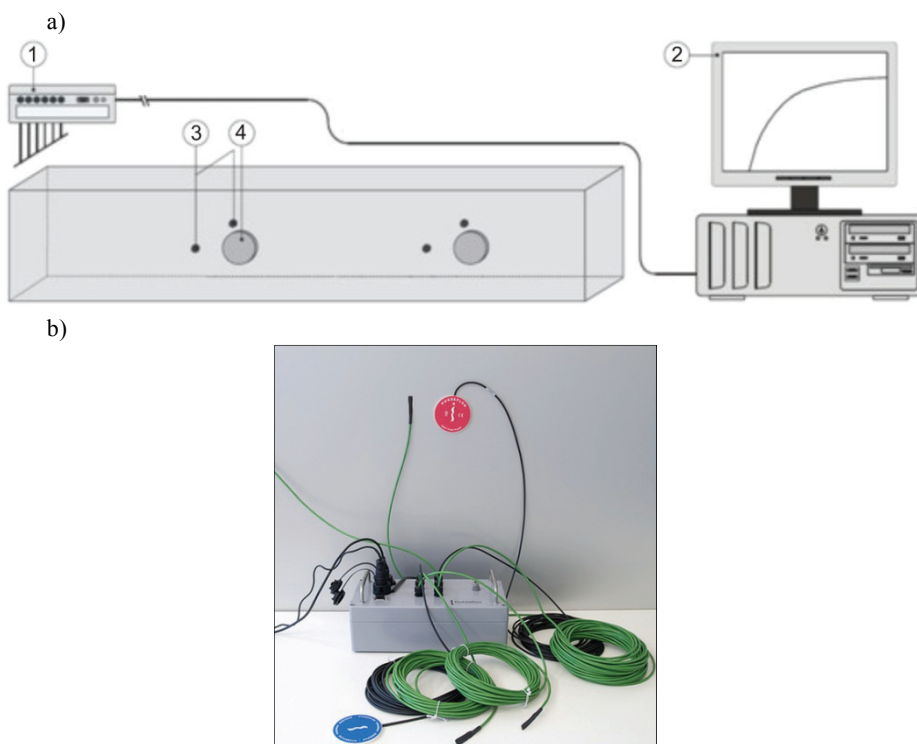
Przykładowy zestaw aparatury do pomiaru oporu cieplnego przegród budowlanych pokazano na rysunku 6.13.

Metoda 3 – pomiary jedynie odpowiedniej temperatury oraz pomiary radiometryczne. W tej metodzie wyznaczania wartości współczynnika przenikania ciepła badania jak w metodzie 1 należy uzupełnić o pomiary radiometryczne średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego i średniej temperatury promieniowania w pomieszczeniu.

Jak wspomniano w rozdziale 2.2.4, wzory stosowane do opisu jednokierunkowego ustalonego przepływu ciepła przez przegrody budowlane zostały wyprowadzone przy założeniu równości temperatury powietrza zewnętrznego i średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego, reprezentującej wpływ cieplnego promieniowania najbliższego otoczenia budynków. Założenie to jest dużym uproszczeniem i sprawia, że w obliczeniach wpływ cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynki nie odzwierciedla rzeczywistych radiacyjnych zmian tego środowiska. Jak wykazano w rozdziale 5.3, średnia temperatura promieniowania nieboskłonu,



Rys. 6.12. Miernik płytowy (ciepłomierz) do pomiaru gęstości strumienia ciepła przenikającego przez przegrodę budowlaną: a) widok ogólny miernika płytowego, b) możliwe miejsca mocowania miernika płytowego [95]



Rys. 6.13. Zestaw aparatury do pomiaru oporu cieplnego przegród budowlanych: a) schemat układu pomiarowego, 1 – rejestrator, 2 – komputer, 3 – dwie pary termopar, 4 – dwa mierniki płytowe (ciepłomierze), b) zdjęcie zestawu pomiarowego [95]

przy bezchmurnym niebie w nocy, dla płaszczyzny poziomej, może być niższa od temperatury powietrza średnio o około 20 °C, co często powoduje występowanie chłodzenia radiacyjnego przegród (patrz rozdz. 5.2).

W roku 1980 na ten problem zwrócili Michalczyk i Nowak [103], którzy zaproponowali sposób prowadzenia pomiarów składowych bilansu cieplnego przegród budowlanych za pomocą urządzenia termowizyjnego, z uwzględnieniem zarówno temperatury powietrza zewnętrznego, jak i średniej temperatury promieniowania otoczenia poprzez wprowadzenie tzw. „temperatury operatywnej” (ang. *operative temperature*, często w literaturze technicznej błędnie tłumaczona jako „temperatura operacyjna”) jako łącznego wskaźnika cieplnej oceny środowiska zewnętrznego. Głównym celem ich pracy była propozycja pomiaru współczynnika przenikania ciepła przegród budowlanych za pomocą badań kamerą termowizyjną, bez konieczności pomiaru gęstości strumienia przepływającego ciepła. Prawdopodobnie była to pierwsza w Polsce publikacja, w której podjęto próbę opisu matematycznego ilościowej oceny cieplnych właściwości przegród budowlanych za pomocą badań termowizyjnych, bez konieczności pomiaru gęstości strumienia przepływającego ciepła.

Jak wykazano w rozdziale 2.2.4, na powierzchniach granicznych przegrody budowlanej występuje złożona wymiana ciepła zakładająca, że gęstość strumienia ciepła na rozpatrywanej powierzchni przegrody jest równa sumie gęstości strumieni cieplnych przekazywanych przez konwekcję i promieniowanie (wzór (2.23)). Oznacza to, że wypadkowy przepływ ciepła z zewnętrznej powierzchni przegrody następuje drogą promieniowania do temperatury radiacyjnej otoczenia t_r oraz przez konwekcję do temperatury powietrza t_e . W pracy [103] wprowadzono jedną temperaturę, będącą łącznym wskaźnikiem cieplnej oceny środowiska fizycznego, uwzględniającym temperaturę radiacyjną otoczenia i temperaturę powietrza. Wskaźnik ten jest znany w fizyce środowiska jako temperatura operatywna t_{op} [103], która wyraża się następującymi wzorami:

$$t_{op,i} = \frac{h_{ci}t_i + h_{ri}t_{ri}}{h_{ci} + h_{ri}} \quad (6.14)$$

$$t_{op,i} = \frac{h_{ce}t_e + h_{re}t_{re}}{h_{ce} + h_{re}} \quad (6.15)$$

gdzie: t_i, t_e – temperatura powietrza, odpowiednio, w pomieszczeniu i na zewnątrz, [°C],

t_{ri}, t_{re} – średnia temperatura promieniowania, odpowiednio, w pomieszczeniu i na zewnątrz, [°C],

h_{ci}, h_{ce} – współczynnik przejmowania ciepła przegrody przez konwekcję, odpowiednio, w pomieszczeniu i od strony zewnętrznej, [W/(m²·K)],

h_{ri}, h_{re} – współczynnik przejmowania ciepła przegrody przez promieniowanie, odpowiednio, w pomieszczeniu i od strony zewnętrznej, [W/(m²·K)],

przy czym:

$$h_i = h_{ci} + h_{ri} \quad (6.16)$$

$$h_e = h_{ce} + h_{re} \quad (6.17)$$

W związku z tym gęstość ustalonego strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę można zapisać w postaci:

$$q = h_e (\nu_e - t_{op,e}) = \frac{(\nu_i - \nu_e)}{R} = U (t_{op,i} - t_{op,e}) \quad (6.18)$$

Gdy temperatura radiacyjna otoczenia jest równa temperaturze powietrza (np. przy całkowicie zachmurzonym nieboskłonie), zachodzi związek:

$$t_{op,e} = t_r = t_e \quad (6.19)$$

i obliczenia przeprowadza się zgodnie z przedstawionymi w metodzie 1 klasycznymi wzorami wymiany ciepła przez przegrody budowlane.

Zaproponowana przez Michalczyka i Nowaka [103] metoda względnych pomiarów lokalnych oporów cieplnych oraz współczynników przenikania ciepła przegrody budowlanej za pomocą pomiarów termowizyjnych polega na wydzieleniu w przekroju przegrody zdefektowanych miejsc, wyznaczeniu dla jednego miejsca (przekroju) całkowitego oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła, który stanowi niejako „reper cieplny”, do którego odnoszone są wszystkie pozostałe pomiary. Metoda ta eliminuje konieczność pomiaru w każdej zdefektowanej części przegrody gęstości przepływającego strumienia ciepła (nie wykonuje się pomiarów za pomocą ciepłomierzy) i ograniczona jest do pomiaru jedynie pola temperatury na powierzchni zewnętrznej kamerą termowizyjną. W trakcie pomiarów należy przeprowadzić pomiary radiometryczne radiometrami różnicowymi w celu wyznaczenia wartości temperatury operatywnej środowiska zewnętrznego i w pomieszczeniach.

Uogólniając opis podanych metod ilościowej oceny cieplnych właściwości przegród budowlanych metodą termowizyjną, należy zwrócić uwagę, że definicja współczynnika przenikania ciepła, obowiązująca dla ustalonych warunków przepływu ciepła, jest w dużej sprzeczności z warunkami przenikania ciepła przez przegrody budowlane w warunkach rzeczywistych, które praktycznie są zawsze nieustalone w czasie (rozdz. 2.3.3). Skutki nieustalonego przepływu ciepła przez przegrody budowlane można nieco zniwelować poprzez wykonywanie pomiarów w miarę stabilnych okresowych warunkach pogodowych (rozdz. 6.3.4), ale tak uwarunkowana

wymiana ciepła i tak jest niestabilna w czasie. Warto zwrócić uwagę, że ustalone warunki przepływu ciepła przez przegrody budowlane można zapewnić jedynie w komorach klimatycznych. Ilościowe pomiary na obiektach rzeczywistych należy prowadzić w okresach co najmniej kilkudniowych, przy odpowiednich stabilnych warunkach pogodowych, z uśrednianiem wartości przebiegów poszczególnych mierzonych wielkości. W tego typu badaniach największą trudność sprawia pomiar prędkości wiatru przy ścianach na różnej wysokości budynku i przy połaciach dachowych. Prędkość wiatru przy zewnętrznej powierzchni przegrody jest niezbędna do wyznaczenia oporu przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody. Przyjmowanie normowych wartości oporu przejmowania ciepła, zwłaszcza od strony zewnętrznej, w tym przypadku powoduje, że cały pomiar prowadzi jedynie do szacowania, a nie wyznaczania całkowitego oporu cieplnego przegrody z uwagi na występujące zjawiska fizyczne związane z niestabilną wymianą ciepła i wskazane trudności pomiarowe (patrz również uwagi zawarte w rozdz. 2.2.1). W praktyce badawczej z uwagi na wskazane trudności pomiarowe niektórych wielkości dominuje jakościowa, a nie ilościowa ocena przegród pod kątem izolacyjności cieplnej. Z drugiej strony, w zdecydowanej większości przypadków ocena jakościowa stanu izolacyjności cieplnej przegród jest wystarczająca do oceny stanu izolacyjności cieplnej termicznej obudowy budynków.

6.4. Czynniki wpływające na dokładność pomiarów termowizyjnych

6.4.1. Czynniki środowiskowe oraz związane z kamerą i z obiektem badań

Jakość i skuteczność termowizyjnych badań w budownictwie jest funkcją wielu czynników związanych bezpośrednio z badanym obiektem, ze środowiskiem fizycznym, które je otacza, z możliwościami pomiarowymi kamery termowizyjnej oraz z wiedzą i doświadczeniem pomiarowym operatora kamery. Oprócz omówionego w następnym rozdziale bardzo istotnego elementu, jakim jest współczynnik emisyjności badanej powierzchni, na jakość i dokładność pomiarów termowizyjnych wpływ mają czynniki uszeregowane w następujących grupach tematycznych:

1. Dane techniczne kamery termowizyjnej – główne parametry użytkowe kamery to czułość termiczna (bardziej czuła kamera umożliwia bardziej dokładne pomiary w trudnych warunkach obrazowania), zakres widmowy, rozdzielczość przestrzenna (FOV, ang. *Field of View* – określa zdolność kamery do odróżnienia mierzonego przedmiotu od otoczenia i wpływa na dokładność pomiaru temperatury obiektu), dokładność pomiaru, zakres temperaturowy pomiaru, zakres temperaturowy pracy kame-

ry, tryby pracy, możliwość ustawiania różnych parametrów (opcje pracy z obrazami, pomiarami i alarmami), możliwość zmiany ustawień systemowych itp. Parametry techniczne kamer termowizyjnych są oczywiście specyficzne i zróżnicowane w zależności od zastosowań w różnych dziedzinach, takich jak budownictwo, przemysł i energetyka, medycyna, nauka, zastosowania specjalne itp.

2. Przygotowanie, wiedza i doświadczenie pomiarowe operatora kamery termowizyjnej.

3. Możliwości specjalistycznego oprogramowania do obróbki termogramów.

4. Kąt obserwacji kamery termowizyjnej.

5. Warunki pogodowe występujące na kilka dni przed i w trakcie pomiarów termowizyjnych.

6. Specyfika najbliższego otoczenia budynku oraz radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego.

7. Parametry techniczne termicznej obudowy budynku.

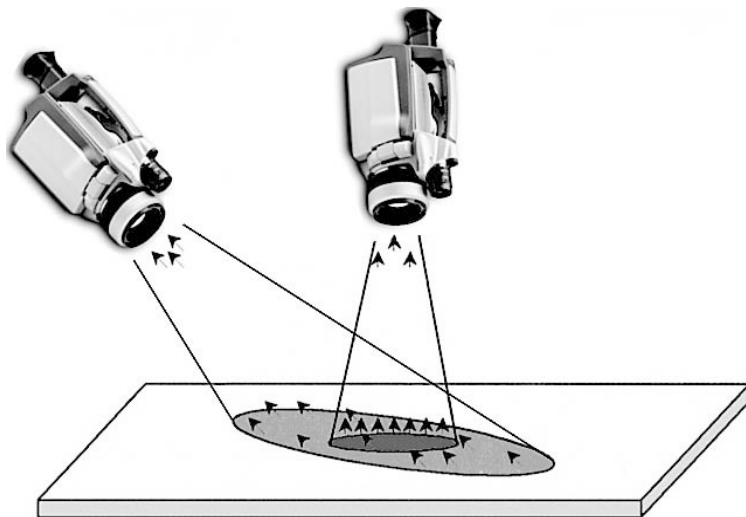
8. Warunki termiczne panujące wewnątrz budynku.

9. Współczynnik emisyjności badanej powierzchni (rozdz. 6.4.2).

Pierwsze trzy warunki absolutnie nie podlegają dyskusji – dobór kamery termowizyjnej o odpowiednich parametrach technicznych do przewidywanego zakresu badań, przygotowanie, wiedza i doświadczenie operatora kamery oraz dysponowanie odpowiednim oprogramowaniem są niezbędną podstawą poprawnego wykonywania pomiarów i interpretacji termogramów.

Komentarza natomiast wymagają pozostałe grupy czynników, a mianowicie:

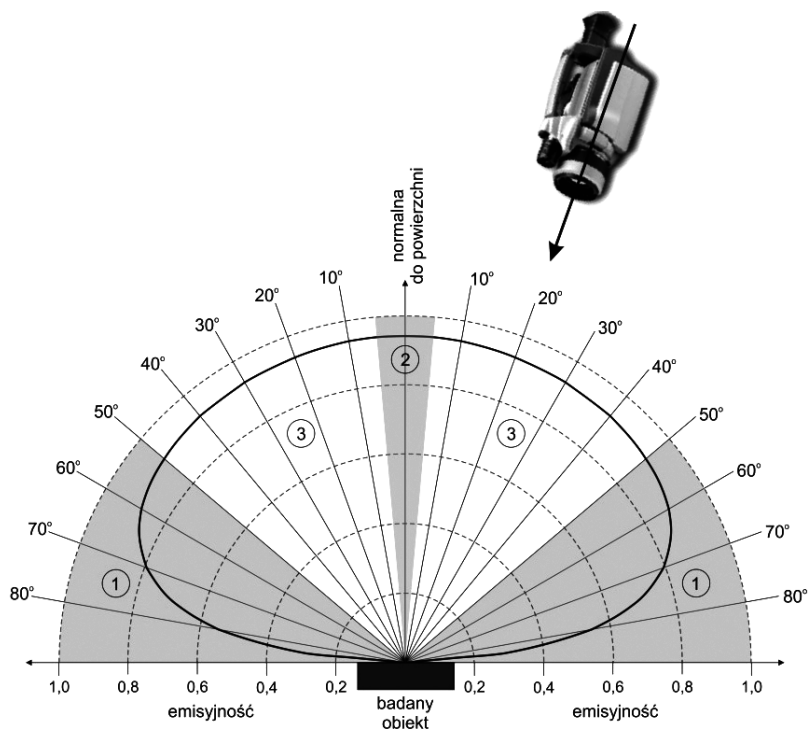
- *Kąt obserwacji kamery termowizyjnej* – zagadnienie to jest bezpośrednio związane z zależnością współczynnika emisyjności badanej powierzchni od kąta obserwacji (rozdz. 4.4.2 i 6.4.2) i ma bardzo duże znaczenie praktyczne dla metodyki wykonywania badań termowizyjnych w budownictwie, zwłaszcza dla badań budynków. Wartość współczynnika emisyjności badanej powierzchni zmienia się wraz ze zmianą kąta padającego promieniowania (rys. 4.10). W trakcie pomiarów bardzo ważny jest tzw. „kąt patrzenia” kamery na badany obiekt, tzn. kąt zawarty między normalną do badanej powierzchni i osią kamery termowizyjnej, ponieważ nie zawsze jest dogodny dostęp do badanej powierzchni, zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej. Ze względu na dokładność pomiarów, należy wówczas badać daną powierzchnię pod odpowiednim kątem, który nie powinien przekraczać 45° (optymalny kąt to do 30°), w wyjątkowych przypadkach kąt ten nie powinien przekraczać wartości 50° . W celu uniknięcia tego problemu, należy, jeżeli jest to możliwe, zwiększyć odległość od badanego budynku i „patrzeć” kamerą na jego przegrody (głównie ściany) pod możliwie jak najmniejszym kątem w poziomie i w pionie. Jeżeli zwiększenie odległości od badanego budynku nie jest możliwe, należy badaną przegrodę przebadać z kilku stanowisk pomiarowych pod różnym kątem.



Rys. 6.14. Ilustracja wpływu kąta pomiaru kamerą termowizyjną na wynik pomiaru – kąt patrzenia kamery termowizyjnej (kąt między normalną do powierzchni i osią kamery) nie powinien przekraczać 45° , optymalny kąt pomiaru wynosi do 30° . Możliwe są badania pod nieco większym kątem, w zależności od rodzaju badanej powierzchni, ale absolutnie nie powinien przekraczać 50° (patrz rys. 6.15)

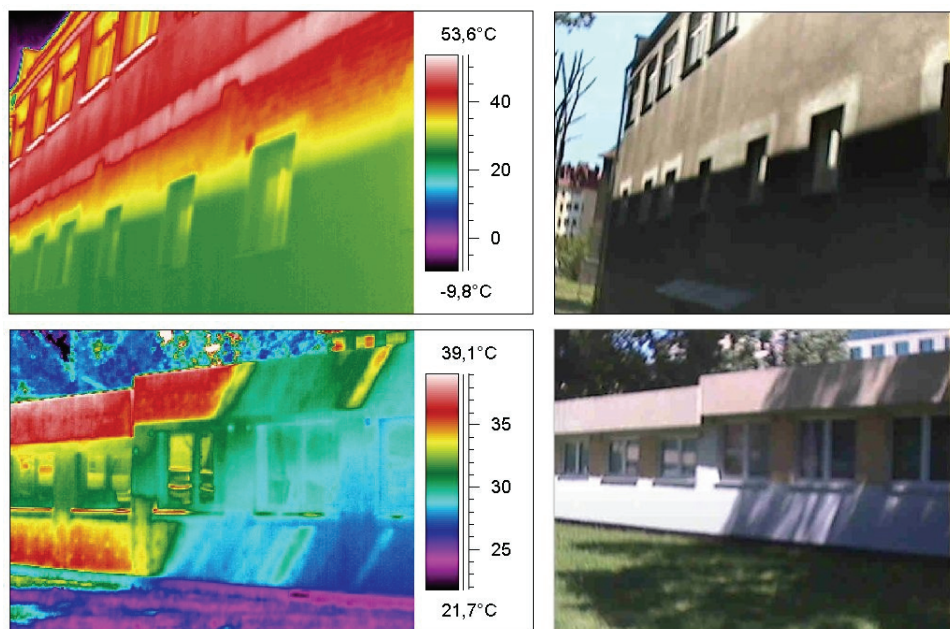
Specyficznym obiektem badań są okna i fasady przeszklone, których nie należy badać z kierunku normalnego do powierzchni (patrz rozdz. 6.7.3). Na rysunkach 6.14 i 6.15 przedstawiono ilustrację tego zagadnienia.

- *Warunki pogodowe* – decyduje tutaj przede wszystkim stabilna temperatura powietrza zewnętrznego na 2–3 dni przed pomiarami i w trakcie pomiarów oraz brak opadów atmosferycznych (rozdz. 6.3.5). Równie ważne jest, aby w trakcie pomiarów występowała mała prędkość wiatru (najlepiej poniżej 2 m/s), brak opadów atmosferycznych (zawilgocenie obniża temperaturę powierzchni ścian, niezależnie od warunków wymuszenia przepływu ciepła i od właściwości cieplnych ścian) oraz brak zamglenia. Pomiarów termowizyjnych absolutnie nie można wykonywać w ciągu dnia, zwłaszcza słonecznego, ponieważ promieniowanie słoneczne może wprowadzać zakłócenia i znaczne błędy pomiarowe. Wyjątek stanowią pomiary w ciągu dni zimowych, z całonocnym zachmurzeniem chmurami kłębiastymi w miesiącach od listopada do lutego, w pozostałych miesiącach zimowych nawet przy całonocnym zachmurzeniu istnieje ryzyko niekorzystnego termicznego oddziaływania promieniowania słonecznego rozproszonego na przegrody budowlane. Pomiary termowizyjne należy bezwzględnie wykonywać w kilka godzin po zachodzie słońca, aby wyeliminować zakłócenia w rozkładzie pola temperatury na powierzchni przegród. Na rysunkach 6.16 i 6.17 pokazano przykłady termogramów budynków wykonanych w ciągu słonecznego dnia – te

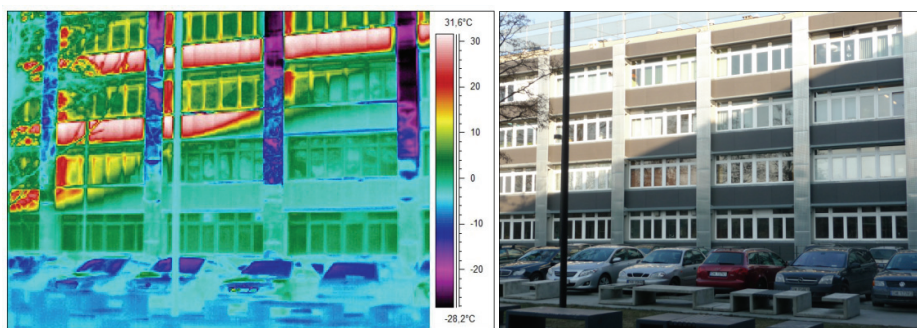


Rys. 6.15. Ilustracja wpływu kąta pomiaru kamerą termowizyjną na wynik pomiaru – kąt patrzenia kamery termowizyjnej powinien być zawarty w przedziale od 5° do maksymalnie 50° , w zależności od właściwości radiacyjnych badanej powierzchni. Należy zdecydowanie unikać pomiarów z kierunku normalnego do badanej powierzchni (zwłaszcza w badaniu okien i fasad przeszklonych) oraz pomiarów powyżej kąta 45° (optymalny kąt pomiaru wynosi do 30°), a kąt pomiaru absolutnie nie powinien przekraczać 50° (w sytuacjach wątpliwych należy przed pomiarami sprawdzić w literaturze zależność kątową współczynnika emisyjności badanej powierzchni). Oznaczenia: 1 i 2 – zakazane (niezalecane) strefy katowe pomiaru, 3 – zalecane kąty pomiaru kamerą termowizyjną. Linia ciągła obrazuje przykładową zmianę współczynnika emisyjności w funkcji kąta patrzenia kamery (patrz również rys. 4.10)

go typu termogramy można wykonywać jedynie w celach dydaktycznych i szkoleniowych, żeby wskazać, jakie skutki niesie nagrzewanie ścian zewnętrznych przez promieniowanie słoneczne oraz żeby pokazać, w jakich warunkach nie należy wykonywać termowizyjnych badań budynków. Niestety, w publikacjach krajowych niekiedy można spotkać termogramy wykonane również przez doświadczonych operatorów kamer termowizyjnych, właśnie w takich warunkach pomiarowych, którzy przechodzą nad tym do porządku dziennego, bez żadnego komentarza. Pokazano również efekt „zimnego” (tj. zwykłego) cienia, który powoduje pojawienie się niższej temperatury powierzchni, którą zaciemnia (rys.



Rys. 6.16. Przykłady zniekształcającego wpływu promieniowania słonecznego na rozkład temperatury na zewnętrznych powierzchniach ścian budynków [142] – w tym przypadku zmierzone pole temperatury nie wynika z ciepłych właściwości ścian zewnętrznych i z warunków termicznych panujących po obu stronach ścian, ale jedynie z nagrzewania ścian przez promieniowanie słoneczne (termogramy wykonano w lipcu w dzień słoneczny w celach szkoleniowych; na termogramie górnym występuje ujemna temperatura, ponieważ w górnym lewym rogu widoczny jest mały fragment całkowicie bezchmurnego „zimnego” nieboskłonu)

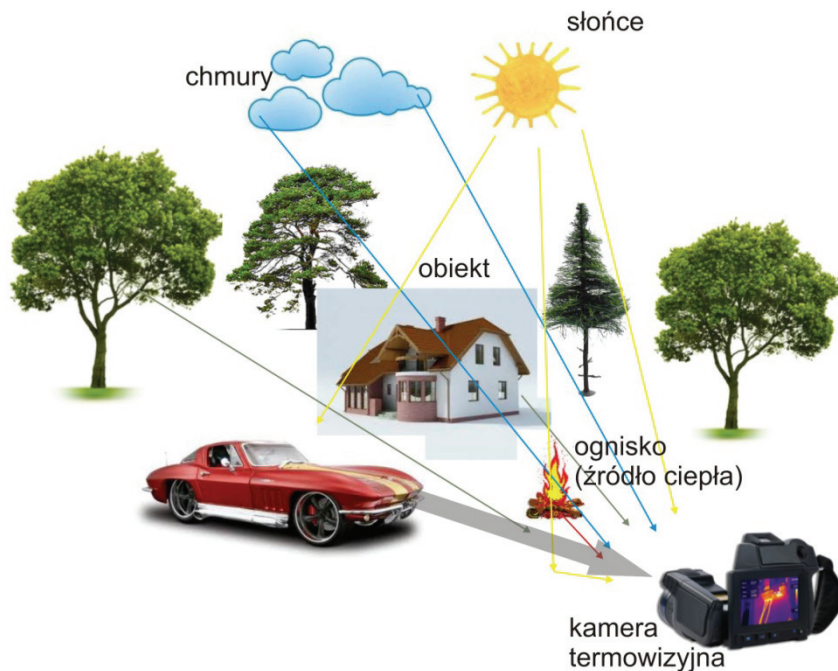


Rys. 6.17. Inny przykład zniekształcającego wpływu promieniowania słonecznego na rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni ściany [142], termogram wykonany w dzień słoneczny w zimie w celach szkoleniowych. W tym przypadku również zmierzone pole temperatury nie wynika z ciepłych właściwości ścian zewnętrznych i z warunków termicznych panujących po obu stronach ścian, ale jedynie z nagrzewania czarnych okładzin ścian przez promieniowanie słoneczne (na termogramie widoczne są również mocno wychłodzone pionowe metalowe elementy elewacyjne)

6.16). W pomiarach termowizyjnych funkcjonuje również pojęcie „ciepłego” cienia, który występuje w loggiach, pod okapami, pod przewieszzeniami ścian itp. (patrz również komentarz w rozdziale 6.6).

- *Najbliższe otoczenie budynku oraz radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego* – do kamery termowizyjnej dochodzi nie tylko promieniowanie cieplne emitowane przez badany obiekt, ale również promieniowanie pochodzące z otoczenia i odbite od badanej powierzchni oraz promieniowanie cieplne atmosfery (rozdz. 5.1). Dodatkowo w pobliżu badanego budynku mogą znajdować się inne źródła promieniowania podczerwonego, wprowadzające dodatkowe błędy i zakłócenia pomiarowe, co pokazano na rysunku 6.18. Niektóre z tych zakłóceń są na tyle małe, że praktycznie nie wpływają na wyniki pomiarów, ale są oczywiste i takie, które nie mogą być pominięte. Zakłócenia te są oczywiste dla doświadczonego operatora kamery termowizyjnej, który w skrajnym przypadku może przesunąć wykonywanie pomiarów na inny termin. Na trasie pomiaru nie powinno być również żadnych przeszkód w postaci ciał stałych (samochody, drzewa, ogrodzenie itp.) oraz gazowych (dym, mgła).

Nowoczesne kamery termowizyjne mają coraz to wydajniejsze systemy kompensowania wpływu różnych źródeł promieniowania zakłócających pomiary, ale



Rys. 6.18. Ilustracja przykładowych źródeł promieniowania podczerwonego docierającego do kamery termowizyjnej, zakłócającego pomiary. Badań termowizyjnych nie należy wykonywać w ciągu dnia (na podstawie [155])

pełne zneutralizowanie wszystkich źródeł zakłóceń jest oczywiście bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Kamera termowizyjna dokonuje automatycznej częściowej kompensacji zakłóceń po wprowadzeniu przez operatora następujących danych:

- emisyjność powierzchni badanego obiektu (jedna wartość dla całego termogramu),
- odległość kamery od obiektu,
- temperatura otoczenia,
- temperatura odniesienia,
- wilgotność względna powietrza.

Osobną i bardzo ważną grupę zagadnień stanowią problemy związane z radiacyjną wymianą ciepła budynku z bezchmurnym i zachmurzonym nieboskłonem i z występowaniem radiacyjnego chłodzenia przegród budowlanych oraz ich wpływem na rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni przegród – ma to bezwzględnie fundamentalny i bardzo istotny wpływ na wyniki badań termowizyjnych i na interpretację termogramów. Te kwestie zostały omówione w rozdziale 5.

- *Parametry techniczne termicznej obudowy budynku* – największy wpływ na rozkład temperatury w przegrodzie budowlanej i na jej powierzchniach granicznych mają:
 - całkowity opór cieplny przegrody, a tym samym jej współczynnik przenikania ciepła,
 - kolejność ułożenia warstw,
 - struktura, masa i związana z tym pojemność cieplna przegrody, które decydują o dynamicznych cieplnych właściwościach przegród i o ich stateczności cieplnej (rozdz. 2.3.3),
 - sposób wykończenia i rodzaj materiału na powierzchni zewnętrznej i na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia (współczynniki emisyjności powierzchni, patrz rozdz. 6.4.2),
 - rodzaj okien i drzwi balkonowych oraz parametry techniczne zestawów szyb i gazu wypełniającego,
 - szczelności stolarki okiennej i drzwiowej,
 - sposób osadzenia okien i drzwi w murze,
 - usytuowanie mebli i grzejników,
 - sposób ogrzewania pomieszczeń.
- *Warunki termiczne panujące wewnątrz budynku* – wpływ tych parametrów na wyniki badań termowizyjnych jest oczywisty i nie wymaga szczegółowego komentarza, przy czym ważny jest sposób ogrzewania pomieszczeń (c.o. tradycyjne, podłogowe, ściennie, powietrzne itp.). Można jedynie dodać, że warunkiem koniecznym do wykonywania badań termowizyjnych jest występowanie różnicy temperatury między badanym obiektem a otoczeniem, zwanej kontrastem ter-

micznym. W przypadku tradycyjnej termografii pasywnej jest to odpowiednia różnica temperatury powietrza po obu stronach przegrody budowlanej, która powinna wynosić co najmniej 15 °C, a optymalna wartość to 20 °C, (rozdz. 6.3.5). W przypadku natomiast termografii aktywnej różnicę temperatury uzyskuje się dzięki zastosowaniu dodatkowego stymulującego i kontrolowanego źródła ciepła o odpowiedniej mocy. Należy również zwrócić uwagę na ewentualne strefy budynku o obniżonej temperaturze powietrza, np. klatki schodowe, strychy lub garaże nieogrzewane w części piwnicznej budynku.

6.4.2. Współczynnik emisyjności powierzchni

Kluczowym zagadnieniem w badaniach termowizyjnych jest określenie współczynnika emisyjności badanej powierzchni, a wartość tego współczynnika operator kamery musi wprowadzić do sytemu kamery przed pomiarami. Współczynnik emisyjności powierzchni ciał stałych został omówiony w rozdziale 4.4. Z zamieszczonej tam tabeli 4.1 wynika, że współczynnik emisyjności dla różnych materiałów jest zawarty praktycznie w całym przedziale zmienności ($0 < \varepsilon < 1$), przy czym nie są osiągane skrajne wartości tego przedziału. Współczynnik emisyjności metali polerowanych zmienia się w przedziale od 0,02 (złoto polerowane) do 0,25 (żelazo polerowane), co oznacza, że od 75 do 98% docierającego promieniowania cieplnego jest odbijane od tych powierzchni, co z kolei znacznie utrudnia zarówno pomiar temperatury kamerą termowizyjną, jak i interpretację termogramów. Należy jednak zwrócić uwagę, że powierzchnie metalowe, stanowiące często elementy wykończeniowe elewacji budynku, rzadko są czyste i polerowane, najczęściej są anodowane, ocynkowane, pomalowane, skorodowane, zanieczyszczone lub utlenione, co może mieć decydujący wpływ na rzeczywistą wartość współczynnika emisyjności. W każdym przypadku przed pomiarami termowizyjnymi należy precyzyjnie określić wartość współczynnika emisyjności badanej powierzchni. Natomiast współczynniki emisyjności powszechnie stosowanych wykończeniowych materiałów budowlanych (materiały ceramiczne, tynki, okładziny kamienne, farby olejne, metale silnie utlenione lub pomalowane itp.) zmieniają się w granicach od 0,80 do 0,95, co oznacza, że jedynie od 5 do 20% promieniowania cieplnego odbija się od tej powierzchni. Badanie termowizyjne takich materiałów jest o wiele łatwiejsze niż materiałów o dużym współczynniku odbicia promieniowania cieplnego.

W odniesieniu do nieprzezroczystych materiałów budowlanych przyjmuje się, że:

- powierzchnie tych materiałów są szare, ponieważ ich emisyjność nie zależy od długości fal emitowanego promieniowania cieplnego,
- w zakresie temperatury spotykanej w budownictwie, tj. w przedziale od -30 °C (zima) do +80 °C (powierzchnia pokrycia papowego w lecie) współczynniki emisyjności tych materiałów są stałe,

- powierzchnie tych materiałów są dyfuzyjne, to znaczy, że współczynnik emisyjności jest stały we wszystkich kierunkach; dla materiałów niemetalicznych emisyjność ma stałą wartość dla kątów w zakresie od 0° do maksymalnie 45° , mierzonych między normalną do powierzchni i danym kierunkiem emisji promieniowania [74], [160], [187].

Najprostszym sposobem określenia współczynnika emisyjności badanej powierzchni jest przyjęcie tej wartości z tablic. Ta szybka metoda zdaje egzamin w przypadku termowizyjnego badania powszechnie stosowanych materiałów budowlanych, ale ma również pewne ograniczenia – należy zwrócić uwagę na ostrożność w korzystaniu z tabel ze współczynników emisyjności różnych powierzchni, ponieważ:

- nie we wszystkich tabelach jest informacja o zakresie długości fal promieniowania oraz o zakresie temperatury, dla których obowiązuje dana wartość współczynnika emisyjności,
- większość tabelarycznych współczynników emisyjności odnosi się do określonego zakresu temperatury i nie zawsze możliwe jest odszukanie właściwej dla naszego przypadku wartości,
- wartość współczynnika emisyjności zależy również od spektralnego zakresu widma promieniowania cieplnego, co może mieć podstawowe znaczenie w badaniu tzw. powierzchni spektralnie selektywnych (rozdz. 4.4.3),
- zestawienia tabelaryczne najczęściej nie są kompletne, ponieważ brakuje w nich danych dla materiałów wykończeniowych, zwłaszcza tych najnowszej generacji.

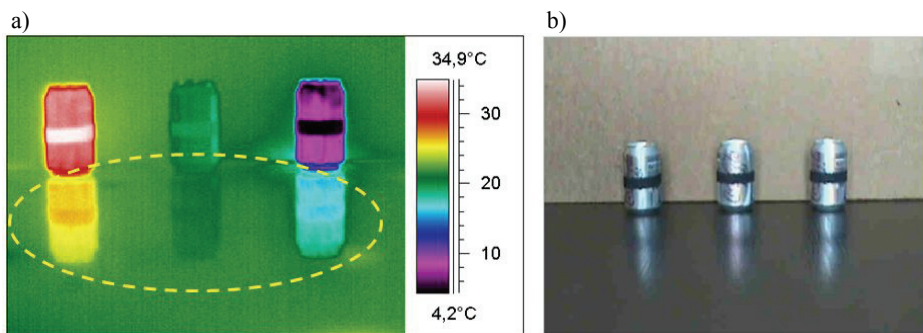
Operatorzy kamer termowizyjnych powinni na własny użytek wykonywać zestawienia tabelaryczne wartości współczynników emisyjności materiałów dla określonego pola badań termowizyjnych oraz dla materiałów o specyficznym zastosowaniu. Te spersonalizowane tabele będą prawdopodobnie zawierały niewielką liczbę pozycji, ale będą też bardzo przydane w badaniach.

Jednak w przypadku badania powierzchni metalowych, zwłaszcza polerowanych i błyszczących lub powlekanych lakierami (np. systemowe płyty ścienne z rdzeniem z wełny mineralnej obudowane blachami stalowymi powlekanyymi), należy zachować szczególną ostrożność, ponieważ ich współczynniki emisyjności zmieniają się w bardzo szerokim przedziale, od 0,02 (złoto polerowane) do 0,88 (stal silnie utleniona) [160]. Ponieważ powierzchnie o dużym współczynniku odbicia (małym współczynniku emisyjności) są słabymi emiterami energii cieplnej, mogą powodować problemy w trakcie badań termowizyjnych. Na przykład gdy obiekt o dużym współczynniku odbicia będzie znajdował się blisko ciała czarnego, w podczerwieni ciało czarne będzie wyglądało jako znacznie cieplejsze. Jednak ciało o dużym współczynniku odbicia będzie odbijało większość docierającego do niego promieniowania cieplnego i może wyglądać jako cieplejsze niż ciało o większym współczynniku emisyjności w tej samej temperaturze. Promienność całkowita powierzchni badanego obiektu nieprzeziernego (tj. suma energii cieplnej emitowanej i energii odbitej od badanej powierzchni)

może się zmieniać wskutek zmiany temperatury badanej powierzchni, zmiany jej emisyjności, a tym samym zmiany współczynnika odbicia. Dla zilustrowania tego problemu Autor wykonał doświadczenie, pokazane na rysunku 6.19 i opisane poniżej.

Przebieg doświadczenia był następujący:

- Do trzech puszek aluminiowych z częściowo utlenioną powierzchnią zewnętrzną wlano: do puszki po lewej stronie (rys. 6.19) wodę ciepłą o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia (temp. wody ok. 35 °C), do puszki środkowej wlano wodę o temperaturze otoczenia (ok. 20 °C), a do puszki po prawej stronie wlano wodę zimniejszą od temperatury otoczenia (temp. wody ok. 5 °C).
- Każda puszka miała naklejony pasek czarnej matowej taśmy, stosowanej do izolacji przewodów elektrycznych, o współczynniku emisyjności 0,97; tę wartość emisyjności wpisano w ustawieniach kamery termowizyjnej.
- Przed rozpoczęciem doświadczenia usunięto bądź zasłonięto wszystkie źródła promieniowania o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia (oczywiście oprócz kamery i operatora kamery).
- Temperatura powietrza w pomieszczeniu, w którym wykonywano doświadczenie, nie miała znaczenia.
- Powierzchnia puszki aluminiowej i taśmy izolacyjnej miały taką samą temperaturę (w każdym z trzech przypadków), ale termogram pokazuje, że:
 - taśma na puszcze z ciepłą wodą ma wyższą temperaturę niż powierzchnia puszki,
 - temperatura taśmy i powierzchnia puszki z wodą o temperaturze otoczenia są takie same,
 - temperatura taśmy izolacyjnej jest niższa od temperatury powierzchni puszki z zimną wodą.



Rys. 6.19. Trzy puszki aluminiowe z częściowo utlenioną powierzchnią i naklejonymi paskami czarnej matowej taśmy do izolacji przewodów elektrycznych: a) termogram puszek, z zaznaczeniem odbicia ich obrazu termalnego od powierzchni stołu, b) zdjęcie puszek, puszka po lewej stronie jest napełniona ciepłą wodą o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia (35 °C), puszka w środku jest wypełniona wodą o temperaturze otoczenia (20 °C), puszka po prawej stronie jest napełniona wodą zimniejszą od otoczenia (5 °C)

- W trakcie doświadczenia wystąpiło odbicie termalnego obrazu puszek od powierzchni stołu o dużym współczynniku odbicia, co zarejestrowała kamera termowizyjna (rys. 6.19). Termowizyjne badanie powierzchni o dużym współczynniku odbicia może stanowić problem dla niedoświadczonego operatora kamery (komentarz poniżej).
- Na termogramie również widać, że gdy puszki są ustawione stosunkowo blisko siebie, wówczas puszka środkowa jest z jednej strony ogrzewana, a z drugiej strony schładzana przez puszki sąsiednie.

W jaki sposób można wyjaśnić opisane zjawiska – otóż dzieje się tak, ponieważ czarna matowa taśma izolacyjna ma znacznie większą wartość współczynnika emisyjności niż metal. Oznacza to, że czarna taśma jest bardziej efektywna jako radiator promieniowania cieplnego (i odwrotnie, powierzchnia metalu, która ma większy współczynnik odbicia niż taśma, jest bardziej efektywna w odbijaniu docierającego promieniowania cieplnego). Ponieważ współczynnik emisyjności czarnej taśmy jest duży i zbliżony do idealnego emitery, właśnie taśma emituje promieniowanie ciepłe proporcjonalnie do temperatury puszki i dokładniej wskazuje temperaturę badanej powierzchni, niezależnie od tego czy puszka jest wypełniona wodą o temperaturze wyższej czy niższej od temperatury otoczenia. Powierzchnia metalowa natomiast dokładniej wskazuje to, co odbija się od metalu. Gdy puszka aluminiowa z wodą ma wyższą temperaturę niż otoczenie, to na termogramie czarna taśma izolacyjna wygląda jakby miała temperaturę wyższą niż metal. Gdy puszka ma taką samą temperaturę jak otoczenie, taśma i metal wyglądają tak samo, tzn. mają taką samą temperaturę. Wreszcie, gdy puszka z wodą ma niższą temperaturę niż otoczenie, taśma izolacyjna na termogramie wygląda na zimniejszą niż metal.

Opisane doświadczenie pokazuje związek pomiędzy współczynnikiem emisyjności i refleksyjności danej powierzchni oraz ma ścisły związek z ewentualnymi problemami, jakie mogą pojawić się podczas wykonywania badań termowizyjnych powierzchni metalowych w różnym stopniu wykończenia lub powierzchni materiałów o dużym współczynniku odbicia oraz w interpretacji termogramów. Pokazuje również jak bardzo ważne jest określenie poprawnej wartości współczynnika emisyjności badanej termowizyjnie powierzchni.

Opisane doświadczenie podpowiada również jak w praktyczny sposób można wyznaczyć nieznaną wartość współczynnika emisyjności badanej termowizyjnie powierzchni przegrody budowlanej, z wykorzystaniem czarnej matowej taśmy izolacyjnej. Taśma ta nadaje się do tego celu, ponieważ charakteryzuje się bardzo dużym współczynnikiem emisyjności, a ponadto bardzo dobrze przylega (przykleja się) do materiału przegrody i jest dobrym przewodnikiem ciepła. Procedurę wyznaczania wartości współczynnika emisyjności badanej powierzchni przedstawiono poniżej.

Metoda nr 1:

- należy wybrać fragment badanego obiektu o jednorodnej powierzchni i o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia (na podstawie termogramu) w celu uzyskania dobrego kontrastu termicznego,
- w wybranym miejscu przykleić do powierzchni czarną taśmę izolacyjną i odczekać kilka minut aż temperatura taśmy i badanej powierzchni się zrównają,
- ustawić punkt pomiarowy kamery na czarnej taśmie izolacyjnej,
- wyznaczyć kamerą termowizyjną temperaturę powierzchni z naklejoną taśmą (w kamerze należy ustawić współczynnik emisyjność dla taśmy, np. 0,97),
- przesunąć punkt pomiarowy kamery na obszar poza taśmą,
- dla fragmentu powierzchni poza taśmą należy tak dobierać emisyjność powierzchni w kamerze, aby uzyskać taką samą temperaturę jak dla powierzchni z taśmą,
- gdy obie temperatury będą sobie równe, emisyjność wprowadzona do systemu kamery, przy której to zachodzi, będzie dobrym przybliżeniem emisyjności badanej powierzchni.

Metoda nr 2 (pochodna metody nr 1):

- podobnie jak w metodzie nr 1, należy wybrać fragment badanego obiektu o jednorodnej powierzchni i o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia, w celu uzyskania dobrego kontrastu termicznego,
- zmierzyć temperaturę wybranej powierzchni termoparą lub pirometrem,
- skierować kamerę termowizyjną na tę powierzchnię i tak dobrać wartość współczynnika emisyjności, aby otrzymać zmierzoną uprzednio temperaturę.

Zastosowanie czarnej taśmy izolacyjnej (lub innego równoważnego materiału) o dużym współczynniku emisyjności do wyznaczania wartości współczynnika emisyjności badanej powierzchni jest wygodne, ponieważ praktycznie eliminuje się wpływ promieniowania cieplnego odbitego od taśmy. Pomiar współczynnika emisyjności badanej powierzchni na obiektach rzeczywistych należy wykonywać zgodnie z przedstawionymi wcześniej zasadami pomiarów termowizyjnych.

W trakcie termowizyjnych badań budynków lub innych obiektów budowlanych zaleca się przestrzegać następujących zasad związanych z emisyjnością badanej powierzchni (wnioski wynikające z doświadczenia Autora):

1. Powierzchnia badanego obiektu ma emisyjność $\varepsilon \geq 0,80$ – oznacza to, że współczynnik odbicia r badanej powierzchni ma małą wartość ($r \leq 0,20$), a ryzyko popełnienia błędów pomiarowych jest niewielkie. Ten przypadek dotyczy większości termowizyjnych pomiarów budynków, w których zastosowano tradycyjne materiały

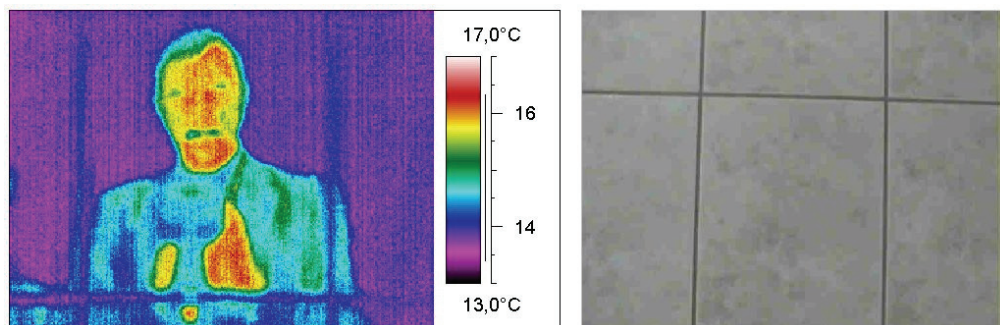
budowlane i wykończeniowe, które najczęściej mają współczynnik emisyjności zawierający się w przedziale 0,88–0,93.

2. Współczynnik emisyjności badanego obiektu zawiera się w przedziale $0,60 < \varepsilon < 0,80$ – oznacza to, że współczynnik odbicia r jest na średnim poziomie (odpowiednio od 0,40 do 0,20). Zalecana jest ostrożność podczas wykonywania i interpretacji termogramów.

3. Współczynnik emisyjności obiektu, lub jego części, ma wartość $\varepsilon \leq 0,60$ – wówczas współczynnik odbicia r powierzchni ma dużą wartość, tzn. $r \geq 0,40$. Zaleca się bardzo dużą ostrożność w wykonywaniu i interpretacji termogramów. Operatorzy kamer z niewielkim doświadczeniem w tym przypadku sami raczej nie powinni podejmować się badań.

Zapewnienie prawidłowego ustawienia emisyjności badanej powierzchni (w kamerze) jest szczególnie istotne w przypadku, gdy występują duże różnice w wartościach temperatury między badanym elementem i temperaturą otoczenia. Przykładem może być badanie instalacji centralnego ogrzewania (zwłaszcza grzejników) o temperaturze kilkudziesięciu stopni lub badanie drzwi zewnętrznych o temperaturze kilkunastu stopni Celsjusza, podczas gdy temperatura powietrza w pomieszczeniach, w obu przypadkach, wynosi ok. 20 °C. Wprowadzenie do kamery zbyt małych lub zbyt zawyżonych wartości współczynników emisyjności badanych elementów prowadzi do uzyskania znacznie zawyżonych lub nadmiernie zaniżonych wartości temperatury tych elementów.

W trakcie opisanego doświadczenia z trzema puszkami aluminiowymi wystąpiło odbicie termalnego obrazu puszek od powierzchni stołu o dużym współczynniku odbicia, co zarejestrowała kamera termowizyjna (rys. 6.19). Termowizyjne badanie powierzchni o dużym współczynniku odbicia może stanowić problem dla niedoświadczonego operatora kamery. Poniżej przedstawiono trzy przykłady na występowanie tego typu problemów – na rysunku 6.20 pokazano termogram operatora kamery termowizyjnej powstały na skutek odbicia od ściany obłożonej glazurą szkliwioną (patrz

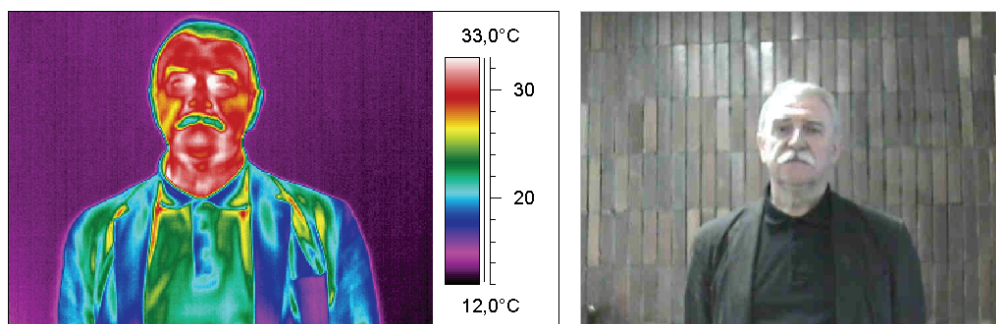


Rys. 6.20. Termogram osoby wykonującej pomiary termowizyjne odbity od szkliwionej glazury ściennej (patrz zakres temperatury)

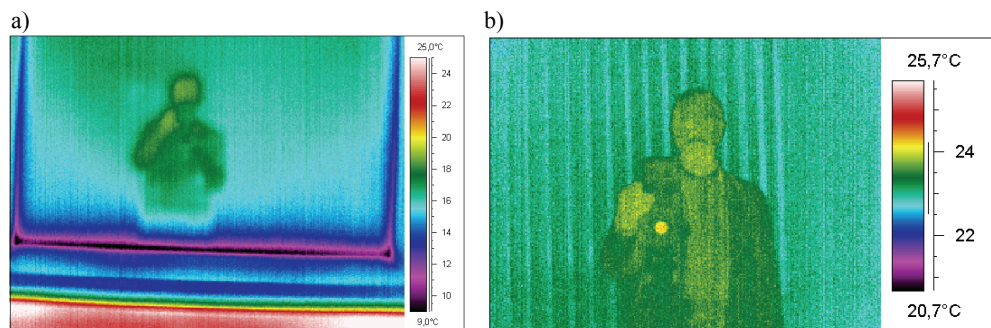
zakres temperatury na termogramie). Natomiast na rysunku 6.21, dla porównania, pokazano tradycyjny termogram operatora kamery (patrz zakres temperatury na termogramie).

Innymi przykładami odbicia obrazu termalnego od badanej powierzchni są szyby zwykłe, szyby z powłokami niskoemisyjnymi lub nawet zwykła czarna tablica szkolna (rys. 6.22) oraz dolna powierzchnia stropodachu pełnego, wykonanego z blach stalowych powlekanych (rys. 6.23).

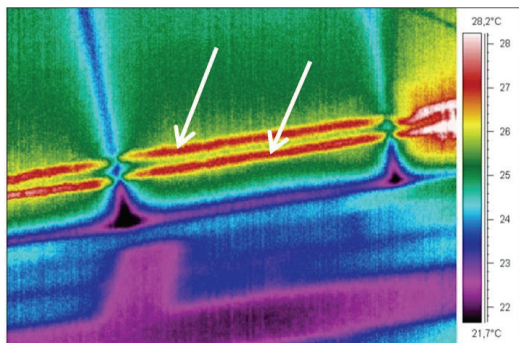
Podczas wykonywania badań termowizyjnych powierzchni odbijających w sposób kierunkowy lub kierunkowo-rozproszony należy zwrócić uwagę na najbliższe otoczenie, zwłaszcza na otoczenie o zróżnicowanej temperaturze. Takie otoczenie będzie powodowało odbicia obrazów termalnych (zakłócenia termogramów), gdyż kamera będzie uwzględniała jedną zadaną temperaturę otoczenia. Rada praktyczna podczas wykonywania termogramów powierzchni odbijających w sposób kierunkowy jest następująca – takich powierzchni nie należy badać z kierunku normalnego do tej powierzchni, jedynie pod dopuszczalnym kątem, najlepiej z kilku miejsc (patrz rys. 6.15).



Rys. 6.21. Tradycyjny termogram operatora kamery (patrz zakres temperatury)



Rys. 6.22. Odbicie operatora kamery termowizyjnej: a) od szyby z powłoką niskoemisyjną, b) od zwykłej czarnej tablicy szkolnej, w tle widoczne jest odbicie pionowych żaluzji okiennych (tablica jest zamontowana na ścianie równoległej do okien). W obu przypadkach pomiary prowadzono w kierunku normalnym do badanych płaszczyzn



Rys. 6.23. Termogram stropodachu pełnego ogrzewanej hali produkcyjnej od strony pomieszczenia – odbicie rur c.o., zamontowanych poniżej ok. 2,5 m, od powierzchni płyt stropodachowych (odbicie rur zaznaczono strzałkami). Dolną powierzchnię stropodachu stanowi blacha stalowa powlekana, o dużym współczynniku odbicia

6.5. Przyczyny błędów pomiarowych

Metoda badań termowizyjnych, podobnie jak inne metody badawcze, jest obarczona ryzykiem popełniania błędów pomiarowych, które w skrajnym przypadku mogą w konsekwencji znacznie obniżyć wartość uzyskanych wyników lub wręcz je zniweczyć. W pomiarach rozkładu temperatury na powierzchniach badanych obiektów budowlanych mogą wystąpić błędy uszeregowane w poniższych grupach:

1. Błędy związane bezpośrednio z kamerą termowizyjną:

- błędy metody pomiarowej – do tej grupy błędów zaliczamy: błąd w oszacowaniu współczynnika emisyjności badanej powierzchni (patrz komentarz poniżej), błąd spowodowany wpływem odbitego przez badany obiekt promieniowania otoczenia, błąd wywołany ograniczoną transmisyjnością atmosfery (można go pominąć dla małej odległości kamery od obiektu) i błąd wywołany brakiem możliwości uśredniania wyników pomiarów.
- błędy wzorcowania,
- błędy toru elektronicznego.

Dwa ostatnie błędy pomiarowe są związane przede wszystkim z technologią wytwarzania kamer termowizyjnych i z ich oprogramowaniem wewnętrznym. Główne źródło błędów pomiaru stanowią błędy metody pomiarowej. Wymienione błędy pomiarowe omówiono w pracy [105].

2. Błędy związane bezpośrednio z brakiem podstawowej wiedzy i doświadczenia operatora kamery termowizyjnej w wykonywaniu i interpretacji termogramów,

3. Błędy związane bezpośrednio z poszczególnymi etapami wykonywania badań.

Błędy pomiarowe grupy 2 i 3 mogą wynikać z błędów popełnianych na każdym etapie wykonywania pomiarów, tj. od momentu szczegółowego rozpoznania obiektu

badania, poprzez prace przygotowawcze i pomiary na obiekcie, aż po interpretację termogramów i opracowanie raportu z badań. Te etapy realizacji pomiarów szczegółowo omówiono w rozdziałach 6.2.1, 6.3.2–6.3.5 oraz w rozdziałach 6.4.1 i 6.4.2.

Poniżej wymieniono przykładowe, najczęściej popełniane błędy pomiarowe:

1. Błędy związane z kamerą termowizyjną – oprócz błędów wymienionych w punkcie (1), do tej grupy błędów możemy również zaliczyć:

- Błąd wyznaczenia, ewentualnie przyjęcia wartości współczynnika emisyjności badanej powierzchni – jest to o tyle ważne, że kamerą termowizyjną najczęściej jest mierzone pole temperaturowe różnych powierzchni o różnej wartości współczynnika emisyjności. Współczynnik emisyjności danej powierzchni zależy od długości fali promieniowania, od temperatury i stanu powierzchni oraz od kierunku obserwacji. Błąd pomiaru termowizyjnego, związany z błędem oszacowania współczynnika emisyjności badanego obiektu, przy niewiele różniących się współczynnikach emisyjności poszczególnych powierzchni, można zmniejszyć przez przyjęcie średniej wartości tego współczynnika dla obrazowanego obszaru.
- Stosowanie niewłaściwego obiektywu.
- Wpisanie do systemu kamery termowizyjnej niewłaściwych wartości temperatury powietrza, temperatury odniesienia i promieniowania oraz odległości od obiektu badań.
- Przyjęcie złego zakresu pomiarowego kamery.
- Brak wyostrenia obrazu kamery.

2. Brak podstawowej wiedzy operatora kamery termowizyjnej z zakresu budownictwa ogólnego, technologii wznoszenia budynków, fizyki budowli, przepisów prawnych w zakresie ochrony cieplnej budynków i wymiany ciepła przez przegrody budowlane oraz brak doświadczenia pomiarowego (rozdz. 6.2.1).

3. Niewłaściwe rozpoznanie lub brak rozpoznania obiektu badań przed pomiarami.

4. Błędy związane bezpośrednio z pomiarami:

- za mała różnica temperatury powietrza po obu stronach przegród,
- niewłaściwe warunki pogodowe na 2–3 dni przed i w trakcie pomiarów,
- badania w czasie szybko zmieniających się warunków pogodowych,
- za duża lub zbyt mała odległość od badanego elementu,
- zła odległość od obiektu badań wpisana do systemu kamery,
- za ostry kąt patrzenia kamery na badaną powierzchnię,
- pomiary wykonywane w ciągu słonecznego dnia,
- badania przy zbyt dużej prędkości wiatru,
- zbyt gorące grzejniki i rury c.o. w pomieszczeniach, które zniekształcają wyniki pomiarów ścian (należy unikać wykonywania pomiarów w pobliżu tych elementów),
- oświetlenie ścian lampami w pomieszczeniu (należy wyłączyć takie oświetlenie przed pomiarami),
- zasłanianie badanej ściany przez meble, zasłony, obrazy itp.,

- występowanie intensywnego zakłócającego przepływu powietrza w pomieszczeniach (należy pozamykać okna, wloty powietrza, wyłączyć wentylatory).

5. Błędy związane z interpretacją termogramów:

- brak interpretacji wyników badań w raporcie z badań (częste przypadki),
- błędy w interpretacji termogramów powierzchni o dużym współczynniku odbicia,
- błędy w interpretacji termogramów przy niedostatecznej znajomości obiektu badań,
- błędy w interpretacji termogramów wynikające z innych powodów niż opisane,
- brak wniosków z badań,
- brak zaleceń dla zleceniodawcy.

Gdy nie wszystkie przyczyny błędów pomiarowych mogą być usunięte, przed pomiarami należy szczegółowo rejestrować i opisywać warunki, w jakich badania zostały przeprowadzone i uwzględnić to na etapie analizy i interpretacji termogramów. Udział wymienionych przyczyn błędów pomiarowych jest zróżnicowany, można jednak stwierdzić, że główne źródło błędów pomiaru termowizyjnego stanowią błędy metodyki pomiarów. Aby zatem uniknąć większości wymienionych błędów pomiarowych, należy mieć na uwadze zalety i ograniczenia metody badawczej oraz bezwzględnie przestrzegać procedury i zasad wykonywania badań termowizyjnych (rozdz. 6.3).

6.6. Interpretacja termogramów

Jednym z najważniejszych elementów w procedurze diagnostyki termowizyjnej w budownictwie, w tym głównie diagnostyki budynków, jest właściwa interpretacja termogramów, co przede wszystkim jest związane z doświadczeniem pomiarowym i wiedzą operatora kamery termowizyjnej. Ma to znaczenie zarówno podczas wykonywania klasycznych badań, gdy nie występują szczególne okoliczności pomiarowe, jak i w sytuacjach nietypowych, np. gdy badane powierzchnie mają małą emisyjność, temperatura badanej powierzchni jest niższa od temperatury otaczającego powietrza lub badana powierzchnia jest zakrzywiona. Operator kamery termowizyjnej nie może ograniczyć się jedynie do obsługi sprzętu i wykonania termogramów – zasadniczym jego zadaniem jest kompleksowa analiza i wnikliwa interpretacja termogramów oraz sformułowanie wniosków i zaleceń dla zleceniodawcy badań.

Interpretacja termogramów to proces identyfikacji cech bezpośrednio związanych z obiektem badań – chodzi tu o wyjaśnienie, wytłumaczenie i skomentowanie teoretycznego i zmierzonego pola temperatury na badanej powierzchni w powiązaniu z cechami obiektu i z warunkami determinującymi przepływ ciepła. Prawidłowa analiza i interpretacja termogramów jest możliwa dzięki poprawnej realizacji poszczególnych etapów badań, począwszy od szczegółowego rozpoznania obiektu, poprzez prace

przygotowawcze i pomiary na obiekcie w odpowiednich warunkach pogodowych przed i w trakcie badań oraz dzięki przestrzeganiu podstawowych zasad pomiarów. Zasadniczym celem interpretacji termogramów jest najczęściej:

- identyfikacja wad izolacji cieplnej termicznej obudowy budynków, przede wszystkim lokalizacja mostków cieplnych liniowych i punktowych oraz innych wad izolacji cieplnej w przegrodach budowlanych,
- identyfikacja nieszczelności przegród pełnych i stolarki (ewentualnie ślusarki) budowlanej na przewiewanie powietrza (nadmierna infiltracja powietrza),
- identyfikacja miejsc zawilgocenia przegród budowlanych (patrz rozdz. 6.7.1),
- identyfikacja uszkodzeń instalacji budowlanych (np. lokalizacja przecieków instalacji ogrzewania podłogowego, przecieków rur wodnych w ścianach itp.).

Należy jeszcze raz wyraźnie podkreślić, że nie każde zróżnicowanie rozkładu temperatury na granicznych powierzchniach przegród budowlanych (tzn. na powierzchniach od strony pomieszczenia i na powierzchniach zewnętrznych) świadczy o wadach ich izolacji cieplnej, o nadmiernej infiltracji powietrza przez przegrody, o ich nadmiernym zawilgoceniu czy też o złym zaprojektowaniu szczegółów budowlanych oraz o złym wykonawstwie.

Bierze się to stąd, że rozkład temperatury na powierzchniach przegród jest warunkowany między innymi ich geometrią i wynika z podstawowych praw fizyki dotyczących dwu- lub trójwymiarowego przepływu ciepła przez te przegrody. Przykładowo, temperatura w narożach ścian zewnętrznych jest zawsze niższa od temperatury ściany w miejscach z dala od naroży, podobnie temperatura powierzchni w miejscach innych mostków termicznych – oczywiście różnica ta nie może być zbyt duża, co można sprawdzić numerycznie oraz tak zaprojektować rozwiązania mostków, aby zostały spełnione wymagania w zakresie ochrony cieplnej przegród budowlanych i budynków.

Każdy poprawnie wykonany termogram zawiera dwie zasadnicze informacje o stanie badanej powierzchni, a mianowicie podaje wartość temperatury w danym punkcie badanej powierzchni oraz wskazuje zasięg obszarów izotermicznych. Temperatura badanej powierzchni zależy od izolacyjności termicznej danej przegrody, jej masy termicznej, jej współczynnika emisyjności, różnicy temperatury powietrza po obu stronach przegrody, średniej temperatury promieniowania najbliższego otoczenia budynku, prędkości i kierunku wiatru oraz „historii” przebiegu temperatury powietrza po obu stronach przegrody na 2–3 dni przed i w trakcie pomiarów termowizyjnych.

Należy wyraźnie podkreślić, że wartość temperatury na powierzchni przegrody bez podanych informacji na temat istotnych czynników warunkujących przepływ ciepła nie może być podstawą do wnioskowania o cieplnych właściwościach przegrody – termogramów nie można interpretować bez znajomości warunków ich wykonania. W praktyce oznacza to, że niezbędne są informacje o parametrach termicznych środowiska zewnętrznego i wewnątrz budynku i że badania termowizyjne należy wykonywać zarówno od strony zewnętrznej, jak i od strony pomieszczeń, oczywiście zgodnie z zasadami wykonywania pomiarów (rozdz. 6.3.5). Termogram umożliwia analizę

pola temperatury na powierzchni przegrody oraz identyfikację mostków cieplnych, zwłaszcza liniowych, infiltrację powietrza czy też miejsca zawilgocenia przegrody, pod warunkiem jednak posiadania pełnej informacji o warunkach przepływu ciepła i o obiekcie badań.

W procesie interpretacji termogramów należy również uwzględnić cechy bezpośrednio związane z obiektem badań, takie jak:

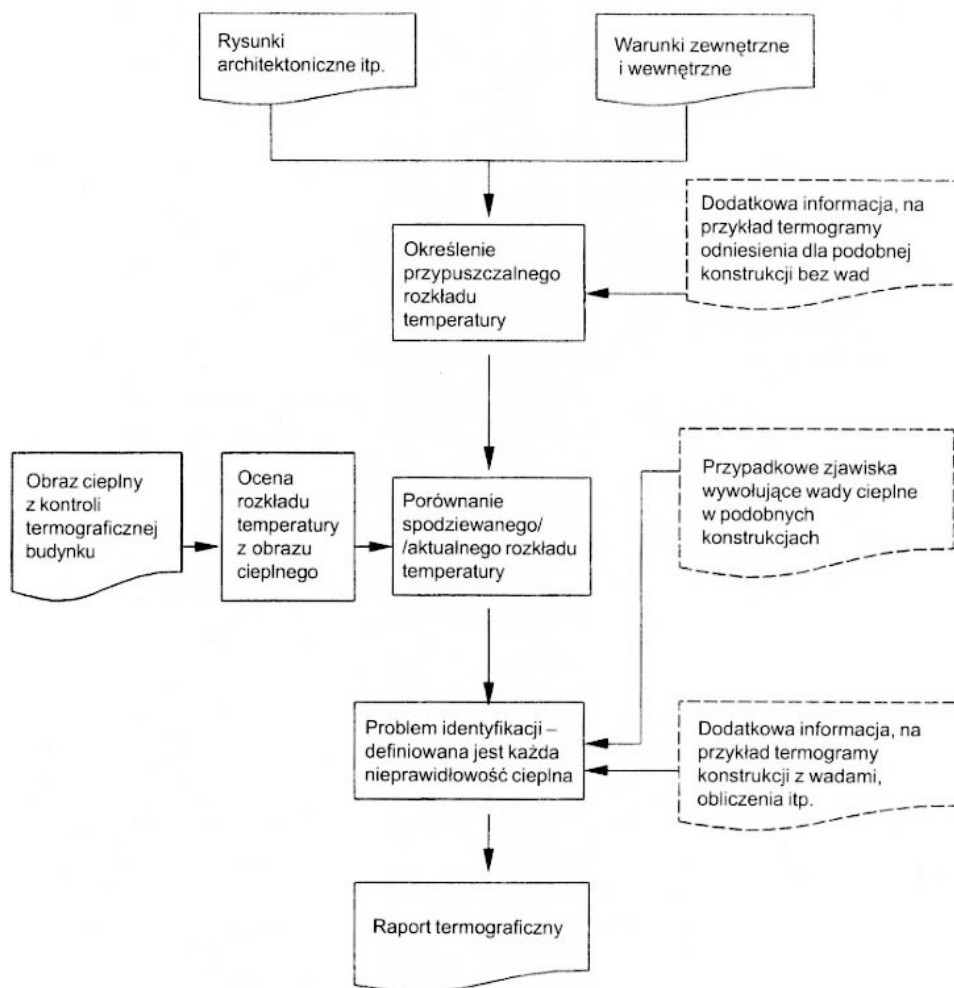
- kształt i wielkość budynku – budynki i inne obiekty budowlane są na tyle duże, że nie stanowią problemu w ich identyfikacji oraz interpretacji termogramów, pod warunkiem występowania w trakcie pomiarów niezbędnego kontrastu temperaturowego, tj. zróżnicowania natężenia cieplnego promieniowania badanego obiektu względem otoczenia (rozdz. 6.2.1),
- barwa powierzchni zewnętrznej – barwa zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej, zwłaszcza barwa ciemna umożliwiającą nagrzewanie się przegrody od promieniowania słonecznego, nie ma znaczenia, gdy pomiary są wykonywane zgodnie z zasadami, tj. kilka godzin po zachodzie słońca; można dodać, że barwa danej powierzchni wpływa na wartość jej współczynnika absorpcji a_s dla promieniowania słonecznego (krótkofalowego); natomiast współczynniki emisyjności ε dla zakresu promieniowania cieplnego (długofalowego) tych samych powierzchni przegród o różnej barwie różnią się niewiele (rozdz. 4.4.3).

Uogólniając, można stwierdzić, że termowizyjne badania przegród budowlanych polegają na:

- pomiarze rzeczywistego rozkładu temperatury na badanej powierzchni przegrody budowlanej,
- wyjaśnieniu, czy rozkład temperatury jest prawidłowy czy też identyfikuje anomalie termiczne wywołane np. wadami izolacji cieplnej (brak izolacji i/lub jej mniejsza grubość), zawilgoceniem przegrody lub jej nieszczelnością na infiltrację powietrza,
- rozpoznaniu i ocenie typu oraz zakresu defektów,
- wyjaśnieniu przyczyn zidentyfikowanych nieprawidłowości temperaturowych,
- na przedstawieniu wniosków i zaleceń, umożliwiających naprawę występujących nieprawidłowości.

Ocena i interpretacja termogramów polega na rozstrzygnięciu czy uzyskany rozkład temperatury jest prawidłowy czy też nie, biorąc pod uwagę charakterystykę techniczną termicznej obudowy budynku oraz warunki otoczenia podczas pomiarów, w tym również system ogrzewania i wentylacji badanego budynku – można to ustalić poprzez:

- porównanie termogramu uzyskanego z badań z termogramem uznanym za wzorcowy, tzw. „termogramem odniesienia” obudowy budynku bez defektów i ze świadomie zamierzonymi wadami, otrzymanym dla identycznej przegrody i w podobnych warunkach badawczych (rys. 6.24),



Rys. 6.24. Schemat blokowy ogólnej procedury interpretacji termogramów [217]

- porównanie termogramu z przewidywanym rozkładem temperatury wygenerowanym np. metodami obliczeniowymi lub badaniami laboratoryjnymi w komorach klimatycznych obudowy budynków bez defektów.

Zaburzenia termiczne w rozkładzie temperatury, nie dające się wytłumaczyć na podstawie analizy budowy przegrody lub innych czynników mogących wpłynąć na wynik pomiaru, należy traktować jako defekty i odchylenie od warunków projektowych.

Termogramy odniesienia przegród mogą być dwojakiego rodzaju:

1. Termogramy odniesienia wykonane w laboratorium – wykonuje się je w komorach klimatycznych. Dowolną przegrodę lub połączenia przegród umieszcza się

między „zimną” i „cieplą” komorą, w komorach następuje kontrolowana regulacja temperatury powietrza i ciśnienia. Termowizyjnie bada się przegrody bez wad i z zamierzonymi wadami (w postaci defektów izolacji cieplnej) i/lub z nieszczelnościami powietrza, dla różnych kombinacji i różnic temperatury powietrza i ciśnienia po obu stronach przegrody.

2. Termogramy odniesienia wykonane na obiektach rzeczywistych – warunkiem stosowania tych termogramów jest bardzo dobre wykonawstwo wszystkich przegród stanowiących termiczną obudowę budynku (budynki bez wad).

Termogramy odniesienia powinny być prezentowane w dwóch formach, tzn. jako:

- normalne termogramy,
- termogramy z wydzieloną izotermą (wyodrębnioną temperaturą lub wyodrębnionym zakresem temperatury), charakterystyczną dla kontrolowanej wady.

W procesie interpretacji termogramów wykorzystuje się jednoznaczne i bezpośrednie cechy rozpoznawcze badanych obiektów, takie jak: lokalizacja, związki z otoczeniem oraz historia obiektu, kształt, wielkość, struktura oraz tekstura elewacji, a także wiedza i doświadczenie operatora kamery termowizyjnej.

Termogramy odniesienia należy tak dobierać, aby dobrze reprezentowały budynek lub inny obiekt i warunki pomiaru oraz aby były maksymalnie zbliżone do badanej konstrukcji i otoczenia podczas badań. Na rysunku 6.24 przedstawiono schemat ogólnej procedury oceny termogramów z wykorzystaniem termogramów odniesienia.

Komentarza wymaga jednak ta *dosyć nierealna idea stosowania termogramów odniesienia* do oceny termogramów uzyskanych z badań – ten prosty i skuteczny w założeniach pomysł oceny termogramów poprzez porównanie otrzymanego termogramu z termogramem takiej samej przegrody bez defektów i z zamierzonymi defektami, wykonanym w podobnych warunkach pomiarowych, w praktyce jest dosyć trudny w realizacji, żeby nie powiedzieć wręcz nierealny, z uwagi na bardzo wysokie koszty wykonania. Aby uzyskać termogramy odniesienia, należy przegrody budowlane w skali naturalnej, bez defektów cieplnych i te same przegrody ze świadomie ukształtowanymi defektami, badać w odpowiednio dużych komorach klimatycznych, w różnej konfiguracji temperatury powietrza i ciśnienia po obu stronach przegrody oraz symulowanej prędkości wiatru. Ze względu na bardzo dużą liczbę różnych przegród i ich połączeń poziomych oraz pionowych (naroża poziome i pionowe) takich badań w kraju i na świecie obecnie się już praktycznie nie wykonuje. Pierwsze termogramy odniesienia dla przegród budowlanych domów jednorodzinnych w systemie szkieletu drewnianego powstały z początkiem i w połowie lat 70. ubiegłego wieku w Szwecji [149], [150]. Można zauważyć, że w normie PN-EN 13187 [217] z roku 2001 jako przykładowe termogramy odniesienia dołączono właśnie te termogramy odniesienia, a więc wykonane ponad 25 lat wcześniej (w międzyczasie, ze względu na pracochłonność oraz wysokie koszty realizacji, nie wykonano innych dodatkowych termogramów odniesienia).

W tej sytuacji wydaje się, że najskuteczniejszą i ekonomicznie uzasadnioną metodą uzyskania wzorcowego rozkładu temperatury na powierzchni badanych elementów do celów porównawczych jest korzystanie z wyników obliczeń numerycznych dla dwu- i trójwymiarowego przepływu ciepła przez przegrody budowlane i ich połączenia.

Badania termowizyjne od strony pomieszczenia odbywają się w bardziej stabilnych warunkach temperaturowych i dlatego są dokładniejsze niż badania od strony zewnętrznej, a stabilność tych warunków cieplnych jest warunkowana przede wszystkim sposobem ogrzewania budynku. W przypadku wykonywania termowizyjnych badań ilościowych (mających na celu np. wyznaczanie oporu cieplnego przegrody czy też współczynnika przenikania ciepła przegrody budowlanej) badania termowizyjne powinny być wykonywane właśnie od strony wewnętrznej. W trakcie tych badań należy przestrzegać ogólnych zasad wykonywania pomiarów termowizyjnych (rozdz. 6.3.5), przy czym unikać (patrz rozdz. 6.7.8) wykonywania pomiarów w pobliżu urządzeń grzewczych, źródeł oświetlenia, czy też dużej liczby osób w pomieszczeniu pomiarowym oraz wykonywać badania ścian nieosłoniętych firanami, zasłonami itp.).

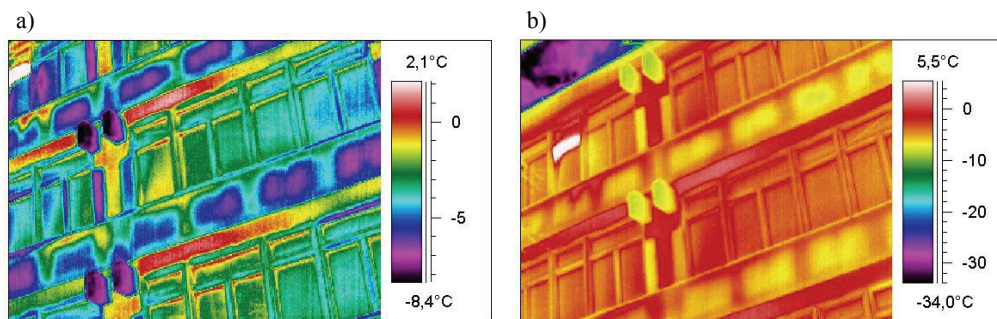
W przypadku badań termowizyjnych wykonywanych od strony zewnętrznej należy wziąć pod uwagę fakt występowania różnego rodzaju przegród, specyficznych w kontekście interpretacji termogramów, tzn. ścian osłonowych (najczęściej charakteryzują się dużą pojemnością cieplną i są mało podatne na zmiany temperatury powietrza zewnętrznego, ale w ostatnim okresie występują lekkie ściany osłonowe w systemach konstrukcji szkieletowych drewnianych lub na bazie kształtowników stalowych zimnogiętych) oraz ścian warstwowych, często z małą bezwładnością cieplną warstwy elewacyjnej. Badanymi elementami elewacyjnymi mogą być również balkony (tworzące najczęściej mostki cieplne liniowe w miejscach połączenia żelbetowej konstrukcji balkonu z wieńcem żelbetowym), loggie (najczęściej występuje efekt „ciepłego cienia”, patrz niżej). Specyficznymi przegrodami w kontekście pomiarów termowizyjnych są również połączenia dachowe i stropodachy (rozdz. 6.7.5, 6.7.6 oraz 6.7.10) oraz okna i fasady przeszklone (rozdz. 6.7.3).

W interpretacji termogramów wykonanych od strony zewnętrznej budynku należy zachować ostrożność, gdyż uzyskany rozkład temperatury może wynikać zarówno z wad izolacji cieplnej, jak i z występowania zjawiska, tzw. „ciepłego cienia”, które może pojawić się pod okapem dachu, pod balkonem, we wnęce loggi itp. „Ciepły cień” to nic innego jak skutek wzajemnego radiacyjnego (termicznego) oddziaływania dwóch powierzchni stykających się ze sobą najczęściej pod kątem prostym, przy czym w większości przypadków jedna z tych powierzchni jest pozioma (np. płyta balkonowa) lub ukośna (np. okap dachu) i osłania drugą powierzchnię (najczęściej ścianę) przed chłodzeniem radiacyjnym bezchmurnego zimnego nieboskłonu. Ciepły cień występuje również na ścianach loggii. W strefie styku tych dwóch przegród na powierzchni ściany występuje podwyższona temperatura w stosunku do pozostałej części ściany. W termowizyjnych badaniach budynków w ciągu słonecznego dnia może również wystąpić zjawisko tzw. „zimnego cienia”, który pokrywa się oczywiście ze zwy-

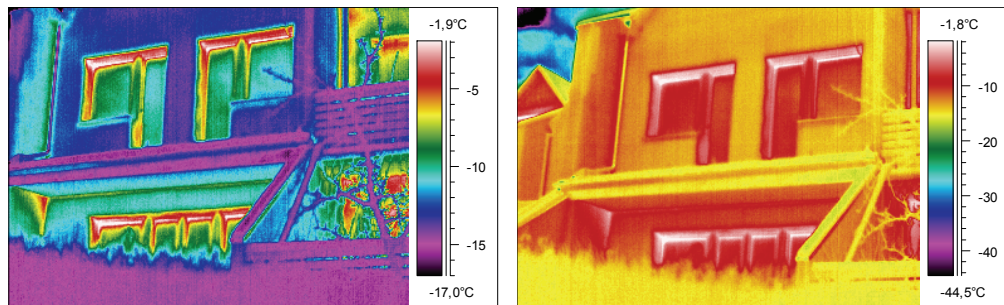
kłym cieniem rzucanym przez oświetlone słońcem wystające elementy budynku lub z cieniem rzucanym przez inne budynki (rys. 6.16 i 6.17). Przypomnijmy, termowizyjnych badań budynków absolutnie nie należy wykonywać w ciągu dnia, tylko kilka godzin po zachodzie słońca, a badania w ciągu dnia można wykonywać jedynie w celach dydaktyczno-szkoleniowych. Może się również zdarzyć, że skutki wadliwej izolacji cieplnej pod okapem dachu czy też pod balkonem nałożą się z efektem „ciepłego cienia”, który najintensywniej występuje podczas bezchmurnych nocy (efekt zimnego nieba). Efekt „ciepłego cienia” jest skutecznie niwelowany przez wykonywanie badań przy całkowicie zachmurzonym nieboskłonie.

Skutkiem oddziaływania bezchmurnego zimnego nieboskłonu najczęściej jest wychładzanie powierzchni stropodachów i połaci dachowych oraz ścian górnych kondygnacji budynków poniżej temperatury otaczającego powietrza (chłodzenie radiacyjne). Bezchmurny zimny nieboskłon, widoczny w obiektywie kamery termowizyjnej, może również powodować rozszerzenie zakresu skali mierzonej temperatury i w konsekwencji zmienić układ barw na termogramie, co pokazano na rysunkach 6.25 i 6.26 (komentarz pod rysunkami, [142]).

Termogram badanej powierzchni zawiera dwie zasadnicze informacje, a mianowicie informację o temperaturze w danym punkcie oraz o zasięgu obszarów izotermicznych. Należy pamiętać, że w formie ukrytej termogram zawiera również informację o współczynniku emisyjności badanej powierzchni (jedna zadana wartość w systemie kamery termowizyjnej dla całej badanej powierzchni), o czym często zapominają początkujący operatorzy kamer termowizyjnych. Interpretują oni termogramy jedynie na podstawie rozkładu temperatury i często używają kolorowej skali, zakres temperatury oraz tzw. palety termogramów (patrz również rozdz. 6.3.1), które niejednokrotnie przejawiają (wyolbrzymiają) małe różnice temperatury na badanej powierzchni.



Rys. 6.25. Przykłady termogramów elewacji budynku wielokondygnacyjnego: a) termogram górnej części elewacji, b) termogram tej samej górnej części elewacji, ale z widocznym małym fragmentem bezchmurnego zimnego nieboskłonu w lewym górnym rogu – system kamery automatycznie zmienił zakres temperatury na skali po prawej stronie termogramu, w konsekwencji zmienił się układ barw na termogramie. Oczywiście temperatura w poszczególnych punktach elewacji na obu termogramach jest taka sama, zmieniła się jedynie ich prezentacja graficzna

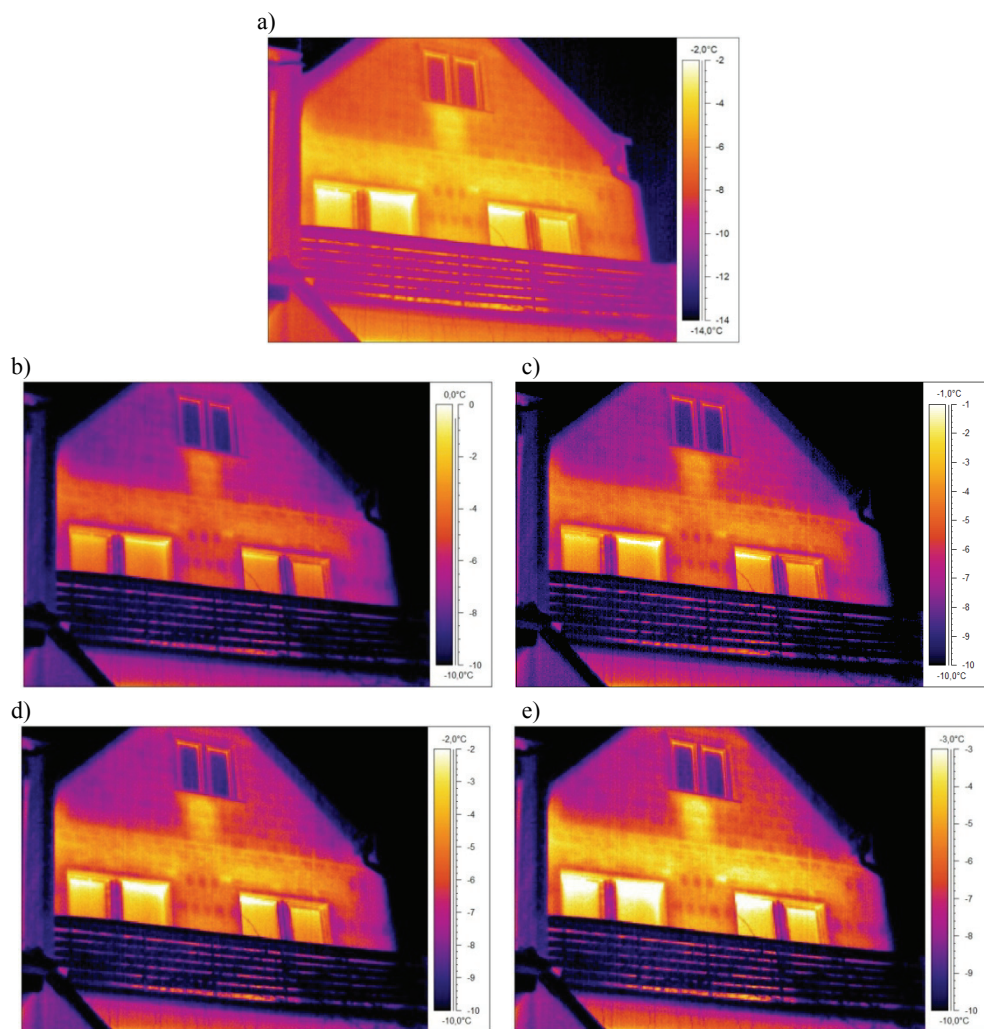


Rys. 6.26. Przykłady termogramów elewacji domu jednorodzinnego: a) termogram górnej części elewacji, b) termogram tej samej górnej części elewacji, ale z widocznym małym fragmentem bezchmurnego zimnego nieboskłonu w lewym górnym rogu – podobnie jak na rysunku powyżej, system kamery automatycznie zmienił zakres temperatury na skali po prawej stronie termogramu, w konsekwencji zmienił się układ barw na termogramie. Oczywiście i w tym przypadku temperatura w poszczególnych punktach elewacji na obu termogramach jest taka sama, zmieniła się jedynie ich prezentacja graficzna, co może być pretekstem do nadinterpretacji termogramu

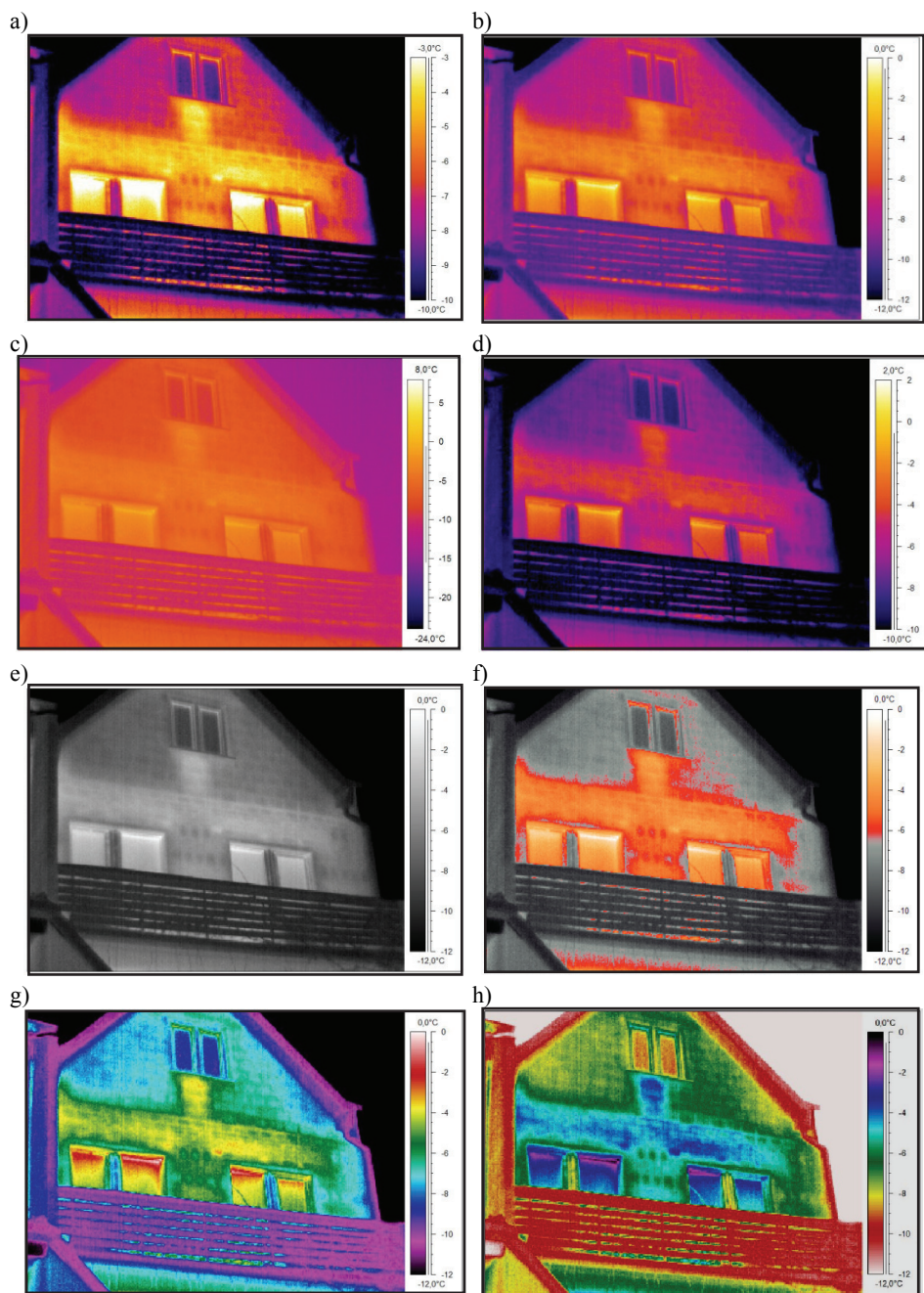
Na rysunku 6.27 przedstawiono bardzo często stosowaną w ostatnich latach w naszym kraju paletę roztopionego żelaza (ang. *iron*), z pokazaniem zmian wizualizacji barw na termogramie przy bardzo niewielkich zmianach skali temperatury po prawej stronie termogramów.

Na rysunku 6.28 przedstawiono ten sam fragment elewacji domu jednorodzinnego co na rysunku 6.27, ale dla innego zakresu skali temperatury po prawej stronie termogramu i dla różnych palet kolorystycznych – rys. 6.28: a–d paleta roztopionego żelaza (ang. *iron*), rys. e – paleta szara (ang. *grey*), rys. f – paleta dwubarwna (ang. *bicolor*), rys. g – paleta tęczy (ang. *rain*) i rys. h – odwrócona paleta tęczy (ang. *invert rain*). Potwierdza się spostrzeżenie z rysunku 6.27, że im mniejsza jest różnica na skali temperatury termogramu, tym bardziej sugestywny kolorystycznie jest dany termogram (rys. 6.28a) i na odwrót, dla największej różnicy temperatury na skali temperatury (rys. 6.28c) można by mylnie wnioskować, z powodu małego zróżnicowania temperatury na powierzchni badanej ściany, o braku problemów z izolacją cieplną w tej ścianie. Na rysunku 6.28b i d pokazano, że z zachowaniem stałego zakresu temperatury (12 °C), ale zmiennym poziomem temperatury (na rys. b poziom od 0 do –12 °C, na rys. d poziom od +2 do –10 °C) można uzyskać bardzo widoczne zmiany kolorów na elewacji, które mogłyby sugerować, że w przypadku (b) są problemy z izolacyjnością cieplną ściany zewnętrznej, podczas gdy w przypadku (d) tych problemów nie ma.

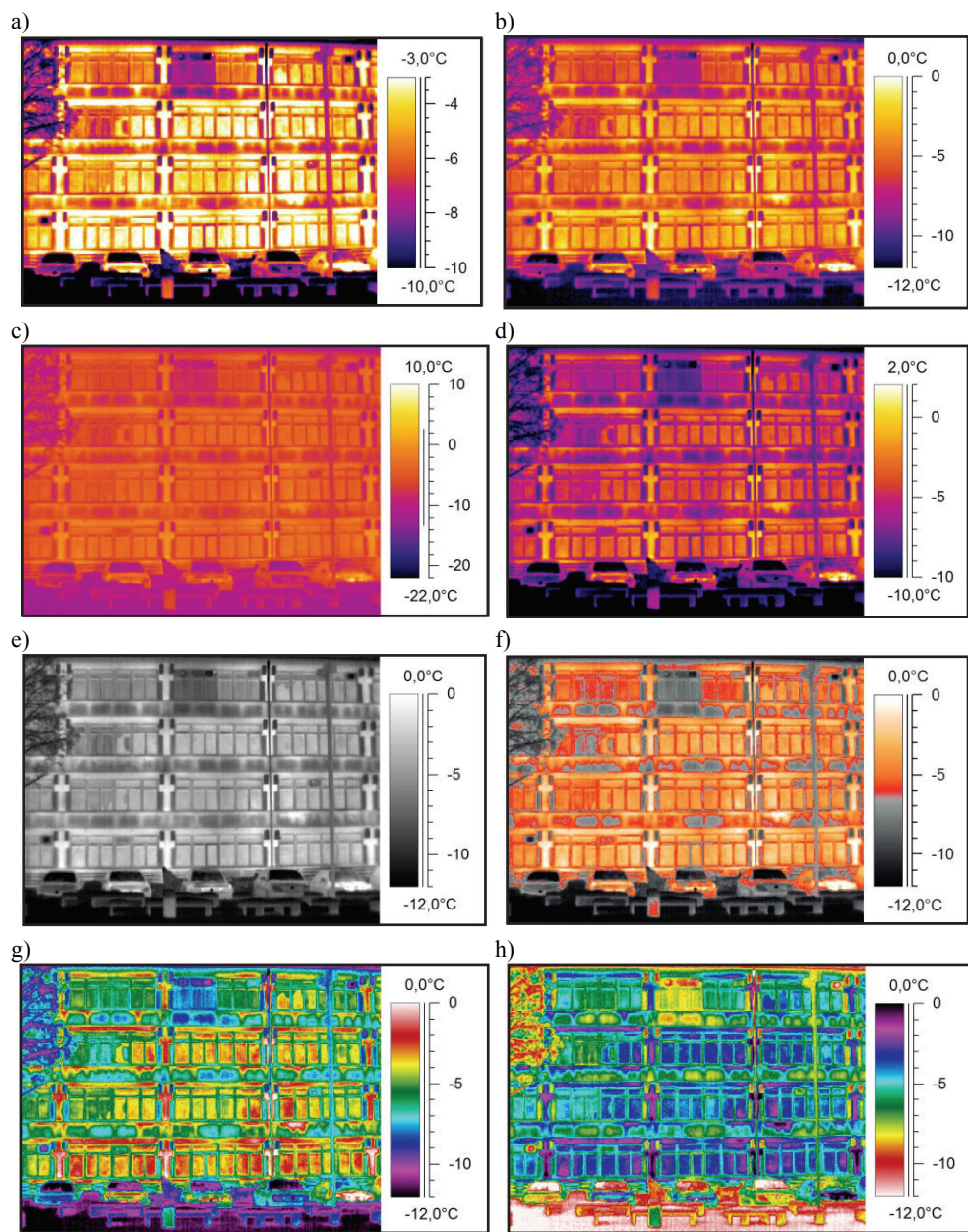
Na rysunku 6.28e dla porównania pokazano praktycznie nieużywaną już dzisiaj paletę szarą (bardzo często stosowaną na początku korzystania z kamer termowizyjnych w połowie lat 70. ubiegłego stulecia), natomiast na rysunku 6.28f pokazano termogram w skali szarości z zadaniem dodatkowym zakresem temperatury w innym kolorze (paleta dwubarwna). Na rysunku 6.28g przedstawiono termogram ściany,



Rys. 6.27. Przykłady termogramów fragmentu elewacji domu jednorodzinnego w palecie roztopionego żelaza (ang. *iron*) dla różnych zakresów skali temperatury: a) termogram automatycznie wygenerowany przez kamerę termowizyjną (zakres skali od $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-14,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), pozostałe termogramy różnią się od poprzednich jedynie o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na skali temperatury: b) zakres temperatury od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, c) zakres temperatury od $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, d) zakres temperatury od $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, e) zakres temperatury od $-3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Przy tak niewielkim zróżnicowaniu skali temperatury widoczne jest wyraźne zróżnicowanie kolorystycznego wyglądu termogramów. Im mniejsza jest różnica temperatury na skali po prawej stronie, tym bardziej sugestywna jest prezentacja graficzna termogramu (termogram e), przy czym oczywiście temperatura w danym punkcie na wszystkich termogramach jest taka sama. Ten prosty zabieg zmiany zakresu temperatury skali po prawej stronie niestety może być nadużywany do wyolbrzymiania małych zmian temperatury na badanej powierzchni. Termogram wykonano w temperaturze powietrza zewnętrznego $-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i temperaturze wewnątrz budynku $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, emisyjności powierzchni ścian $0,92$ i odległości od budynku $15,0\text{ m}$



Rys. 6.28. Przykłady termogramów fragmentu elewacji domu jednorodzinnego wykonane w różnych paletach barw, dla różnych zakresów i poziomów temperatury na skali temperatury termogramów (komentarz w tekście)

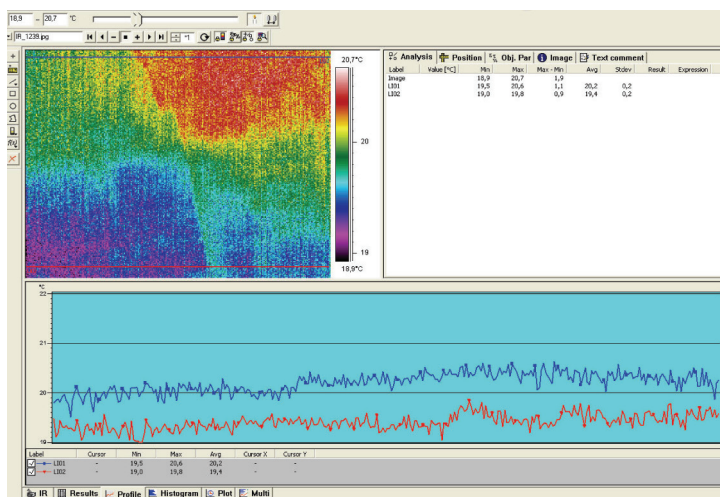


Rys. 6.29. Przykłady termogramów elewacji budynku użyteczności publicznej, wykonane w różnych paletach barw, dla różnych zakresów i poziomów temperatury na skali temperatury termogramów (komentarz w tekście podobny jak do rys. 6.28)

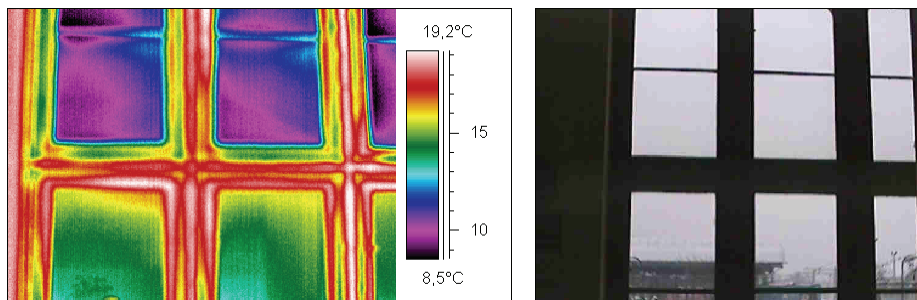
w najczęściej stosowanej przez Autora palecie tęczy, natomiast dla porównania na rysunku 6.28h termogram z odwróconą paletą tęczy. Porównując termogramy na rysunku 6.28, można sobie odpowiedzieć na pytanie – dlaczego obecnie preferowane są kolorowe palety i dlaczego obecnie praktycznie nie stosuje się palety szarej.

Na wszystkich termogramach na rysunkach 6.27 i 6.28 można zauważyć, że temperatura powierzchni szyb w oknie na najwyższej kondygnacji (na poddaszu) jest niższa od temperatury szyb w oknach poniżej, co mogłoby sugerować lepsze właściwości cieplne tego okna. Jednak tak nie jest – niższa temperatura szyb okna poddaszowego wynika z kilku powodów. Po pierwsze, poddasze jest ogrzewane mniej intensywnie niż kondygnacje poniżej (o ogrzewaniu świadczy grzejnik, który „widać” pod oknem, w tym miejscu występuje znacznie wyższa temperatura ściany). Po drugie termogram ściany wykonano pod zbyt dużym kątem patrzenia i stąd zniekształcenie obrazu termalnego okna na najwyższej kondygnacji – aby poprawnie wykonać termogram najwyższej kondygnacji należałoby jeszcze bardziej oddalić się od budynku na odpowiednią odległość (patrz rozdz. 6.7.3). Wreszcie, najwyższa ściana budynku, w tym okno poddasza, były poddane zjawisku chłodzenia radiacyjnego przez częściowo zachmurzony nieboskłon.

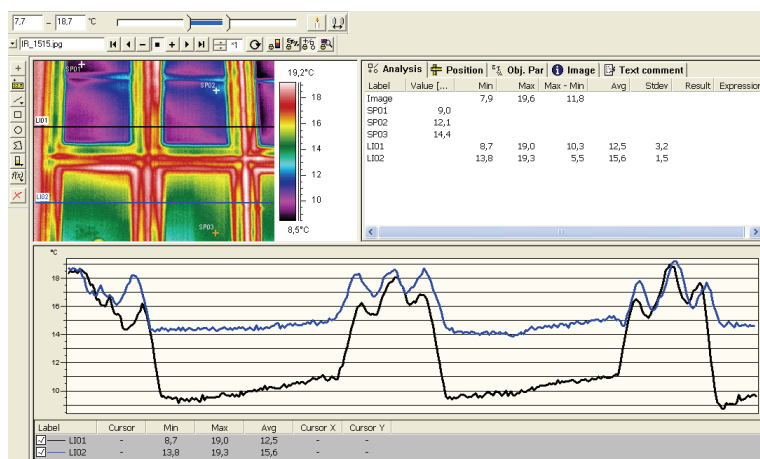
Na rysunku 6.29 dla porównania przedstawiono, w podobnym układzie palet kolorów i zakresów oraz poziomów zmian temperatury na poszczególnych skalach temperatury, termogramy fragmentu elewacji budynku użyteczności publicznej. Komentarz do poszczególnych palet barw, zakresów i poziomów zmian temperatury na skalach temperatury poszczególnych termogramów, jest podobny do komentarza do rysunku 6.28.



Rys. 6.30. Przykład wyników analizy rozkładu temperatury na termogramie z pokazaniem przebiegu temperatury na powierzchni stropu wzdłuż dodatkowo wprowadzonych dwóch linii pomocniczych (kolor linii przebiegu temperatury odpowiada kolorowi linii pomocniczej na termogramie). Ważna jest w tym przypadku różnica temperatury na powierzchni przegrody w sąsiadujących miejscach pomiarowych



Rys. 6.31. Termogram okna wykonany od strony pomieszczenia – widoczny jest podział okna na część dolną „cieplejszą” podwójnie szklaną i górną „zimniejszą” pojedynczo szklaną. Różnica temperatury szyb wynosi około 5,5 °C. Termogram poddano dokładniejszej analizie numerycznej, której wybrane wyniki przedstawiono poniżej



Rys. 6.32. Fragment wyników analizy rozkładu temperatury, przedstawionego na rys. 6.31, z pokazaniem przebiegu temperatury wzdłuż wprowadzonych dwóch linii pomocniczych, w miejscach o największym zróżnicowaniu temperatury (kolor linii przebiegu temperatury odpowiada kolorowi linii pomocniczej na termogramie). W tym przypadku ważna zarówno temperatura na powierzchniach szyb, jak i różnica temperatury. Podana jest również temperatura w trzech dodatkowo wprowadzonych punktach. Różnice temperatury pokazują m.in., wpływ rodzaju oszklenia na straty ciepła z pomieszczenia

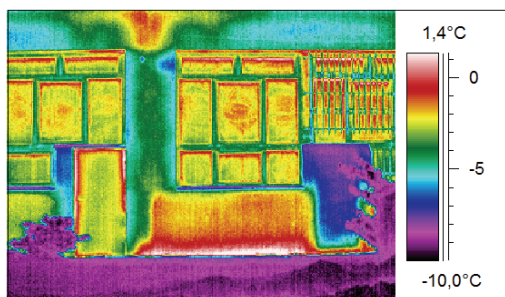
Defekty izolacji cieplnej w przegrodach, nieszczelności powietrza i/lub zawilgoce-
nie przegród oraz struktura przegród warunkują tworzenie się różnych przebiegów
(wzorów) temperatury badanej powierzchni. Pewne rodzaje defektów skutkują charak-
terystycznym kształtem na obrazie termalnym, który jest poddawany dalszej analizie.
W ocenie termogramów bardzo przydatne są specjalistyczne programy komputerowe
umożliwiające między innymi wszechstronną analizę dodatkowych czynników, które
należy wziąć pod uwagę w ocenie termogramów, a mianowicie:

- równomierność rozkładu temperatury części przegrody bez mostków cieplnych,
- regularność i wymiary stref o podwyższonej i obniżonej temperaturze,
- przebiegi powierzchniowych gradientów temperatury (wzdłuż wybranych kierunków lub w wybranych obszarach termogramu),
- ustalenie udziałów powierzchniowych powierzchni izotermicznych, co może być przydatne w wyznaczaniu zasięgu mostków termicznych.

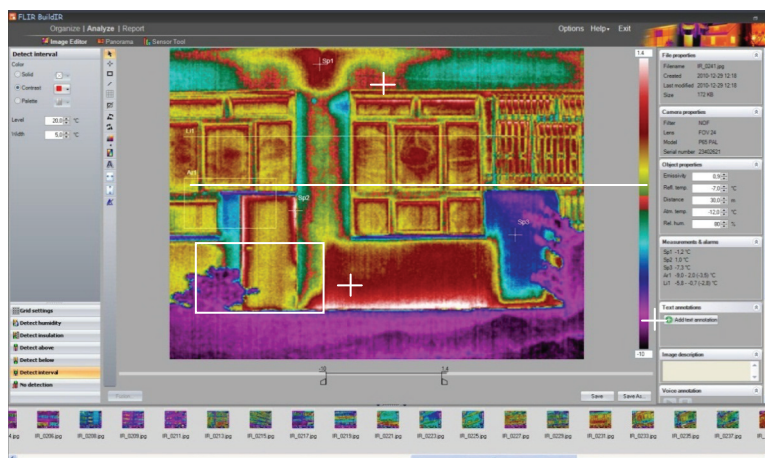
Przykład zastosowania programu komputerowego do analizy termogramów pokazano na rysunkach 6.30, 6.32 i 6.33.

W trakcie analizy i interpretacji termogramów bardzo ważne jest skojarzenie otrzymanego rozkładu temperatury badanej powierzchni z jej współczynnikiem emi-

a)



b)



Rys. 6.33. Fragment elewacji budynku użyteczności publicznej, wykonanego w technologii tradycyjnej około 40 lat temu: a) termogram ilustrujący bardzo złą izolacyjność cieplną ściany w części podokiennej oraz w górnej części ściany między oknami, złą izolacyjność oraz mostki cieplne w strefach węgarów okiennych i drzwiowych, b) przykład wyników analizy rozkładu temperatury na termogramie dla wybranej izotermii (środek przedziału temperaturowego), dla trzech wybranych punktów, wzdłuż linii oraz dla obszaru prostokąta

syjności. Ten istotny problem badawczy oraz skutki pomiarów powierzchni o małym współczynniku emisyjności, tj. o dużym współczynniku odbicia promieniowania cieplnego, omówiono w rozdziale 6.4.1. W interpretacji termogramów budynków powinno uwzględnić się również uwagi zawarte w rozdziale 5, w którym omówiono zagadnienia związane z radiacyjną wymianą ciepła budynku z otoczeniem oraz zawarte w rozdziale 6.4.2, w którym omówiono różne czynniki wpływające na dokładność pomiarów termowizyjnych. W rozdziale 6.7 natomiast przedstawiono przykłady badań termowizyjnych w budownictwie ze stosownym komentarzem.

6.7. Badania termowizyjne w budownictwie

6.7.1. Zakres termowizyjnych badań w budownictwie

Zakres badań termowizyjnych w budownictwie jest bardzo szeroki i różnorodny, umożliwiający identyfikację wielu problemów z zakresu ochrony cieplnej budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej oraz problemów w innych obiektach budowlanych.

Zakres typowych termograficznych badań budynków obejmuje:

- badanie termicznej obudowy budynków – badaniom najczęściej są poddawane ściany zewnętrzne, okna i drzwi balkonowe, dachy, stropodachy, stropodachy odwrócone, dachy zielone, połącze dachowe, połączenia balkonów ze ścianami, loggie, stropy nad nieogrzewaną piwnicą, strop nad nieogrzewanymi garażami, stropy nad przejazdami, stropy z ogrzewaniem podłogowym itp. oraz ich połączenia (węzły) w celu określenia rzeczywistego rozkładu temperatury na badanej powierzchni przegrody i ustalenie czy rozkład jest prawidłowy, głównie pod kątem identyfikacji liniowych i punktowych mostków cieplnych,
- ocenę jakości izolacji termicznej w przegrodach (badania od strony zewnętrznej i od strony wewnętrznej w wybranych pomieszczeniach), analizę i ocenę rodzaju oraz zakresu defektów spowodowanych np. brakiem lub pocienieniem izolacji termicznej,
- wykonywanie kontroli jakości prac izolacyjnych, o zakresie jak poprzednio, w budynkach nowych jako etap odbioru robót budowlanych,
- wykonywanie kontroli jakości prac w budynkach poddanych termomodernizacji, jako etap odbioru tych prac,
- wykonywanie kontroli jakości napraw i ocieplenia przegród,
- ocenę poprawności montażu i szczelności stolarki okiennej i drzwiowej (lokalizacja miejsc niepożądanego infiltracji powietrza),
- ocenę poprawności montażu i szczelności połączenia systemowych płyt ściennych i stropodachowych lekkiej obudowy hal ogrzewanych,

- względną ocenę jakości okien i drzwi balkonowych, w tym zestawów szyb zespolonych, pod kątem izolacyjności termicznej (patrz rozdział 6.7.3),
- badanie systemów grzewczych, w tym instalacji wewnętrznych, kotłowni i węzłów cieplnych, pod kątem strat ciepła, szczelności i wad instalacji,
- badanie rozkładu temperatury na wybranych elementach instalacji centralnego ogrzewania, głównie na grzejnikach i przewodach rozprowadzających, w celu określenia prawidłowości działania urządzeń.
- identyfikację zawilgocenia przegród budowlanych i materiałów, generujących ryzyko rozwoju grzybów pleśniowych,
- lokalizację fragmentów zawilgoconych murów,
- lokalizację niepożądaną infiltracji powietrza przez szczelności w obiektach budowlanych.

Niezależnie od wymienionych najczęstszych zastosowań w budynkach metodę badań termograficznych można również zastosować do:

- badania stropodachów budynków ze śmigłowca lub małego samolotu metodą tzw. termografii lotniczej (ang. *aerial thermography*, rozdz. 6.7.10),
- badania elementów budowlanych metodą termografii aktywnej, mającej na celu ocenę skuteczności wzmacniania konstrukcji budowlanych, np. konstrukcji betonowych, stalowych czy ceglanych, taśmami węglowymi CFRP (ang. *Carbon Fibre Reinforcement Polymer*). Ta metoda wzmacniania konstrukcji w ostatnich latach bardzo się rozpowszechniła, ale jak dotychczas nie znaleziono skutecznego sposobu weryfikacji jakości połączenia (wiązania) między taśmami wzmacniającymi a konstrukcją. Bardzo dobrze nadaje się do tego właśnie termografia aktywna, za pomocą której można wykrywać niejednorodności w warstwie przypowierzchniowej materiału. Istotą tego badania jest określenie miejsca i wielkości występowania ewentualnych pustek powietrznych i nieciągłości połączenia pomiędzy konstrukcją i taśmami wzmacniającymi,
- badania budynków zabytkowych, np. w celu identyfikacji materiałów wbudowanych w przegrody w różnym okresie i do lokalizacji zabudowanych (niewidocznych) elementów konstrukcyjnych,
- wykrywania położenia rur wodnych wewnątrz murów oraz do lokalizacji awarii rur wodnych przebiegających w murach, pod ziemią i w posadzkach,
- lokalizacji przecieków instalacji ogrzewania podłogowego,
- badania stanu technicznego i szczelności kominów wentylacyjnych oraz kanałów odprowadzających spaliny,
- lokalizacji uszkodzeń i oceny jakości izolacji cieplnej w instalacjach przemysłowych, w sieciach grzewczych i wodociągowych,
- lokalizacji złego stanu izolacji cieplnej kotłów, rurociągów, izolowanych kanałów,
- badania uszkodzeń wymurówki pieców, kominów żelbetowych,
- lokalizacji przebiegu sieci ciepłowniczej w gruncie,

- badania stanu urządzeń klimatyzacyjnych,
- lokalizacji podziemnych sieci cieplnych i energetycznych,
- wykrywania złego stanu przewodów doprowadzających gazy,
- badania szczelności chłodni kominowych,
- analizy termicznej kotłów energetycznych,
- badania stanu zaizolowania kominów,
- badania mostów i sklepień ceglanych,
- badania mostów żelbetowych,
- badania nawierzchni dróg,
- i innych.

Oprócz badania obiektów rzeczywistych wykonuje się również termowizyjne badania przegród i/lub elementów budowlanych w laboratoriach, zwłaszcza w komorach klimatycznych.

Mogą to być badania:

- połączeń poszczególnych przegród (węzłów konstrukcyjnych) prawidłowo zaizolowanych termicznie, mające na celu uzyskanie tzw. termogramów porównawczych (termogramów odniesienia) – badania w komorach klimatycznych w warunkach ustalonego (stacjonarnego) przepływu ciepła,
- okien – w warunkach ustalonego przepływu ciepła, do jakościowej oceny ich izolacyjności cieplnej oraz do analizy przepływu ciepła przez poszczególne części okna (rozdz. 6.7.3); termogramy okien wykonane w komorach klimatycznych mogą stanowić termogramy odniesienia dla okien badanych w budynkach istniejących,
- przegród budowlanych metodą termografii aktywnej, mające na celu opracowanie procedury badawczej identyfikacji wtrąceń materiałowych w przegrodach o nieznanym budowie,
- elementów budowlanych metodą termografii aktywnej, mającej na celu opracowanie metodyki badań i oceny skuteczności wzmocnienia konstrukcji budowlanych, np. konstrukcji betonowych, stalowych czy ceglanych taśmami węglowymi CFRP – opis metody oraz ewentualne problemy związane ze stosowaniem tej metody przedstawiono wcześniej,
- przegród poddawanych cyklicznym procesom zawilgocenia i przyspieszonego suszenia w celu opracowania (ewentualnie dobrania) odpowiedniej metody osuszania przegród,
- przegród budowlanych w ustalonych stanach periodycznych wymuszenia temperaturowego, mające na celu opracowanie ilościowej metody oceny przegród budowlanych, ze wspomaganie pomiaru miernikiem płytowym gęstości strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę (opracowanie metodyki wyznaczania wartości całkowitego oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła),
- przegród budowlanych w ustalonych stanach periodycznych wymuszenia temperaturowego, mające na celu opracowanie ilościowej metody oceny przegród budowlanych jedynie na podstawie mierzonych wartości odpowiednich temperatur,

tj. bez dodatkowego pomiaru miernikiem płytowym gęstości strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę (opracowanie metodyki wyznaczania współczynnika przenikania ciepła).

Niestety, wadą termowizyjnych badań laboratoryjnych jest zazwyczaj stosunkowo długi okres badania oraz wysoki koszt realizacji.

6.7.2. Badania budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej

Termowizyjne badania budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej powinny być wykonane zarówno od strony zewnętrznej, jak i od strony pomieszczeń, nawet gdy badanie dotyczy jedynie wybranego lokalu mieszkalnego czy biurowego. Badania od strony zewnętrznej mają na celu termiczną ocenę poszczególnych fragmentów elewacji, ocenę budynku jako całości oraz ewentualnie wytypowanie lokali mieszkalnych (biurowych) do szczegółowych badań od strony wewnętrznej. Natomiast badania od strony pomieszczeń pozwalają na bardziej szczegółową analizę i ocenę cieplną poszczególnych lokali oraz przegród budowlanych tworzących termiczną obudowę budynku. Badania w pomieszczeniach są wykonywane w zdecydowanie bardziej stabilnych warunkach temperaturowych. Specyficznymi pomieszczeniami do badań są mieszkania lub inne lokale poddaszowe, ponieważ w razie braku możliwości wykonania badań połaci dachowych z zewnątrz (przypomnijmy, pomiarów połaci dachowych nie można wykonywać z poziomu terenu ze względu na niekorzystny kąt patrzenia kamery na połać dachową), w tym metodą termografii lotniczej (patrz rozdz. 6.7.10), pomiary połaci dachowych praktycznie niemal zawsze wykonuje się jedynie od strony pomieszczeń (rozdz. 6.7.5).

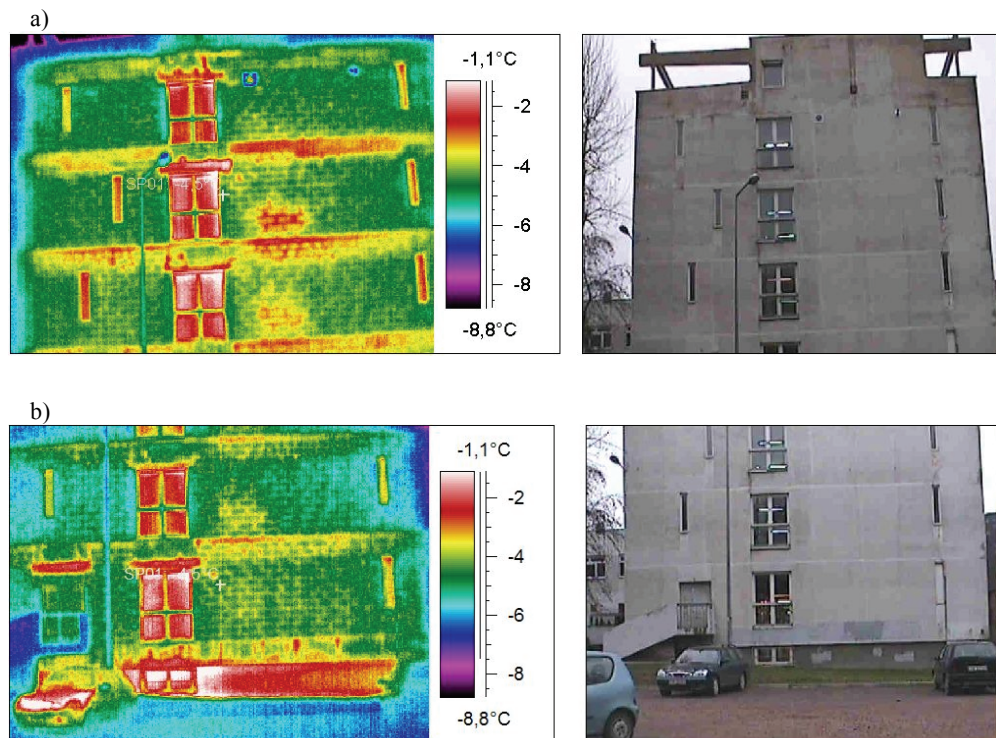
Na termogramach wykonanych od strony zewnętrznej miejsca niewłaściwego zaizolowania termicznego, ubytku izolacji cieplnej oraz mostki cieplne w przegrodach budowlanych widoczne są jako miejsca cieplejsze w stosunku do pozostałej części przegrody. Gdy pomiary wykonywane są od strony pomieszczenia, na termogramach ubytki izolacji cieplnej, mostki cieplne, nadmierna infiltracja zimnego powietrza do pomieszczenia i zawilgocenie przegród są widoczne jako miejsca zimniejsze. Przypomnijmy, w przypadku badania obiektów całorocznie chłodzonych, badania przeprowadzamy w lecie (nad ranem w nocy), a miejsca mostków cieplnych od strony zewnętrznej w tym przypadku są chłodniejsze w stosunku do pozostałej części przegrody (miejsca strat ciepła), natomiast od strony chłodzonych pomieszczeń są cieplejsze.

W dalszej części przedstawiono przykładowe termogramy, stanowiące ogólny ogląd budynków badanych od strony zewnętrznej i od strony pomieszczeń, z pokazaniem charakterystycznych defektów izolacji termicznej, mostków cieplnych, infiltracji powietrza przez stolarkę okienną itp. Ponieważ pomiary termowizyjne w budownictwie mogą obejmować bardzo szeroki zakres tematyczny (rozdz. 6.7.1), pozostałe główne obszary badawcze zostały przedstawione w rozdziałach od 6.7.3 do 6.7.11.

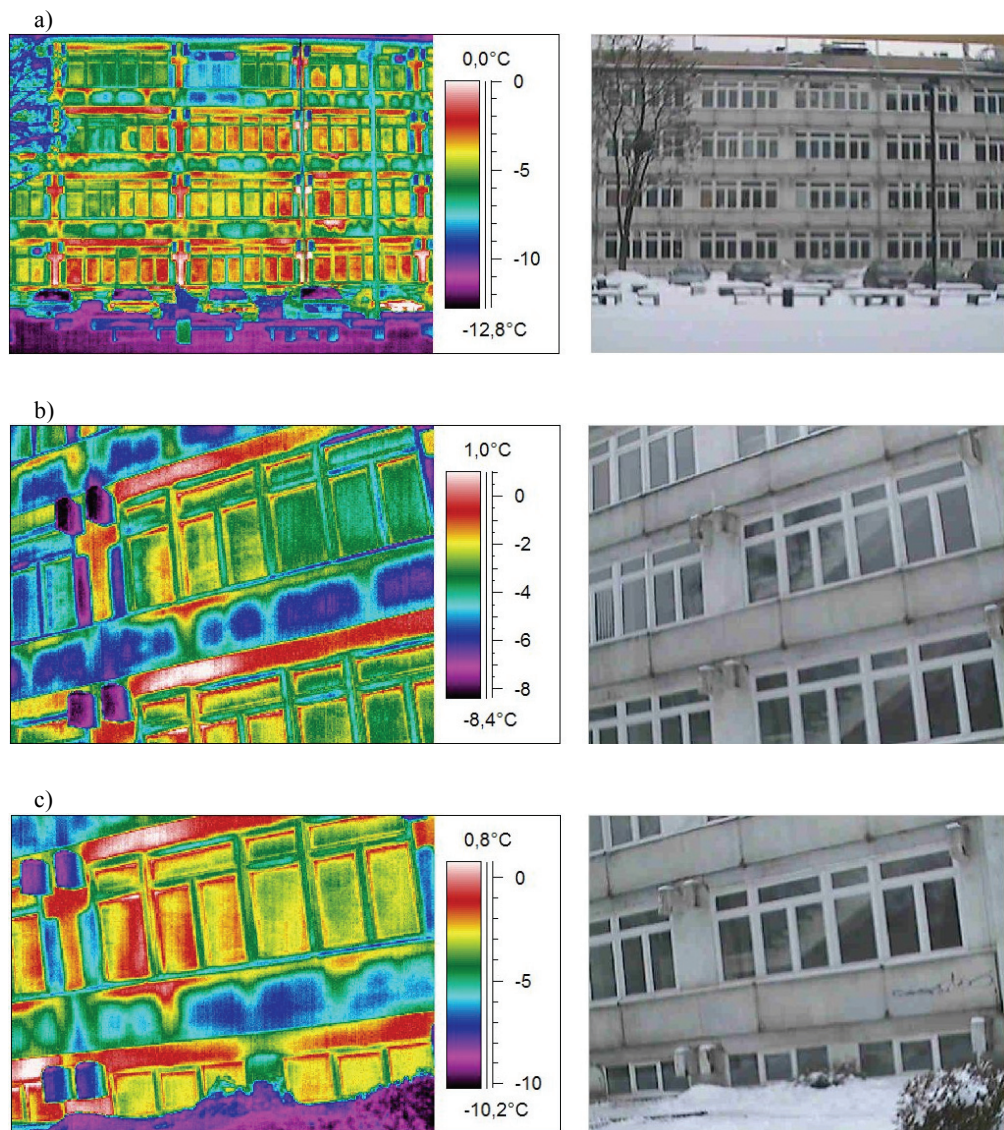
Zgodnie z przyjętą w tej książce zasadą, stosowny komentarz do uzyskanych wyników badań zamieszczono pod termogramami.

Badania budynków od strony zewnętrznej – identyfikacja wadliwej izolacji cieplnej przegród oraz mostków cieplnych

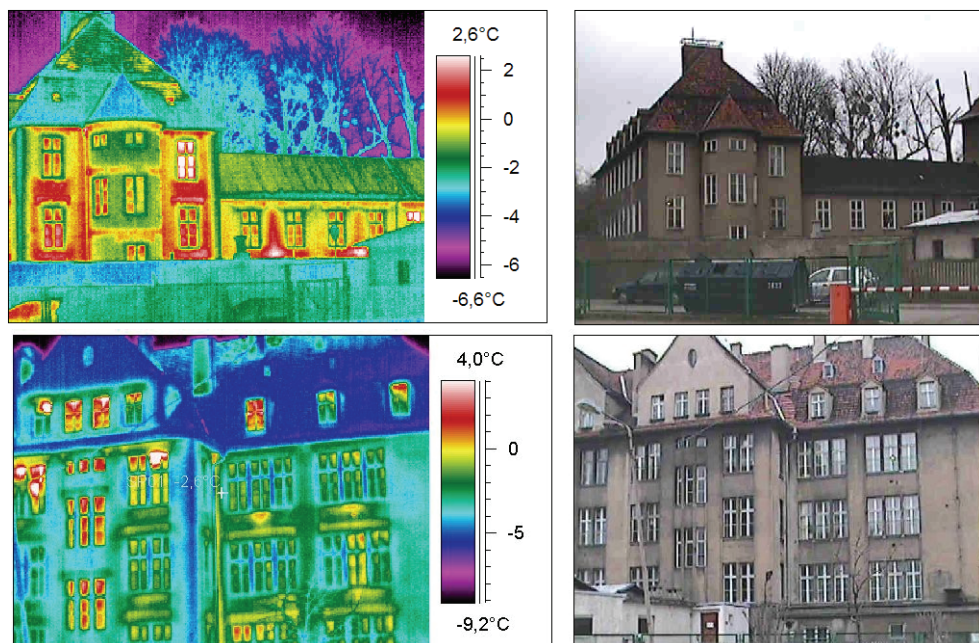
Na rysunkach od 6.34 do 6.49 przedstawiono termogramy elewacji budynków wzniesionych w różnym okresie w kilku technologiach wykonawczych, z pokazaniem charakterystycznych defektów w termicznej obudowie budynków.



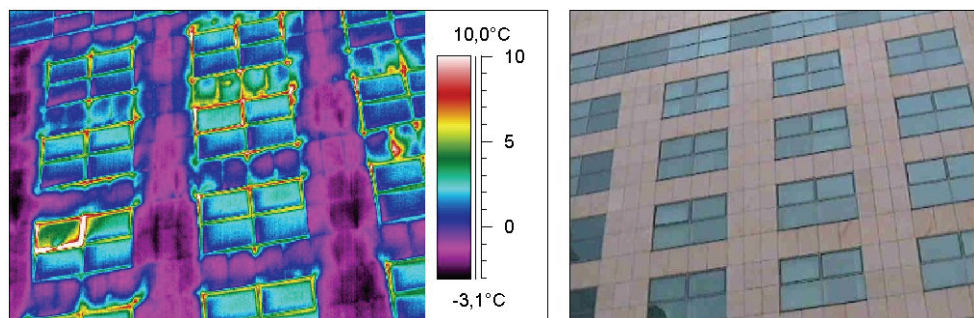
Rys. 6.34. Termogramy ściany szczytowej budynku wybudowanego w połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, w technologii tradycyjnej, bez ocieplenia ścian: a) część górna elewacji, b) część dolna elewacji. Widoczne są miejsca dużych strat ciepła przez okna, ścianę zewnętrzną bez ocieplenia (cieplejsze miejsca w części środkowej ściany), intensywne mostki cieplne na poziomie wieńców żelbetonowych i w miejscach nadproży okiennych i drzwiowych oraz mała izolacyjność cieplna okien. Ponadto widoczne są duże straty ciepła przez nieocieploną betonową ścianę piwnicy (za ścianą znajdują się pomieszczenia ogrzewane) – temperatura powierzchni ściany jest praktycznie taka sama jak temperatura szyb w oknach



Rys. 6.35. Termogramy elewacji ściany osłonowej budynku pokazanego na rys. 6.34: a) widok ogólny elewacji, b) fragment górnej części elewacji, c) fragment dolnej części elewacji. Praktycznie wszystkie okna charakteryzują się bardzo małą izolacyjnością cieplną, widoczne są mostki cieplne liniowe na poziomie wieńców żelbetowych, w częściach podokiennych pod podokiennikami oraz w obszarach międzyokiennych (osłonięte od zewnątrz w płaszczyźnie ściany słupy żelbetowe dwuwspornikowe)

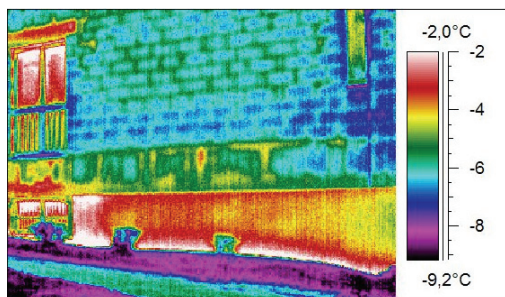


Rys. 6.36. Termogramy ścian zewnętrznych budynku wybudowanego w latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia w technologii tradycyjnej (ściany z cegły ceramicznej). Termogramy wskazują na małą izolacyjność cieplną ścian – widoczne jest położenie grzejników (cieplejsze miejsca pod oknami) oraz na małą izolacyjność cieplną okien i na mostki cieplne liniowe w miejscach nadproży okiennych

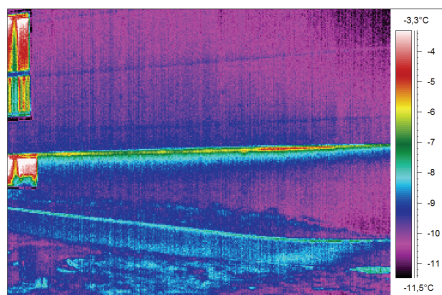


Rys. 6.37. Termogram ściany osłonowej budynku biurowego wybudowanego w roku 2006. Jest to tzw. elewacja wentylowana, z okładziną zewnętrzną z płyt piaskowca, oddzielonych od ściany nośnej szczeliną wentylacyjną (szczelina o grubości 4–6 cm między izolacją cieplną ściany i płytami z piaskowca). W przypadku elewacji wentylowanych należy wykazać dużą ostrożność w interpretacji termogramów, ponieważ sugerują one bardzo dobrą izolacyjność cieplną ściany (niska temperatura powierzchni ściany) – w tym przypadku, w interpretacji termogramu i ocenie cieplnej izolacyjności ściany zewnętrznej, należy wziąć pod uwagę, że za okładziną zewnętrzną jest szczelina wentylacyjna, w której przemieszcza się zimne powietrze zewnętrzne. W tym przypadku termogram niewiele wnosi do oceny cieplnej izolacyjności ściany zewnętrznej, a stan cieplnej izolacyjności ściany należy sprawdzić innymi metodami pomiarowymi

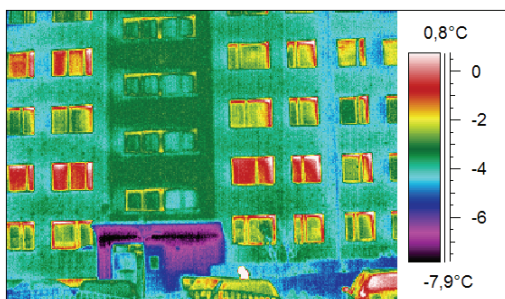
a)



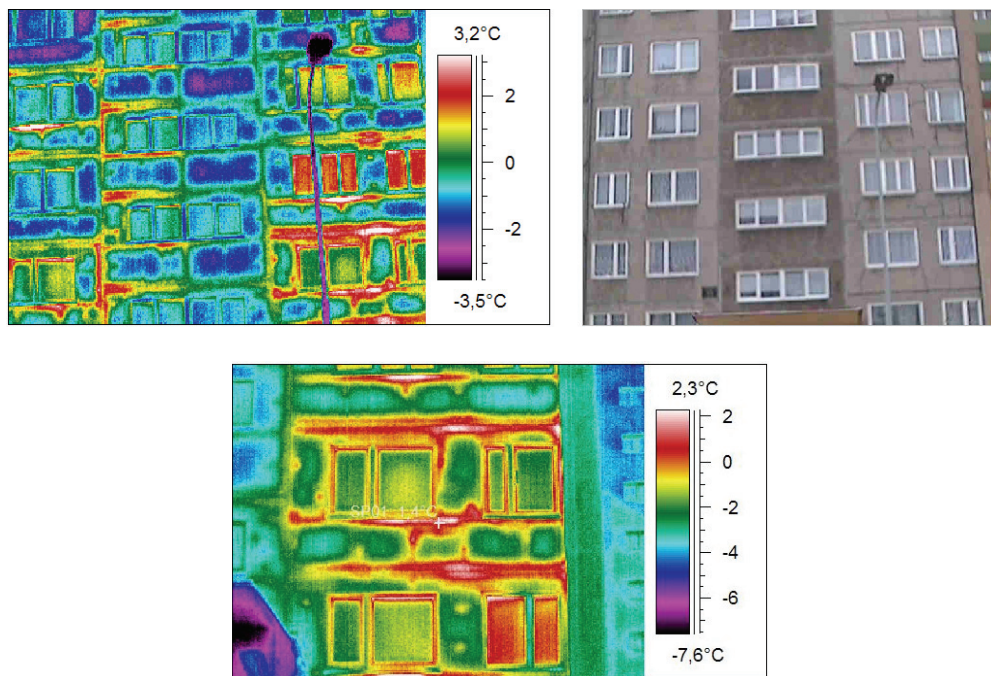
b)



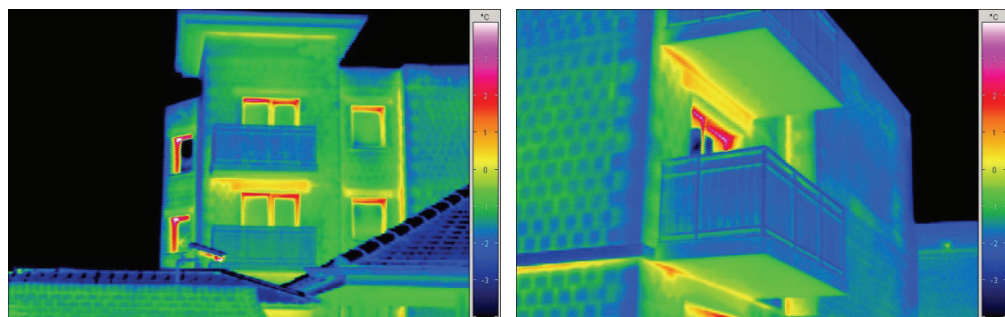
Rys. 6.38. Termogramy ściany szczytowej budynku wybudowanego w technologii tradycyjnej około 40 lat temu (ściany zewnętrzne z bloczków gazobetonowych obustronnie tynkowane), ściany piwnicy ogrzewanej wybudowane z betonu o grubości 25 cm: a) termogram potwierdza złą izolacyjność cieplną ścian zewnętrznych parteru (widoczne są spoiny między bloczkami) oraz złą izolacyjność cieplną nieocieplonej betonowej ściany piwnicy skrajnego pomieszczenia, w którym znajduje się laboratorium (temperatura powierzchni tej ściany porównywalna i wyższa od temperatury powierzchni szyb, b) termogram ściany po ociepleniu



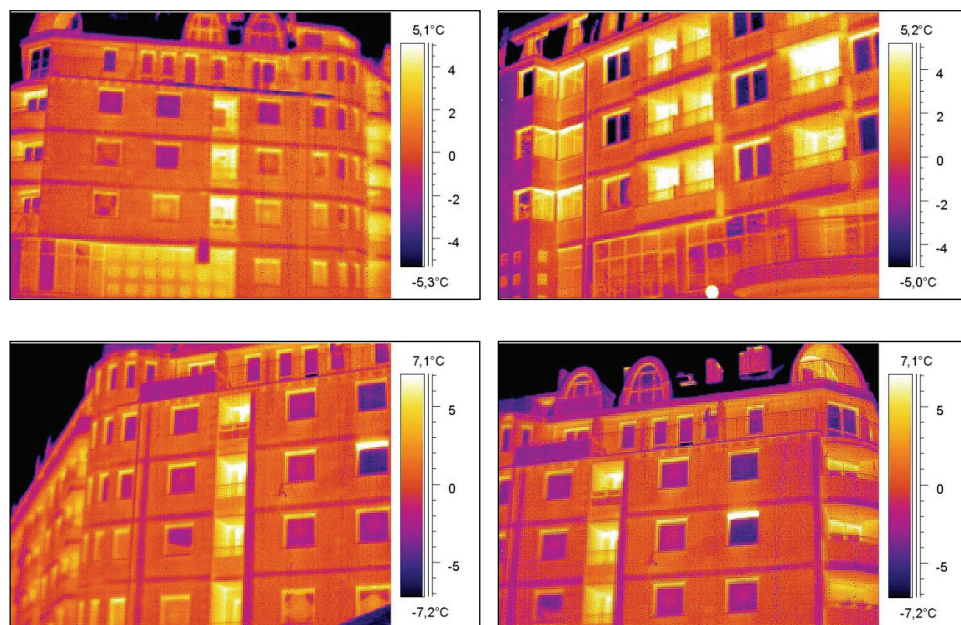
Rys. 6.39. Termogram ściany osłonowej ocieplonego budynku wielopłytkowego – część okien została wymieniona, przez pozostałe następują duże straty ciepła. Widać również, że węgariki okien nie zostały ocieplone. Niższa temperatura powierzchni ścian i okien w pasie klatki schodowej wynika z niższej temperatury powietrza na klatce schodowej oraz ciemniejszej barwy ściany na szerokości klatki schodowej (podobnie jak wyżej, termogramy wykonano w ciągu dnia przy całkowicie zachmurzonym niebie, niemniej może to być efekt oddziaływania nagrzewającego ścianę rozproszonego promieniowania słonecznego)



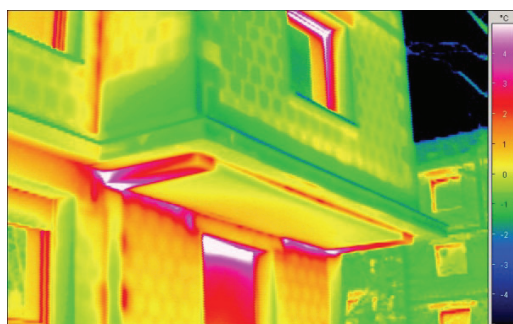
Rys. 6.40. Termogramy ściany osłonowej budynku wielkopłytkowego wybudowanego w połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia – mostki cieplne liniowe stanowią wieńce żelbetowe, nadproża i węgarki okienne oraz złącza pionowe i poziome płyt prefabrykowanych. Okna mają małą izolacyjność cieplną (część okien została wymieniona). Podobnie jak na rys. 6.39 niższa temperatura powierzchni ścian i okien w pasie klatki schodowej wynika z niższej temperatury powietrza na klatce schodowej oraz z ciemniejszej barwy ściany na szerokości klatki schodowej (termogramy wykonano w ciągu dnia przy całkowicie zachmurzonym niebie, niemniej może to być efekt oddziaływania nagrzewającego ścianę rozproszonego promieniowania słonecznego)



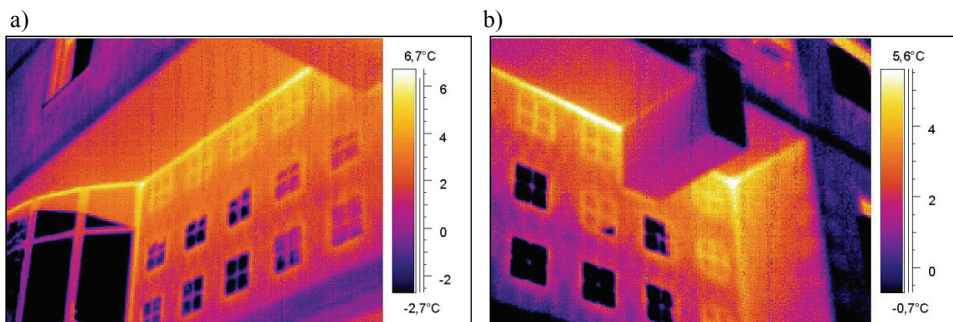
Rys. 6.41. Termogramy ścian zewnętrznych wykonanych z pustaków ceramicznych drążonych, bez izolacji cieplnej – widoczne są mostki cieplne w miejscach nadproży i ościeży okiennych, w miejscach pod balkonami oraz przez spoiny między pustakami ceramicznymi



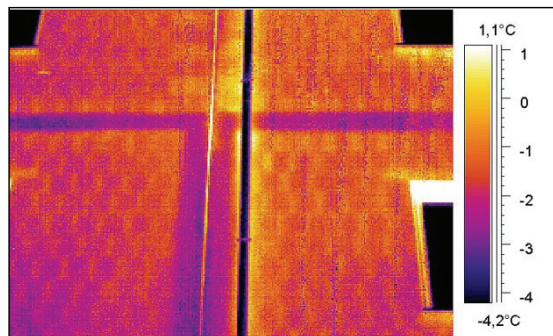
Rys. 6.42. Termogramy ścian zewnętrznych budynku wybudowanego w roku 2004 w technologii tradycyjnej (ściany zewnętrzne z pustaków ceramicznych drążonych bez izolacji cieplnej). Charakterystyczne jest powstawanie „ciepłego cienia” we wszystkich loggiach (cieplejsze ściany i stropy, co powodowane jest wzajemnym radiacyjnym oddziaływaniem tych przegród). Ponadto okna wyższych kondygnacji są zimniejsze i sugerują lepszą izolacyjność cieplną niż okna niższych kondygnacji – efekt ten wynika ze zbyt bliskiej odległości stanowiska pomiarowego od budynku (patrz również komentarz w rozdz. 6.7.3). Wieńce żelbetowe stropów oraz słupy żelbetowe są zaizolowane styropianem i stąd ich temperatura jest niższa od temperatury powierzchni ścian, wykonanych jedynie z pustaków ceramicznych bez izolacji cieplnej



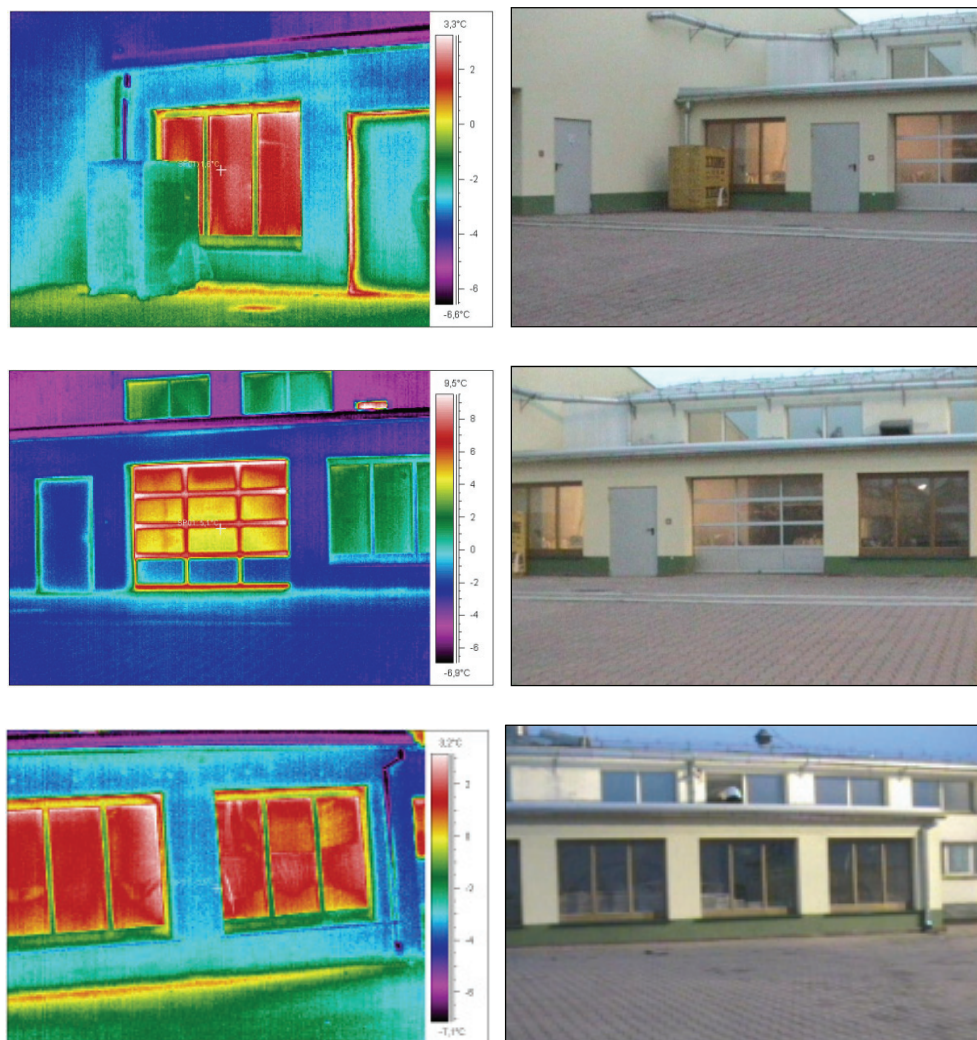
Rys. 6.43. Termogram ściany zewnętrznej wykonanej z pustaków ceramicznych drążonych, bez izolacji cieplnej. Widoczne są mostki cieplne w miejscach nadproży i ościeży okiennych, przez spoiny między pustakami ceramicznymi oraz na żelbetowych belkach wsporczych wykusza i na stropie przewieszenia ściany zewnętrznej



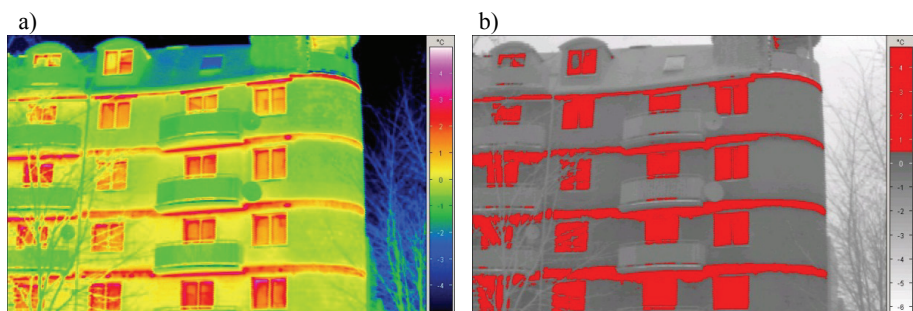
Rys. 6.44. Inne fragmenty budynku pokazanego na rys. 6.42 – termogramy ściany osłonowej pod przewieszeniem ściany zewnętrznej – widoczny jest efekt „ciepłego cienia” pod stropem, czyli wyższa temperatura górnej powierzchni ściany i okien oraz dolnej powierzchni stropu, wynikająca z wzajemnej radiacyjnej wymiany ciepła. Na termogramie b) dodatkowo występuje efekt „ciepłego cienia” w narożu pionowym ścian zewnętrznych. Wszystkie okna mają taką samą izolacyjność cieplną, a w pomieszczeniach jest taka sama temperatura powietrza



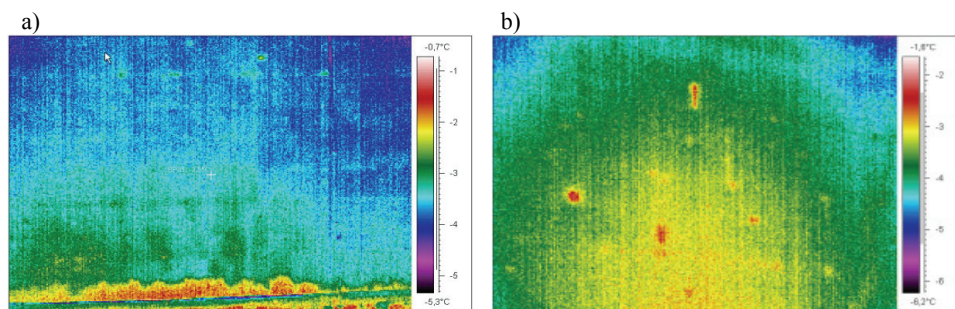
Rys. 6.45. Termogram ściany zewnętrznej, wykonanej z pustaków ceramicznych drażonych, bez ocieplenia, z przerwą dylatacyjną – widoczne są mostki cieplne przez spoiny między pustakami i przez dylatację ściany oraz zaizolowane styropianem dwa słupy i dwie belki żelbetowe w ścianie (w tych miejscach występuje niższa w temperatura powierzchni ściany)



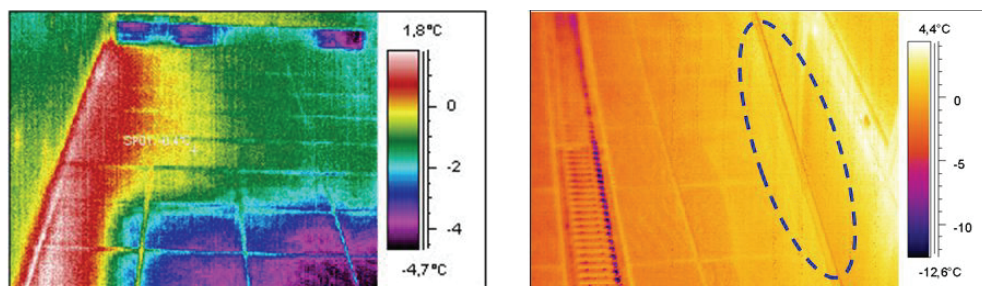
Rys. 6.46. Termogramy ściany zewnętrznej budynku biurowego wybudowanego w technologii tradycyjnej. Widoczne są: zła jakość cieplna okien i bramy wjazdowej segmentowej (najcieplejsze miejsca na elewacji, duże straty ciepła), liniowe mostki cieplne wokół okien i drzwi oraz zwiększone straty ciepła na styku ściany zewnętrznej z gruntem (brak izolacji cieplnej ścianki fundamentowej)



Rys. 6.47. Termogramy ściany zewnętrznej wykonanej z bloczków gazobetonowych bez zewnętrznej izolacji cieplnej: a) termogram klasyczny, mostki cieplne stanowią nadproża i ościeża okienne oraz żelbetowe wieńce stropowe, duże straty ciepła następują również przez okna, b) ten sam termogram z wyróżnieniem izotermii w zakresie zadanego przedziału temperatury



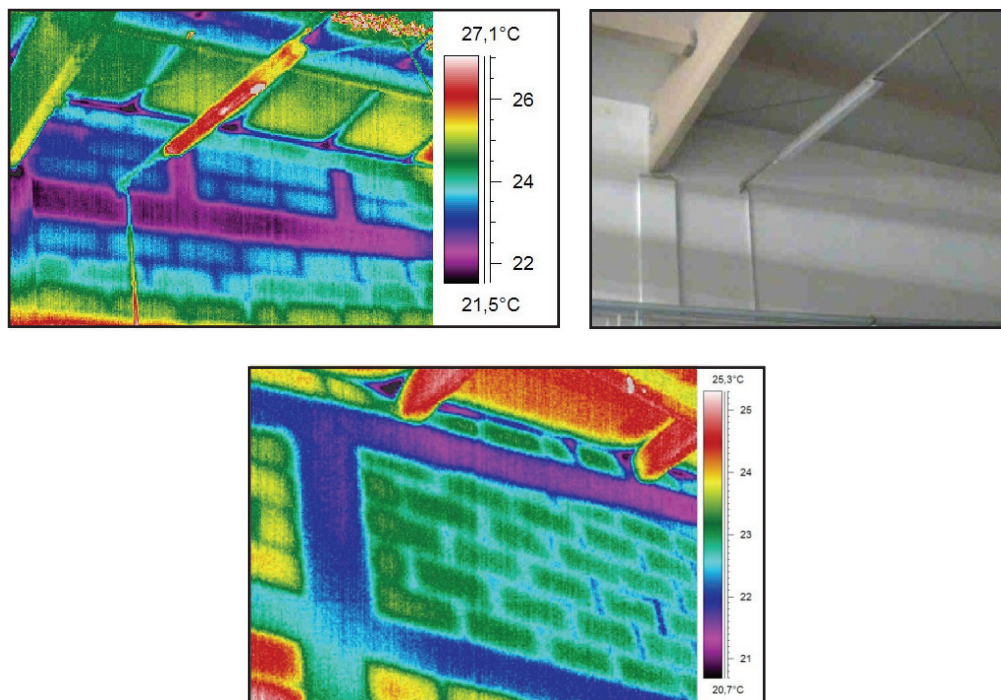
Rys. 6.48. Termogramy ściany zewnętrznej ogrzewanej hali produkcyjnej: a) zwiększone straty ciepła w strefie styku ściany z gruntem, wynikające ze złego zaizolowania cieplnego tego styku, b) zbliżenie dolnej strefy ściany z widocznymi zwiększonymi stratami ciepła w miejscu zbyt głębokiego wpuszczenia łączników mechanicznych w styropian, tzw. „grzybków”



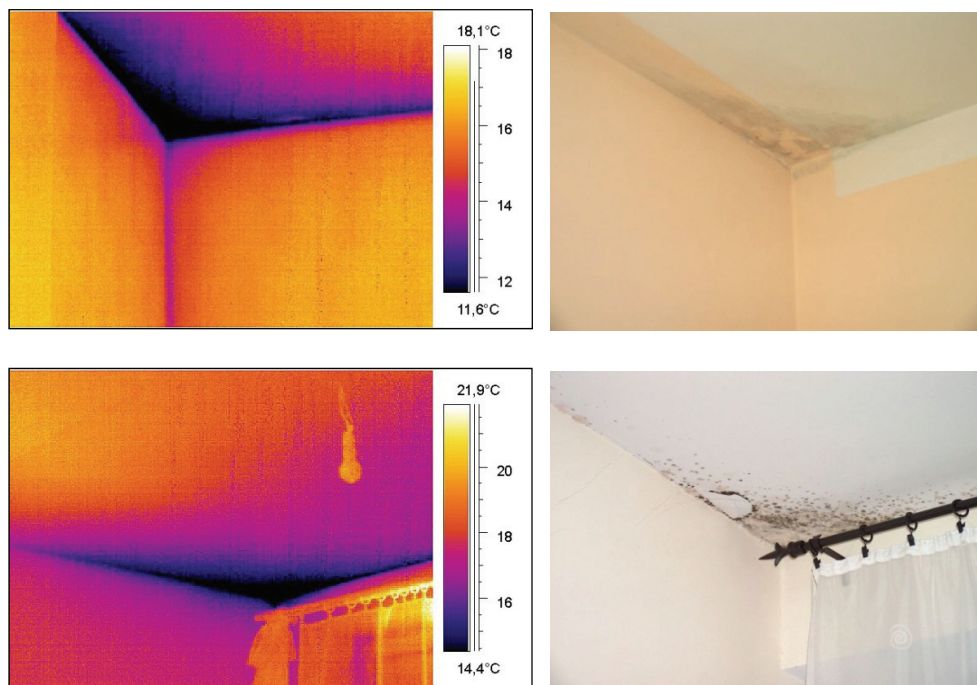
Rys. 6.49. Termogramy tarasów nad pomieszczeniami ogrzewanymi – w obu przypadkach występują zwiększone straty ciepła w strefach przy ścianach zewnętrznych, w wyniku występowania mostków cieplnych na całej długości styku tarasów ze ścianami. Jeżeli jest to możliwe, w takich przypadkach należy również wykonać badania od strony pomieszczenia pod tarasem

Badania budynków od strony wewnętrznej – identyfikacja mostków cieplnych

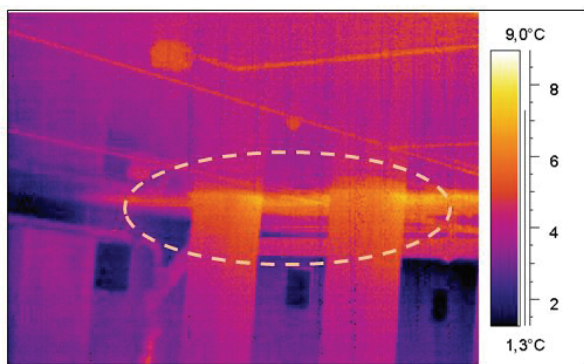
Na rysunkach od 6.50 do 6.54 przedstawiono termogramy przegród zewnętrznych i wewnętrznych wykonane od strony pomieszczenia, ze wskazaniem charakterystycznych defektów w termicznej obudowie budynków. Badania od strony wewnętrznej są niezbędnym uzupełnieniem badań budynku od strony zewnętrznej lub wręcz są niekiedy badaniami wiodącymi, np. w przypadku oględzin połaci dachowych mieszkań poddaszowych (rozdz. 6.7.5).



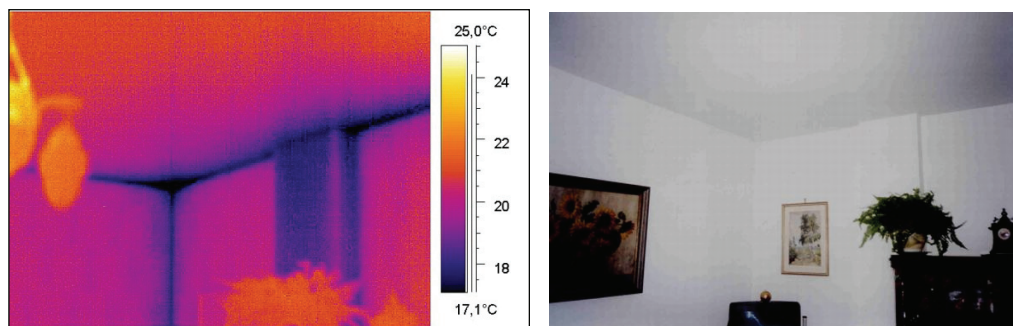
Rys. 6.50. Termogramy ściany zewnętrznej ogrzewanej hali produkcyjnej, wykonane od strony wewnętrznej – ściana jest ocieplona od strony zewnętrznej styropianem. Na termogramach widoczne są zimniejsze miejsca żelbetowej konstrukcji szkieletowej, omurowanej bloczkami gazobetonowymi. Pozornie termogramy identyfikują intensywne mostki cieplne, mimo ocieplenia ściany, w miejscach słupów i belek żelbetowych (najniższa temperatura powierzchni ściany) – w praktyce wpływ tych mostków cieplnych na zwiększenie strat ciepła z pomieszczenia i na ryzyko rozwoju grzybów pleśniowych na powierzchni ściany jest niewielki – patrz na temperaturę powierzchni ściany w miejscach konstrukcji żelbetowej. Zróżnicowanie temperatury na powierzchni ściany, w granicach 2–3 °C, przy bezwzględnym zakresie temperatury powierzchni 21–25 °C, jest relatywnie niewielkie i wynika z różnych cieplnych właściwości materiałów oraz nie stwarza zagrożenia powierzchniowej kondensacji pary wodnej i rozwoju grzybów pleśniowych



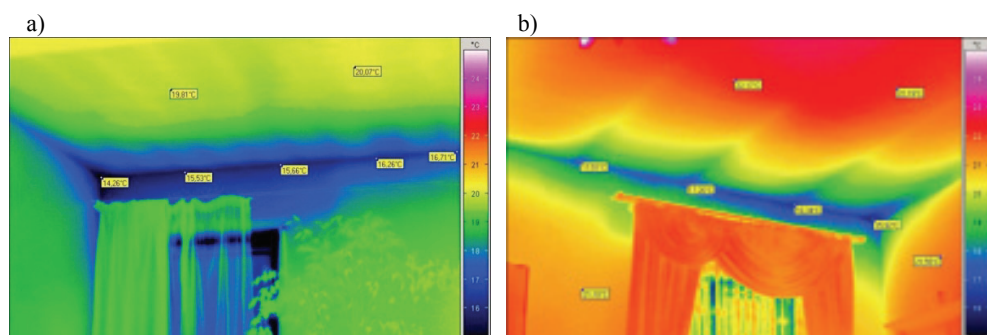
Rys. 6.51. Przykłady termogramów wykonanych od strony pomieszczenia – w miejscach styku ścian zewnętrznych i stropodachu występuje obniżona temperatura powierzchni przegród, około 12°C , sprzyjająca powierzchniowej kondensacji pary wodnej i rozwojowi grzybów pleśniowych na suficie i ścianach



Rys. 6.52. Strop nad nieogrzewanym garażem, termogram od strony garażu – widoczny jest brak izolacji cieplnej na fragmencie stropu za słupami (jaśniejsze miejsca na stropie) oraz intensywne przewodzenie ciepła przez słupy żelbetowe (ciepło jest przewodzone z lokalu użytkowego przez strop i słupy żelbetowe do garażu). W takich przypadkach należy również ocieplać słupy żelbetowe w ich górnej części na długości, licząc od stropu, do około 2–2,5 średnicy słupa (dokładną długość ocieplenia słupa można oczywiście wyznaczyć numerycznie)



Rys. 6.53. Mieszkanie na trzecim piętrze budynku pięciokondygnacyjnego: termogram ściany wewnętrznej z kominem z przewodami wentylacyjnymi wychłodzonymi przez powietrze wentylacyjne przy wstęcznym ciągu kominowym – wychłodzony komin wyziębia pomieszczenie.

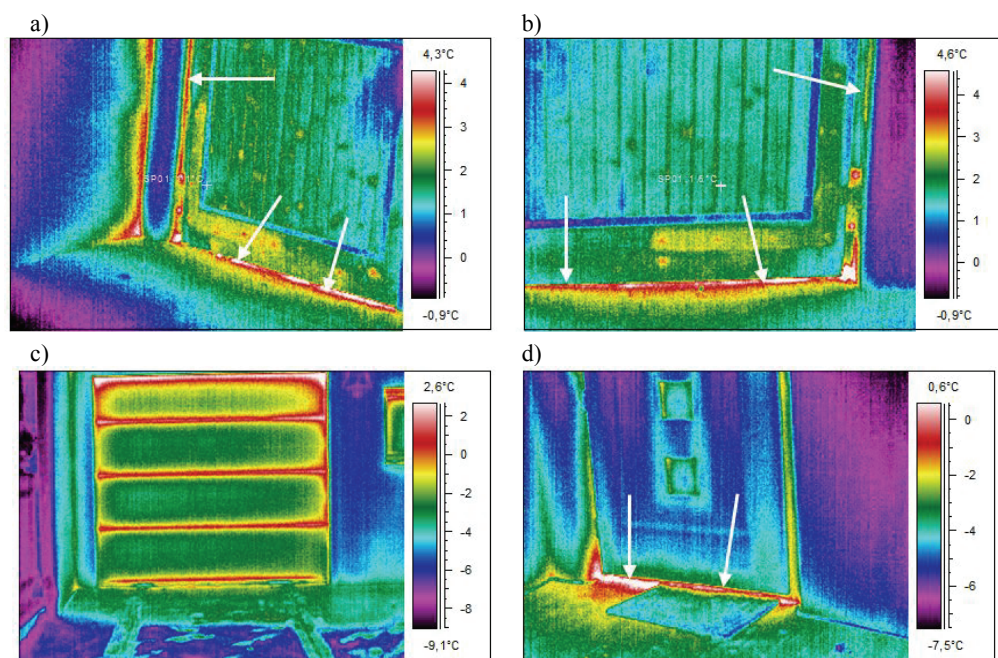


Rys. 6.54. Termogramy połączenia ścian zewnętrznych ze stropami nad ostatnią kondygnacją w domach jednorodzinnych: a) widoczne jest znaczne obniżenie temperatury w narożu połączenia przegród, na długości styku ściany ze stropem oraz na nadprożu okiennym, b) widoczne jest obniżenie temperatury na długości połączenia ściany zewnętrznej ze stropem oraz w miejscach żelbetowych belek stropowych („widać” belki stropowe). W obu przypadkach są to cieplne mostki liniowe

Badania termowizyjne są również bardzo przydatne do diagnostyki przegród wewnętrznych oddzielających pomieszczenia ogrzewane od nieogrzewanych, w tym stropów nad nieogrzewanymi pomieszczeniami. Naturalnie w tym przypadku obowiązują takie same zasady wykonywania i interpretacji termogramów jak wyżej. Na rysunku 6.52 pokazano przykład takich badań – termogram stropu nad nieogrzewanym garażem wielostanowiskowym w budynku wielorodzinnym.

Infiltracja powietrza przez drzwi zewnętrzne

W budynkach często występuje również problem nadmiernej infiltracji zimnego powietrza z zewnątrz przez drzwi wejściowe i bramy garażowe. Na rysunku 6.55 po-



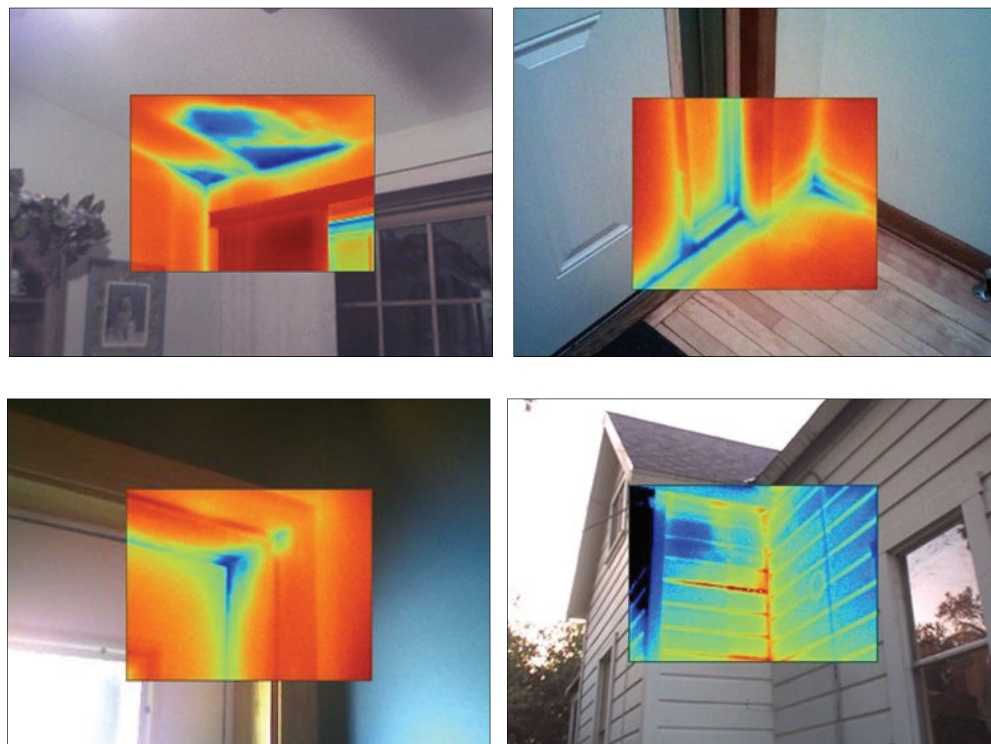
Rys. 6.55. Termogramy wskazujące na nieszczelności osadzenia w murze: a), b) drzwi garażowych dwuskrzydłowych, c) bramy garażowej segmentowej, z pokazaniem nieszczelności styków dobrze zaizolowanych segmentów poziomą pianką poliuretanową grubości 4 cm, d) drzwi wejściowych do budynku. Strzałki wskazują miejsca nadmiernych strat ciepła przez nieszczelności stolarki

kazano termogramy drzwi garażowych, segmentowej bramy garażowej (garaże ogrzewane) i drzwi wejściowych do budynku, ze wskazaniem miejsc nadmiernej infiltracji powietrza zewnętrznego.

Problemy związane ze szczelnością przegród zewnętrznych, w tym głównie z nadmierną infiltracją zimnego powietrza do budynku, przedstawiono w rozdziale 6.7.3, przy omawianiu specyfiki wykonywania termowizyjnych badań okien i drzwi balkonowych.

Inne możliwości prezentacji termogramów – obraz w obrazie

Najnowsze kamery termowizyjne mają coraz to większe możliwości w zakresie detekcji, wizualizacji i rejestracji obrazów termalnych badanych obiektów. Jedną z takich możliwości jest opcja prezentacji termogramu jako „obraz w obrazie”, czyli prezentacji termogramu fragmentu badanych przegród na tle zdjęcia tych przegród. Niezależnie od wykazanych wcześniej dużych technicznych możliwości kamer termowizyjnych odnośnie do pomiarów i rejestracji termogramów, taka ilustracja wyni-



Rys. 6.56. Przykłady obrazowania termogramów na zasadzie „obraz w obrazie” dla różnych przegród budowlanych [94]

ków badań jest istotna i czytelna przede wszystkim dla zleceniodawcy badań termowizyjnych oraz jest bardzo przydatna ze względów dydaktyczno-szkoleniowych. Na rysunku 6.56 pokazano przykłady prezentacji termogramów na zasadzie „obraz w obrazie” [94]:

6.7.3. Badania okien, drzwi balkonowych i fasad przeszklonych

Okna, drzwi balkonowe i fasady przeszklone są dosyć specyficznymi obiektami badań termowizyjnych, ze względu na swoje właściwości przepuszczania zarówno promieniowania słonecznego, jak i w mniejszym stopniu promieniowania ciepłego najbliższego otoczenia budynków oraz promieniowania ciepłego pochodzącego z badanego pomieszczenia.

W pomiarach budynku od strony zewnętrznej do kamery dociera promieniowanie ciepłe przepuszczone przez szyby, a pochodzące z pomieszczenia, ciepłe promieniowanie własne szyby oraz promieniowanie ciepłe otoczenia budynku odbite od

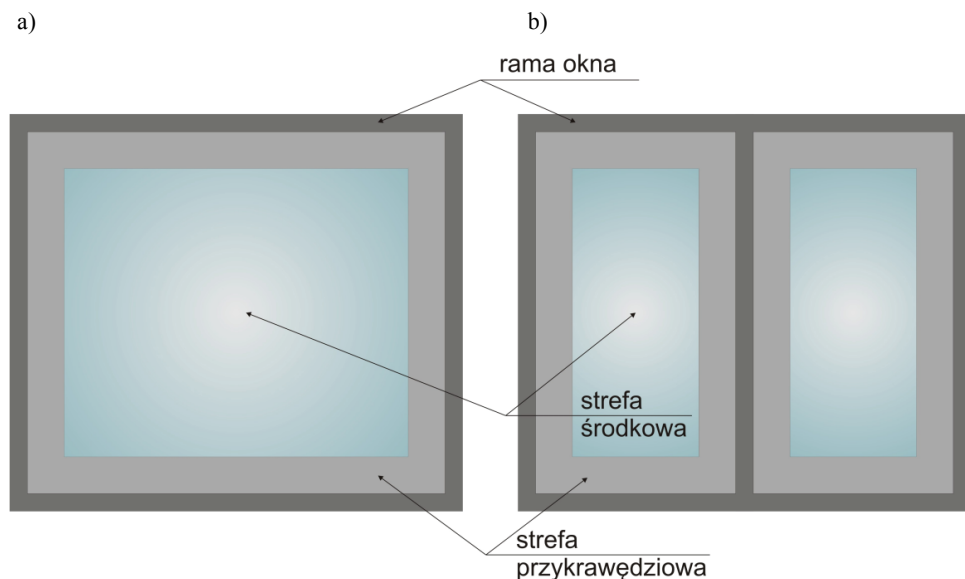
szyby. Obraz termalny szyb i fasad przeszklonych, widoczny od strony zewnętrznej lub od strony pomieszczenia, wynika nie tylko z ich izolacyjności termicznej (a tym samym ze współczynnika przenikania ciepła dla okna), ale również z ich różnej zdolności do emitowania oraz do przepuszczania, pochłaniania i odbicia promieniowania cieplnego – procesy te przebiegają w sposób ciągły i wielokrotny. Ponadto termogramy okien są często zaburzane przez różnego rodzaju zakłócenia temperaturowe, którymi mogą być: gorące grzejniki, termowentylatory, oświetlenie itp. Ze względu na różne właściwości radiacyjne zestawów szyb (współczynniki emisyjności, pochłaniania, przepuszczania i odbicia) oraz na częste zakłócenia temperaturowe i różne środowiska radiacyjne w pomieszczeniach, termowizyjne badania okien i fasad przeszklonych *służą przede wszystkim do względnej oceny ich izolacyjności cieplnej* poprzez porównanie rozkładu temperatury badanego okna z rozkładem temperatury na poszczególnych oknach na elewacji, z uwzględnieniem warunków termicznych panujących po obu stronach okien. *Należy wyraźnie podkreślić, że prawidłowe termogramy okien, bez zakłóceń termalnych, można wykonać jedynie w warunkach laboratoryjnych.*

Okna są również specyficznymi elementami termicznej obudowy budynku ze względu na gorszą izolacyjność cieplną w odniesieniu do ścian zewnętrznych i połaci dachowych oraz na specyficzne właściwości radiacyjne, co ma duży wpływ na wyniki badań termowizyjnych i na interpretację termogramów. W aspekcie ochrony cieplnej budynków o różnym przeznaczeniu, specyfika okien polega na tym, że:

1. Współczynniki przenikania ciepła okien i drzwi balkonowych, spełniających aktualne wymagania w zakresie ochrony cieplnej budynków, są około 6 razy większe w porównaniu ze ścianą zewnętrzną, to znaczy że okna i drzwi balkonowe z założenia są gorsze pod względem izolacyjności cieplnej.

2. Podobnie współczynnik przenikania ciepła okna połaciowego, spełniającego aktualne wymagania w zakresie ochrony cieplnej budynków, jest około 7 razy większy w porównaniu do połaci dachowej poddasza użytkowego.

3. Współczynnik przenikania ciepła okna jest średnią ważoną ze współczynników przenikania ciepła zestawu szyb zespolonych w części środkowej, współczynnika przenikania ciepła, tzw. strefy przykrawędziowej szyb (strefa obwodowa szyb w pasie ok. 6,5 cm od ramy okna) oraz współczynnika przenikania ciepła materiału ramy i ościeżnicy (wagą jest powierzchnia poszczególnych elementów). Strefy przykrawędziowe szyb, rama, czyli ościeżnica z ramiakiem skrzydła okiennego (rys. 6.57) i ewentualnie tzw. szprosy, w których występuje dwukierunkowe przenikanie ciepła, zawsze pogarszają izolacyjność cieplną okna, co bardzo często widoczne jest na termogramach. Przykładowo, jeżeli współczynnik przenikania ciepła zestawu szyb zespolonych wynosi $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (np. szyby z powłoką niskoemisyjną, z wypełnieniem argonem), to współczynnik przenikania ciepła okna wynosi ok. $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Jeżeli współczynnik przenikania ciepła zestawu szyb zespolonych wynosi $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, to



Rys. 6.57. Widok okien z takim samym zestawem szyb zespolonych (np. dwie szyby grubości po 4 mm, szczelina między szybami 16 mm, wypełniona argonem), ale z różnym podziałem części środkowej okna:

a) okno jednoskrzydłowe, b) okno dwuskrzydłowe z ramiakami skrzydeł pośrodku okna. W oknach można wyróżnić strefę środkową (centralną) oszklenia, strefę przykrawędziową oszklenia przy ościeżnicy i przy ramiakach okna oraz ramę okna (ościeżnica łącznie z ramiakiem skrzydła okiennego) – współczynnik przenikania ciepła okna jest średnią ważoną części środkowej zestawu szyb zespolonych, części przykrawędziowej zestawu szyb i ramy okna. Ramy, ramiaki okien i szprosy zmniejszają izolacyjność cieplną okien. Okno (b), mimo takiego samego zestawu szyb zespolonych i takiego samego materiału ramy, ma mniejszą izolacyjność cieplną (większy współczynnik przenikania ciepła)

współczynnik przenikania ciepła okna wynosi ok. $1,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ itd. Podobne przeliczenia i dokładne wartości współczynników przenikania ciepła dla różnego poziomu izolacyjności cieplnej okien i drzwi balkonowych są podawane w materiałach instruktażowo-szkoleniowych dla audytorów i certyfikatorów energetycznych.

4. W zależności od przeznaczenia budynku mogą być stosowane różnego rodzaju oszklenia [134], [135], [136], np.: szkło przeźierne (bezbarwne, barwione w masie i przydymiane), szkło nieprzeźierne matowe, szkło z powłokami radiacyjnymi (niskoemisyjnymi, refleksyjnymi, spektralnie selektywnymi, lustrzanymi, samooczyszczającymi) oraz szyby chromogeniczne (fotochromowe, termochromowe i elektrochromowe). Każdy z wymienionych rodzajów szyb wyróżnia się swoistymi charakterystykami radiacyjnymi, co z kolei może się przełożyć na wyniki badań termowizyjnych.

5. Termowizyjne pomiary okien i fasad przeszklonych są zakłócanie przez promieniowanie cieplne przepuszczane przez szyby, a pochodzące albo od strony pomieszczenia (w przypadku termowizyjnych badań przegród przeziernych od strony ze-

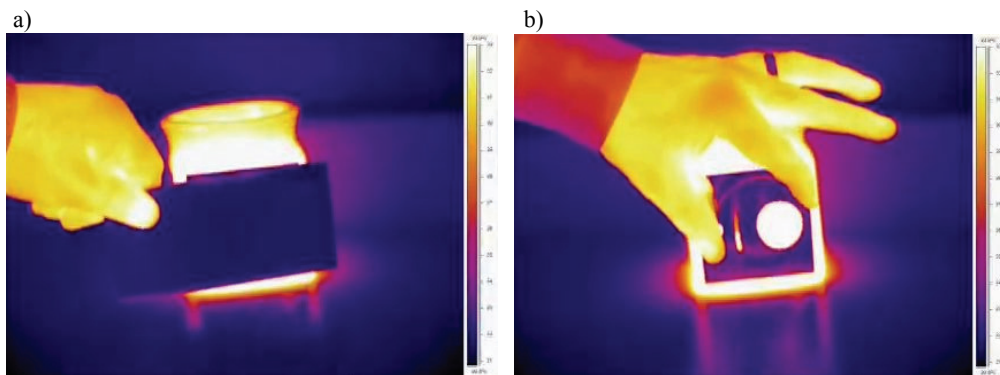
wewnętrznej), albo od strony otoczenia (w przypadku termowizyjnych badań przegród przeziernych od strony pomieszczenia).

6. Charakterystyki radiacyjne wymienionych szyb zależą również od kąta padania promieniowania, co również może wpływać na wyniki termowizyjnych badań elewacji, np. badania wyższych kondygnacji budynku z bliskiej odległości lub okien od strony pomieszczenia – komentarz w tej kwestii przedstawiono w dalszej części tego rozdziału.

7. Zgodnie z obecnie obowiązującymi wymaganiami [203], okna i drzwi balkonowe oraz ich osadzenie w murze powinny być szczelne na infiltrację powietrza, natomiast dopływ świeżego powietrza do pomieszczeń powinien być zapewniony przez inne urządzenia, np. przez nawiewniki powietrza. Natomiast do końca 2008 roku obowiązywały łagodniejsze przepisy, dopuszczające do stosowania okna o większym współczynniku infiltracji powietrza, co przy zamkniętych oknach umożliwiało doprowadzenie świeżego powietrza do pomieszczeń przez nieszczelności między ramiakiem skrzydła i ościeżnicą. *Jeżeli zatem badania termowizyjne potwierdzą tę infiltrację powietrza do pomieszczenia, w budynkach wybudowanych przed dniem 1 stycznia 2009 roku, to nie zawsze będzie to usterka okna (po założeniu, że infiltracja nie będzie zbyt intensywna).* W tym przypadku skuteczne sprawdzenie szczelności obudowy budynku (w tym okien) jest możliwe jedynie poprzez zastosowanie próby szczelności budynku (np. metodą *blower door*),

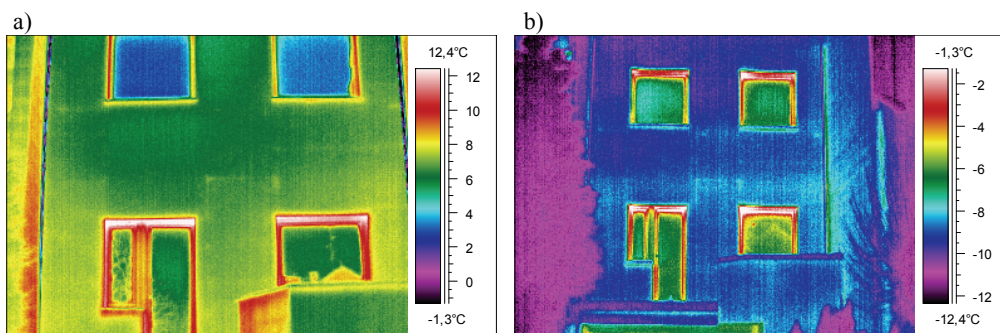
8. Częstym mankamentem jest nieprawidłowy montaż okien, polegający, m.in., na braku pianki izolacyjnej między ościeżnicą i ościeżem okna, często na całym obwodzie okna, co powoduje powstawanie uciążliwych dla mieszkańców mostków termicznych.

Ze względu na badania termowizyjne, okna i fasady przeszklone w budynkach są dosyć specyficznymi obiektami pomiarowymi z uwagi na swoje właściwości przepuszczania promieniowania ciepłego w obu kierunkach, odbijania i absorbowania promieniowania oraz emisji własnego promieniowania ciepłego. Ciała przeziernie zachowują się różnie w odniesieniu do promieniowania widzialnego (dla przypomnienia, zakres długości fal od 0,45 do 0,75 μm) i do promieniowania ciepłego (umowny zakres długości fal od 3,0 do 50,0 μm). Dla przykładu zwykła szyba okienna praktycznie całkowicie przepuszcza promieniowanie widzialne, natomiast jest prawie nieprzepuszczalna dla promieniowania ciepłego, co często w budynkach powoduje tzw. „efekt szklarniowy”, który w zimie jest pożądanym z uwagi na dogrzewanie pomieszczeń przez promieniowanie słoneczne, ale w lecie może być bardzo uciążliwym, z uwagi na przegrzewanie pomieszczeń. Natomiast materiał, jakim jest german, zachowuje się zupełnie odwrotnie – praktycznie nie przepuszcza promieniowania widzialnego, ale całkowicie przepuszcza promieniowanie ciepłe (rys. 6.58). Z tego powodu german bardzo często jest stosowany do produkcji obiektów w kamerach termowizyjnych.

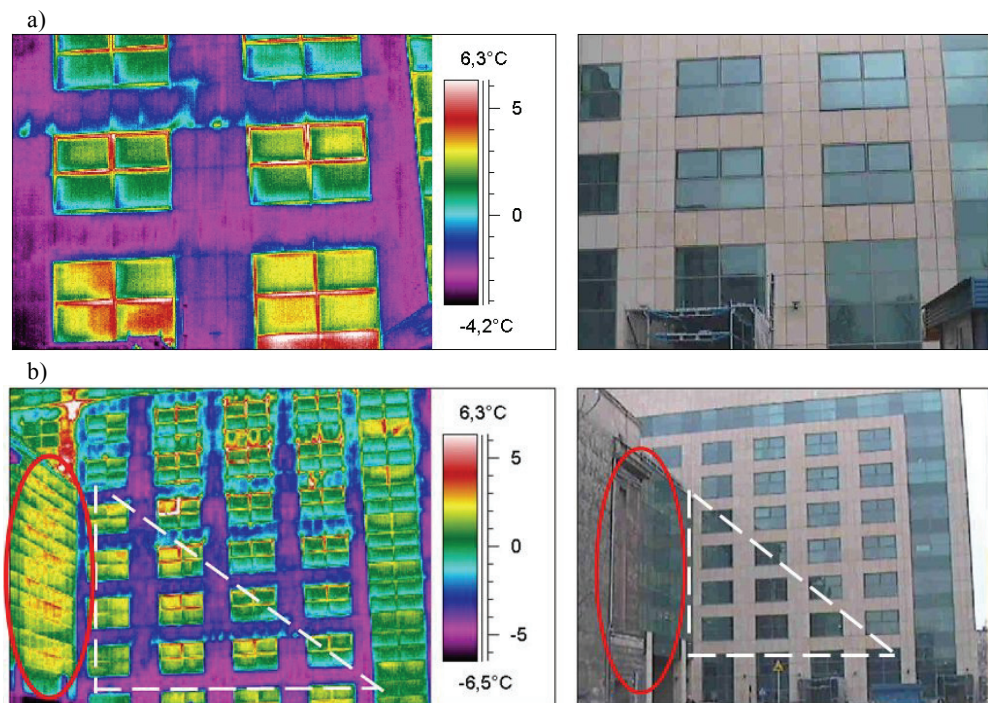


Rys. 6.58. Termogramy ilustrujące ciekawe właściwości przepuszczania promieniowania podczerwonego:

a) przez szklę zwykłą, która jest w dużym stopniu nieprzepuszczalna dla promieniowania podczerwonego (natomiast bardzo dobrze przepuszcza promieniowanie widzialne), b) przez german, który bardzo dobrze przepuszcza promieniowanie podczerwone (natomiast jest prawie nieprzepuszczalny dla promieniowania widzialnego) [93]

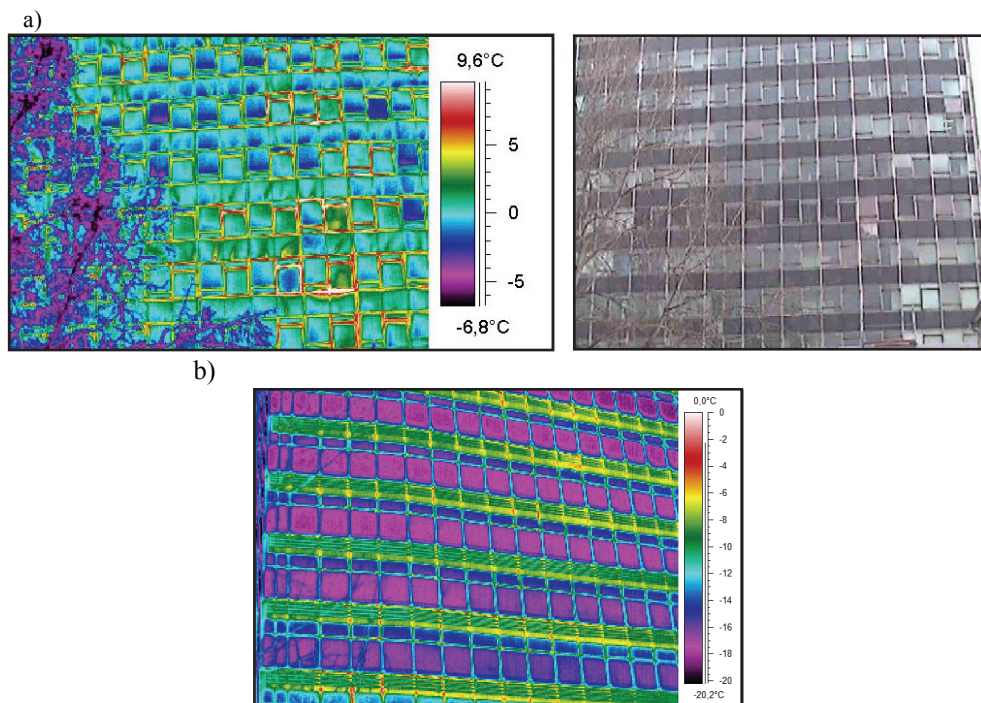


Rys. 6.59. Termogramy elewacji i okien domu jednorodzinnego ocieplonego, od strony zewnętrznej styropianem, wszystkie okna mają taką samą izolacyjność termiczną (zestawy dwuszybowe z wypełnieniem argonem, współczynnik przenikania ciepła U zestawu szyb zespolonych wynosi $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, natomiast całego okna ok. $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Termogram (a) wykonany w temperaturze zewnętrznej ok. 0°C i termogram (b) w temperaturze ok. $-10,0^\circ \text{C}$: a) termogram wykonany przy zbyt małej odległości od budynku, tzn. przy zbyt dużym kącie patrzenia kamery termowizyjnej na okna wyższej kondygnacji – okna pierwszej kondygnacji wydają się być o większej izolacyjności cieplnej, gdyż są zimniejsze od okien parteru (temperatura powietrza wewnętrznego na obu kondygnacjach jest taka sama i wynosi 20°C). Aby wyeliminować ten efekt, należy oddalić się od budynku na odległość umożliwiającą wykonanie badań pod właściwym kątem, b) termogram elewacji budynku wykonany z większej odległości, przy niższej – o ok. 10°C temperaturze powietrza zewnętrznego – temperatura powierzchni szyb na obu kondygnacjach jest taka sama. W obu pomiarach uwidoczniły się błędy w ociepleniu węgarów okiennych (liniowe mostki cieplne), przez które następują zwiększone straty ciepła



Rys. 6.60. Termogramy elewacji i okien budynku użyteczności publicznej, wszystkie okna mają taką samą izolacyjność termiczną (zestawy dwuszybowe z wypełnieniem argonem): a) termogram wykonany przy zbyt małej odległości od budynku, tzn. przy zbyt dużym kącie patrzenia kamery termowizyjnej na okna wyższych kondygnacji – okna wyższych kondygnacji wydają się być o większej izolacyjności cieplnej, gdyż są zimniejsze od okien niższych kondygnacji (temperatura powietrza wewnętrznego w całym budynku wynosi około 20 °C); aby wyeliminować ten efekt, należy oddalić się od budynku na odległość umożliwiającą wykonanie badań pod właściwym kątem, b) termogram elewacji budynku wykonany z większej odległości – termogramy okien wyższych kondygnacji są wykonane prawidłowo; w części elewacji zaznaczonej trójkątem występują odbicia ciepłego promieniowania budynku sąsiedniego, stykającego się z badanym budynkiem; w części elewacji budynku sąsiedniego, w miejscu zaznaczonym owalem, występuje odbicie ciepłego promieniowania budynku badanego

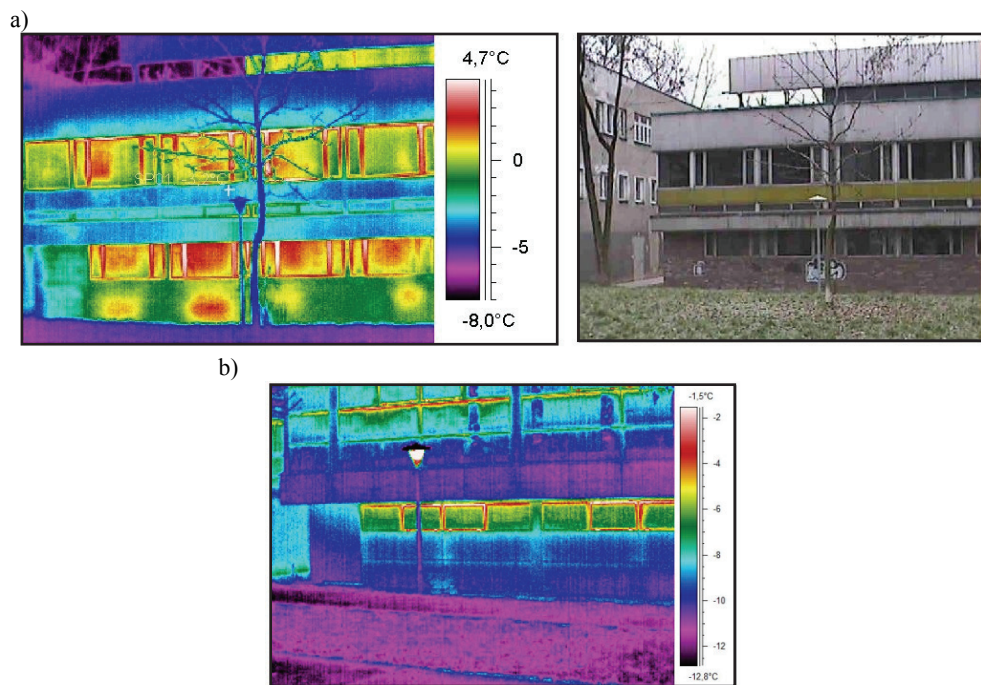
Właściwości radiacyjne zwykłej szyby okiennej zależą, między innymi, od kąta padania promieniowania, co może mieć wpływ na wyniki termowizyjnych pomiarów elewacji budynków, zwłaszcza przy zbyt małej odległości stanowiska pomiarowego od budynku, gdy nie ma możliwości zwiększenia odległości kamery od budynku. Wówczas pomiary okien wyższych kondygnacji, badanych pod większym kątem, mogą być przekłamane, co pokazano na rysunkach 6.59–6.61.



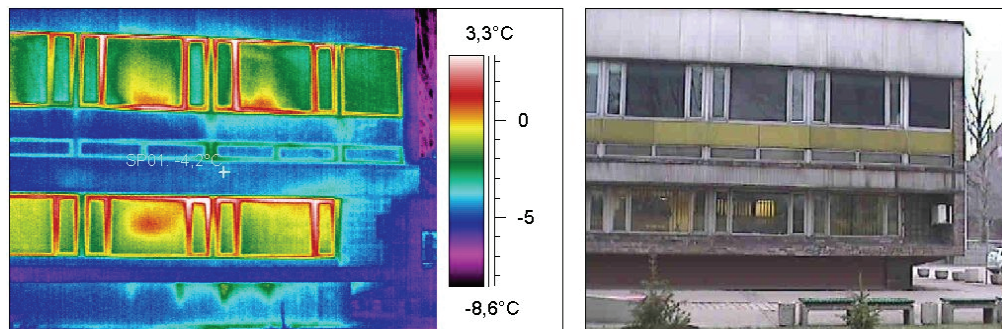
Rys. 6.61. Przykład termogramu fasady przeszklonej (ślusarka aluminiowa z lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia), efekt podobny do pokazanego na rys. 6.59 i 6.60 – wszystkie okna mają taką samą izolacyjność cieplną: a) podobnie, termogram został wykonany przy zbyt małej odległości od budynku, tzn. przy zbyt dużym kącie patrzenia kamery termowizyjnej na okna wyższych kondygnacji; okna wyższych kondygnacji wydają się być o większej izolacyjności cieplnej, gdyż są zimniejsze od okien niższych kondygnacji (temperatura powietrza wewnętrznego w budynku wynosi około 20 °C); aby wyeliminować ten efekt, należy oddalić się od budynku na odległość umożliwiającą wykonanie badań pod właściwym kątem, b) termogram elewacji po wymianie starej fasady na nową

Na rysunku 6.60a pokazano podobny przypadek jak na rysunku 6.59, tj. badania elewacji i okien przy zbyt bliskiej odległości stanowiska pomiarowego od budynku. Natomiast na rysunku 6.60b przedstawiono termogram elewacji tego samego budynku wykonany z większej odległości oraz termogram stykającego się pod kątem prostym do badanego budynku drugi budynek z elewacją o dużym stopniu przeszkleń (komentarz pod termogramami).

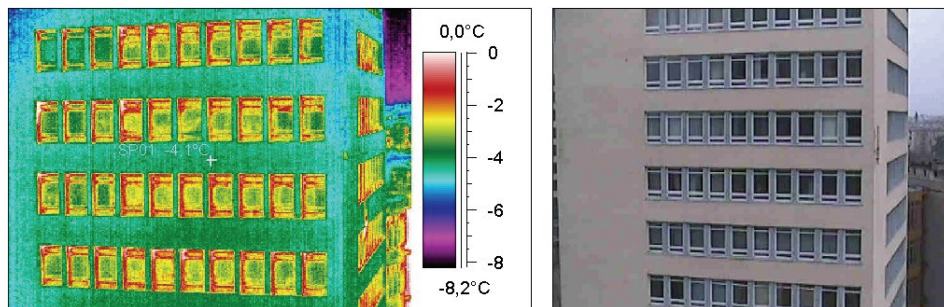
Na rysunkach od 6.62 do 6.73 przedstawiono przykłady termogramów elewacji różnych budynków, zwracając szczególną uwagę na okna i fasady przeszklone. Stosowny komentarz zamieszczono pod każdym termogramem.



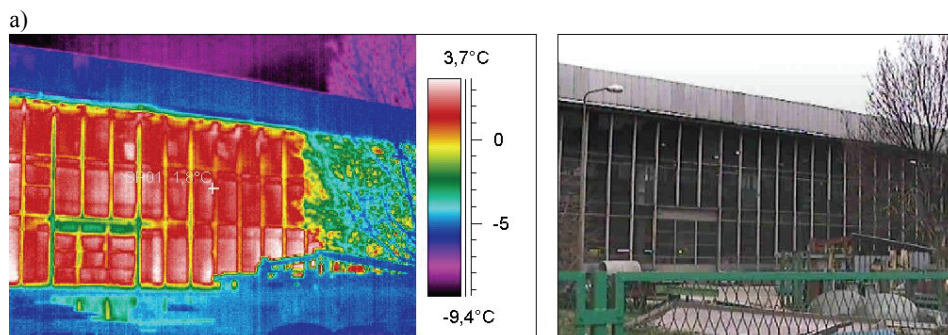
Rys. 6.62. Termogram fragmentu budynku ze ślusarką aluminiową pochodzącą z końca lat 70. ubiegłego wieku: a) okna na obu kondygnacjach mają taką samą bardzo małą izolacyjność cieplną, natomiast wyższa temperatura powierzchni szyb (większe straty ciepła) w przyziemiu wynika z wyższej o ok. 2 °C temperatury powietrza w pomieszczeniach oraz z efektu „ciepłego cienia”, powstałego na skutek przewieszenia I piętra o ok. 1,2 m w stosunku do przyziemia. Widoczne są duże straty ciepła przez ślusarkę aluminiową (mostki ciepłe) oraz „widać” lokalizację grzejników w przyziemiu (podwyższona temperatura ścian pod oknami), b) termogram tego samego fragmentu budynku po wymianie starej ślusarki aluminiowej na nową



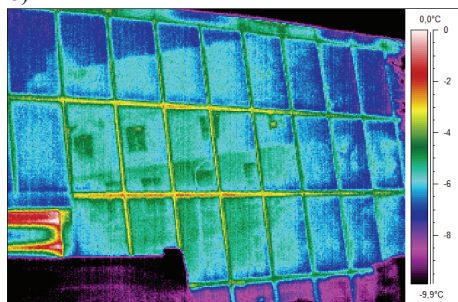
Rys. 6.63. Termogram przeciwległej strony budynku pokazanego na rys. 6.62 z podobnym komentarzem odnośnie do ślusarki aluminiowej. Podwyższona temperatura szyb środkowego okna w przyziemiu wynika z włączonego oświetlenia w pomieszczeniu, a nie z jakości oszklenia



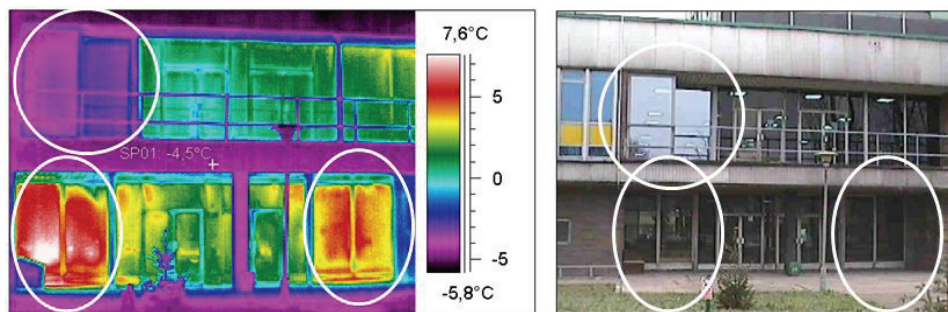
Rys. 6.64. Termogram elewacji budynku biurowego – wyższa temperatura okien (a tym samym większe straty ciepła) w części środkowej i po prawej stronie elewacji w stosunku do trzech rzędów okien po lewej stronie nie wynika z gorszej izolacyjności cieplnej okien, ale z tego, że w oknach po lewej stronie zasłonięto krótkie pionowe żaluzje materiałowe, które nie zasłaniają grzejników (temperatura powietrza we wszystkich pokojach jest taka sama). Gdyby zastosowano długie żaluzje, zasłaniające grzejniki, efekt temperaturowy na powierzchni szyb byłby odwrotny (nagrzane od grzejników powietrze dostałoby się między żaluzje i szyby, a w konsekwencji okna w trzech rzędach po lewej stronie byłyby znacznie cieplejsze)



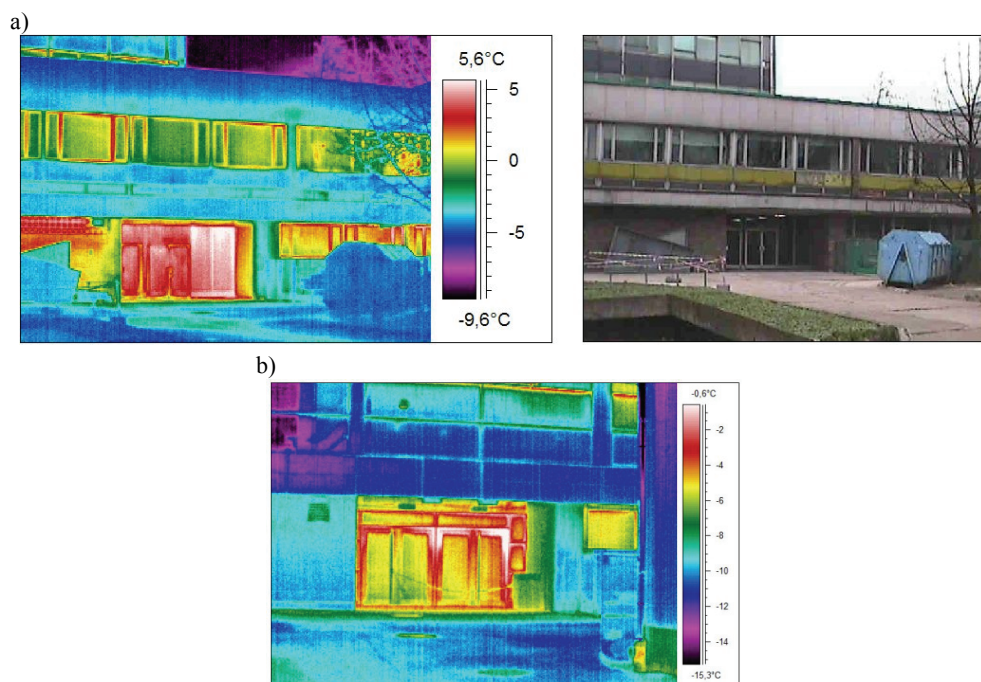
b)



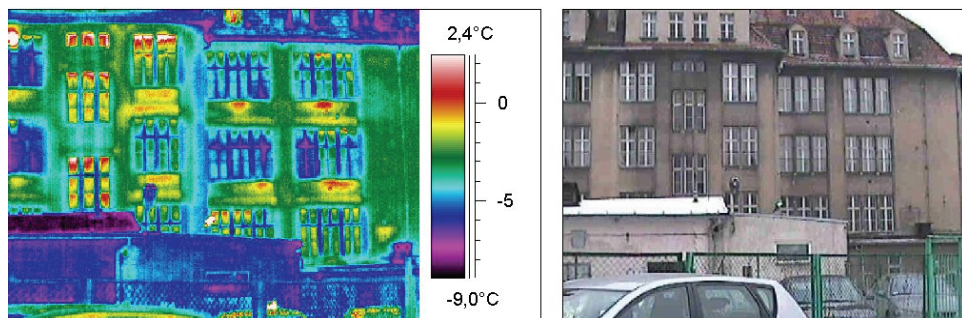
Rys. 6.65. Fragment elewacji hali laboratoryjnej ze ślusarką stalową pojedynczo szklaną, wybudowaną pod koniec lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia: a) termogram elewacji przed termomodernizacją, widoczna jest wysoka temperatura powierzchni szyb, świadcząca o bardzo dużych stratach ciepła przez szyby i ślusarkę stalową, b) termogram elewacji po wymianie fasady na nową w roku 2011 (w szybach z powłoką niskoemisyjną odbijają się sąsiadujące budynki)



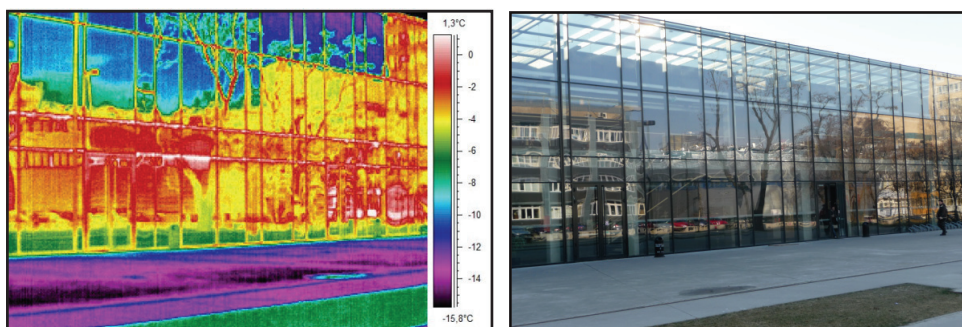
Rys. 6.66. Termogram fragmentu budynku ze ślusarką aluminiową, częściowo wymienioną, pochodzącą z końca lat 70. ubiegłego wieku – fasada w części wymienionej na piętrze (lewy górny róg) ma znacznie lepszą izolacyjność cieplną (jest zimniejsza) w stosunku do pozostałych okien, w przyziemiu dwa skrajne zestawy okienne są pojedynczo szklone (temperatura powietrza w przyziemiu i na piętrze jest taka sama)



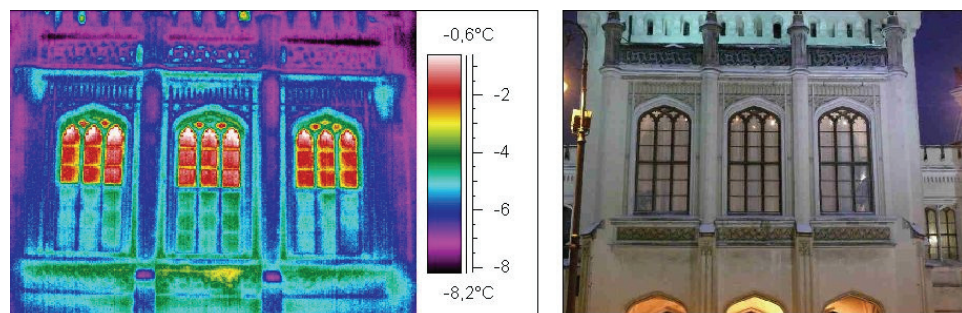
Rys. 6.67. Inny fragment elewacji hali laboratoryjnej pokazanej na rys. 6.66, ze starą ślusarką aluminiową: a) termogram elewacji przed termomodernizacją, widoczna jest wysoka temperatura powierzchni szyb, świadcząca o bardzo dużych stratach ciepła przez szyby i ślusarkę – okna na obu kondygnacjach mają taką samą bardzo małą izolacyjność cieplną, natomiast wyższa temperatura powierzchni szyb (pozornie większe straty ciepła) w przyziemiu wynika z efektu „ciepłego cienia”, tj. z przewieszenia I piętra o ok. 1,2 m w stosunku do przyziemia, b) termogram elewacji po wymianie fasady na nową w roku 2011 (również jest widoczny efekt ciepłego cienia przy wejściu do budynku)



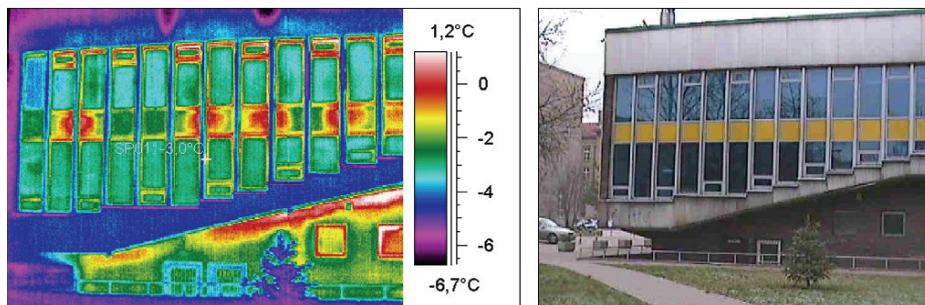
Rys. 6.68. Termogram fasady budynku ceglanego – temperatura powierzchni szyb okien po prawej stronie wynika z nieco niższej temperatury powietrza w pomieszczeniach, a nie z lepszych właściwości izolacyjnych okien w porównaniu z oknami po lewej stronie. Pod oknami „widać” lokalizację grzejników w postaci podwyższonej temperatury ściany pod oknami



Rys. 6.69. Termogram fasady całkowicie przeszklonej – obraz termalny został zakłócony przez odbicie budynków sąsiednich. Mostki ciepłe występują na systemowych słupkach i ryglach aluminiowych

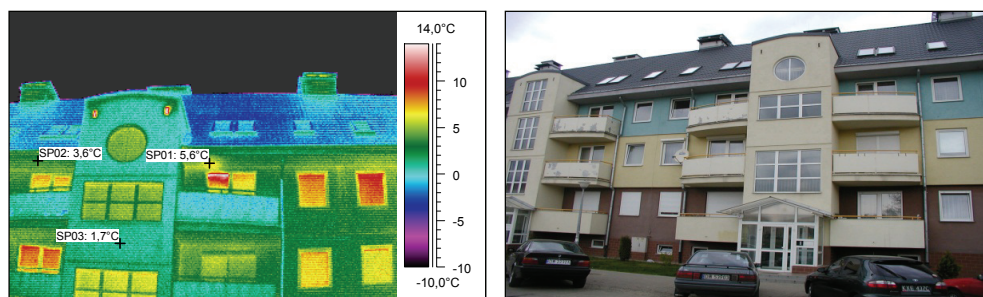


Rys. 6.70. Termogram elewacji pierwszego piętra nad wejściem głównym do budynku zabytkowego – największe straty ciepła występują przez górne części okien pojedynczo szklonych, które są wyraźnie cieplejsze. Termogram wyraźnie pokazuje, że górne połowy okien są pojedynczo szklone (zwiększone straty ciepła), dolne połowy okien są szklone podwójnie (mniejsze straty ciepła). Zwiększone straty ciepła występują również przez ściany pod oknami, tzn. w miejscach za grzejnikami



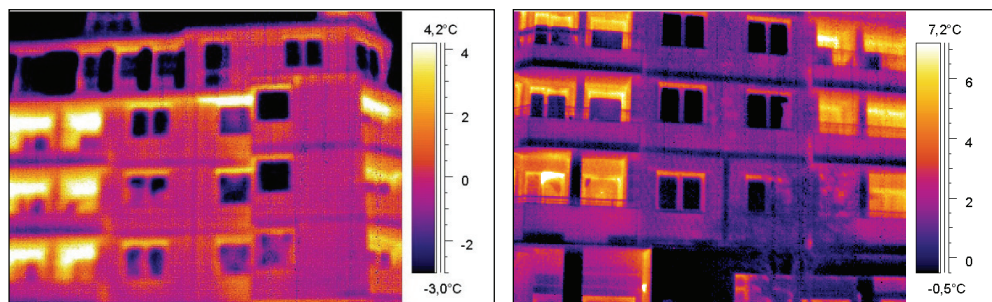
Rys. 6.71. Termogram elewacji z aluminiowym systemem fasadowym sprzed około 10 lat – czerwone miejsca na poziomie środkowego pasa międzyokiennego nieprzeziernego wskazują położenie grzejników.

W górnej części fasady mostki cieplne stanowią ramy okienek uchylnych, pozostała część fasady aluminiowej nie wykazuje nieprawidłowości. W części pod ukośnym przewieszeniem ściany występują liniowe mostki cieplne na styku połączenia ze ścianą przyziemia – obraz termalny w tym miejscu to nie jest efekt „ciepłego cienia”, ale efekt intensywnego liniowego mostka cieplnego. Dwa małe okna na ścianie przyziemia (prawy dolny róg) charakteryzują się małą izolacyjnością termiczną, przy czym niższa temperatura okna lewego (poznacznie lepsze właściwości izolacyjne w porównaniu z oknem prawym) wynika z zasłonięcia go żaluzją wewnętrzną



Rys. 6.72. Termogram fragmentu elewacji budynku wielorodzinnego – zróżnicowanie temperatury powierzchni szyb w oknach, sugerujące różną izolacyjność termiczną okien, wynika z zasłonięcia żaluzjami wewnętrznymi części okien, których temperatura jest przez to niższa. Wszystkie okna mają taką samą izolacyjność cieplną, a w mieszkaniach panuje podobna temperatura powietrza

Poza względną oceną izolacyjności termicznej, termowizyjne badania okien i fasad przeszklonych umożliwiają również sprawdzenie szczelności okien, drzwi wejściowych i balkonowych, fasad przeszklonych oraz sprawdzenie jakości ich montażu, tzn. sprawdzenie prawidłowości termicznego zaizolowania styku z murem. Ogólnie biorąc, zapewnienie szczelności wszystkich przegród tworzących termiczną obudowę budynków jest bardzo istotne ze względu na ochronę cieplną budynków, kosztów eksploatacyjnych oraz komfortu cieplnego ludzi i jest wymagana stosownymi przepisami budowlanymi [203]. Wymagania te dotyczą okien i drzwi balkonowych, drzwi wejściowych oraz przegród pełnych, w tym połaci dachowych oraz ścian i stropodachów systemowych.



Rys. 6.73. Termogramy fragmentu elewacji budynku wielorodzinnego – zróżnicowanie temperatury powierzchni szyb, sugerujące różną izolacyjność termiczną okien, wynika z braku zasiedlenia niektórych mieszkań, w których zastosowano ogrzewanie dyżurne na poziomie ok. 12–15 °C (okna tych mieszkań są zimniejsze, na termogramach ciemniejsze, co sugerowałoby lepsze właściwości izolacyjne okien – natomiast wszystkie okna w budynku są tego samego rodzaju). Widoczny jest również efekt „ciepłego cienia” w loggiach

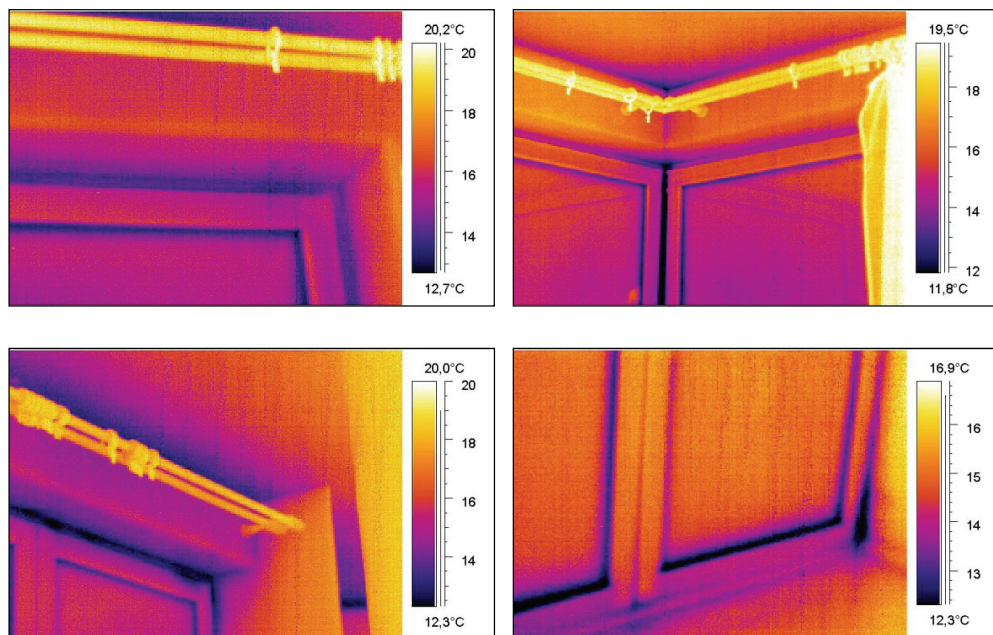
Problem szczelności przegród budowlanych, pełnych i przeziernych, jest bardzo istotny z dwóch powodów:

- straty ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego praktycznie niemal zawsze stanowią największy udział w całkowitych stratach ciepła, zarówno w domach jednorodzinnych jak i wielorodzinnych, co z kolei przekłada się na zwiększone koszty ogrzewania budynków,
- nadmierna infiltracja zimnego powietrza powoduje pogorszenie komfortu cieplnego w pomieszczeniach.

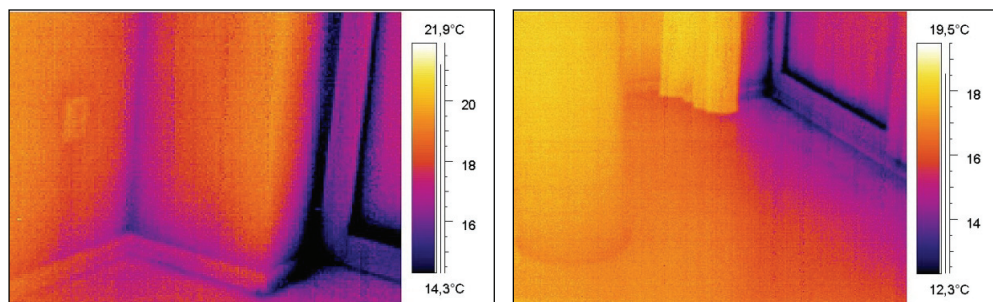
Problemy szczelności przegród dotyczą przede wszystkim stolarki okiennej i drzwiowej, a ostatnio coraz częściej również przegród nieprzeziernych, np. połaci dachowych mieszkań poddaszowych i stropodachów – identyfikację nieszczelności tych przegród przedstawiono w rozdziałach 6.7.5 i 6.7.6.

Na rysunkach od 6.74 do 6.77 przedstawiono przykładowe termogramy okien i drzwi balkonowych, wykonane od strony wewnętrznej, z pokazaniem miejsc wadliwego cieplnego zaizolowania połączenia stolarki z murem oraz miejsca nadmiernej infiltracji powietrza zewnętrznego do pomieszczenia. Należy jednak wyraźnie zwrócić uwagę, że miejsca infiltracji zimnego powietrza zewnętrznego nie zawsze wskazują na wady okien i/lub drzwi balkonowych – patrz komentarz w tym rozdziale powyżej.

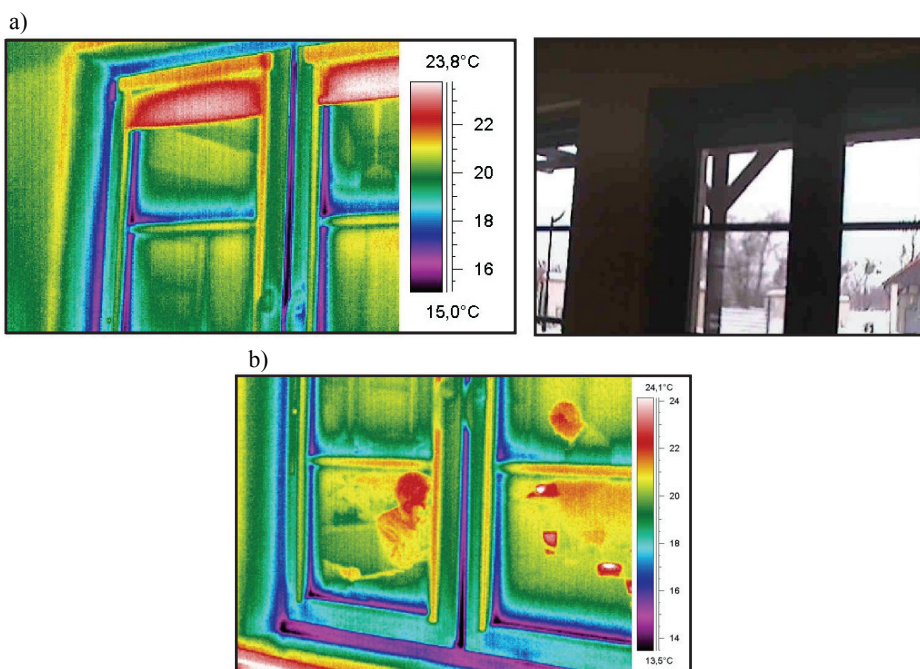
Przedstawione termogramy okien były wykonane w budynkach istniejących, w warunkach eksploatacyjnych i służyły głównie do względnej oceny okien poprzez porównywanie rozkładu temperatury na powierzchniach okien na elewacji danego budynku. Termogramy okien bez zakłóceń eksploatacyjnych po obu stronach są możliwe do wykonania jedynie w warunkach laboratoryjnych, w specjalnych komorach klimatycznych, pokazanych na rysunku 6.78, właściwie przygotowanych, eliminujących przypadkowe zakłócenia termalne możliwe do wystąpienia po obu stronach badanych okien [47], [183].



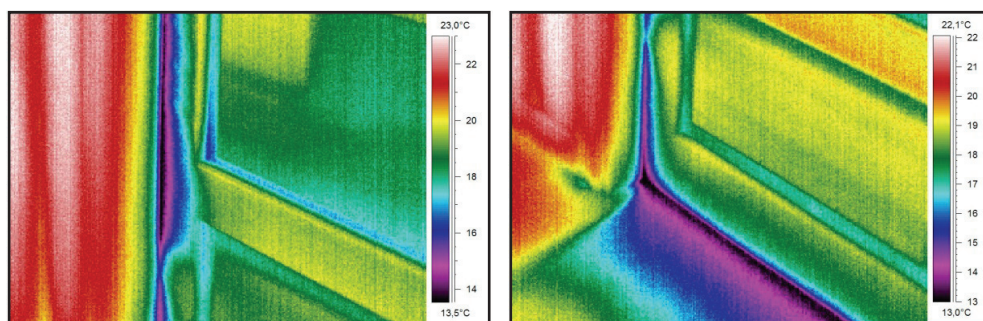
Rys. 6.74. Termogramy okien i drzwi balkonowych wykonane od strony pomieszczenia – termogramy potwierdzają zły montaż okien i drzwi balkonowych na styku z ościeżkami (murem), źle zaizolowane termicznie są połączenia okien z ościeżem (mostki cieplne liniowe). Widoczne jest również obniżenie temperatury zestawów szyb zespolonych w strefie przykrawędziowej przy ramach okien



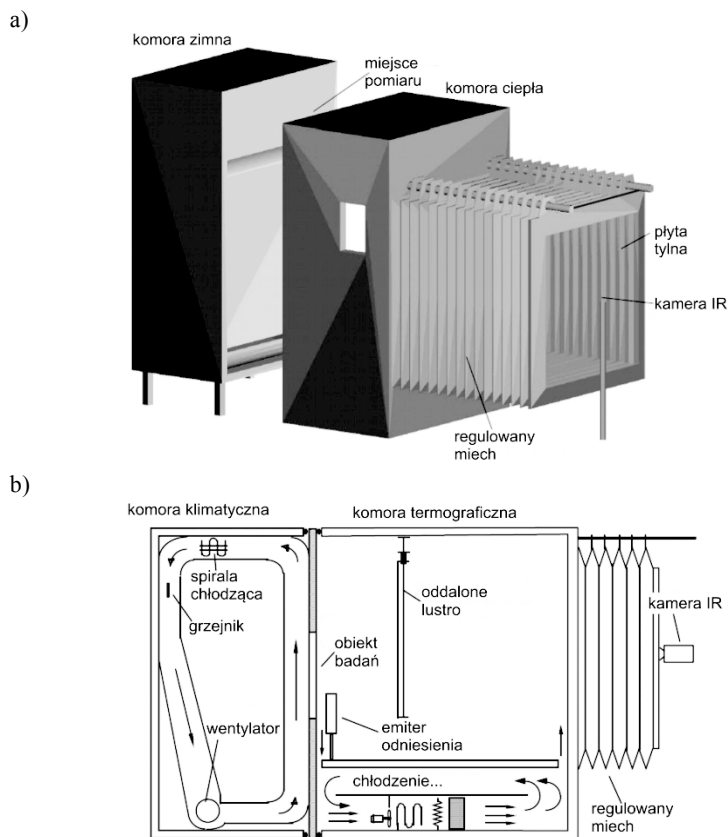
Rys. 6.75. Termogramy drzwi balkonowych wykonane od strony pomieszczenia. Widoczne są miejsca z nadmiernie obniżoną temperaturą w miejscach styku ościeżnicy z murem, wynikającą ze złego zaizolowania termicznego tego styku i z nadmiernej infiltracji zimnego powietrza zewnętrznego oraz obniżonej temperatury podłogi wzdłuż styku z drzwiami



Rys. 6.76. Termogramy okien wykonane od strony pomieszczenia: a) widoczne jest obniżenie temperatury zestawów szyb w strefach przykrawędziowych (przy ramiakach okien) oraz niewłaściwe zaizolowanie termiczne osadzenia okna, b) uwagi jak w punkcie (a) oraz odbicie na szybach obrazu termalnego osób przebywających w pomieszczeniu



Rys. 6.77. Termogramy drzwi balkonowych wykonane od strony pomieszczenia – termogramy ewidentnie wskazują na złe zaizolowanie termiczne na styku ościeżnicy z ościeżem drzwi, na nadmierną infiltrację powietrza zewnętrznego oraz na wychłodzenie podłogi na styku z drzwiami



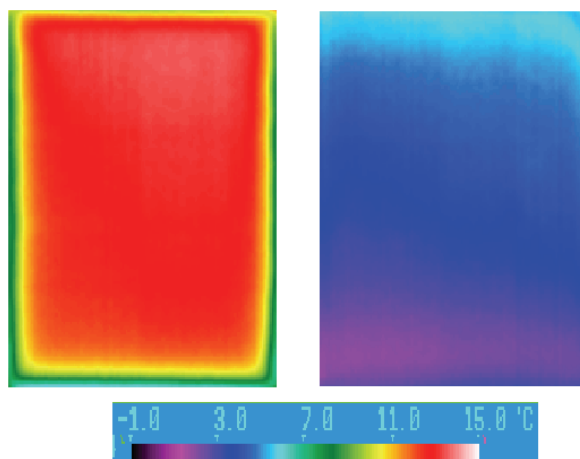
Rys. 6.78. Komory klimatyczne (część „zimna” i „ciepła”) do termograficznego badania okien:
a) widok aksonometryczny stanowiska pomiarowego, b) przekrój przez komory klimatyczne
(na podstawie [47])

Komory klimatyczne pokazane na rysunku 6.78 umożliwiają kompleksowe badania okien w zakresie przenikania ciepła, na różnych poziomach wymuszenia temperaturowego po obu stronach okna. Typowy eksperyment polega na umieszczeniu okna pomiędzy „zimną” i „ciepłą” komorą, na symulowaniu w obu komorach odpowiednich warunków termicznych oraz na wykonywaniu termogramów niezbędnych do jakościowej oceny izolacyjności cieplnej okien. Termogramy okien są pomocne w interpretacji przepływu ciepła przez poszczególne części okna, zwłaszcza przez strefy przykrawędziowe oszklenia, gdzie występuje dwukierunkowe przenikanie ciepła i obniżenie temperatury powierzchni szyby oraz gdzie pojawia się duże ryzyko powierzchniowej kondensacji pary wodnej. Wyniki badań termowizyjnych są również bardzo pomocne w testowaniu i walidacji programów komputerowych symulujących przepływ ciepła i powietrza przy szybach. Badania okien w laboratorium mogą przyczynić się do poprawy efektywności energetycznej budynków poprzez wspomaganie

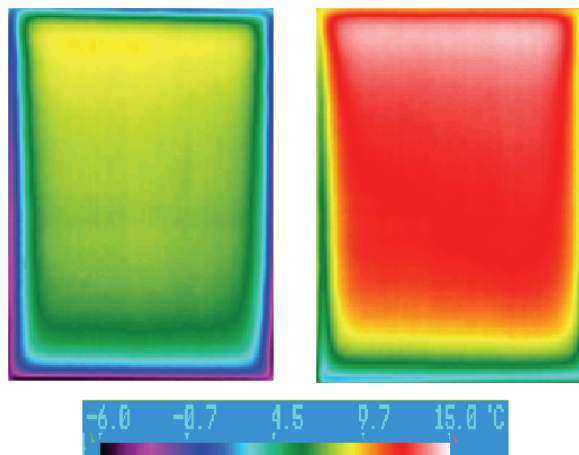
projektowania okien o coraz to lepszych parametrach cieplnych i wspieranie rozwoju narzędzi symulacyjnych do obliczania przepływu ciepła przez okna.

Przedstawione poniżej termogramy zostały wykonane od strony „cieplej” komory, tzn. że miejsca o wyższej izolacyjności cieplnej są cieplejsze, natomiast miejsca zwiększonych strat ciepła są zimniejsze (podobna zasada jak przy badaniu przegród od strony ogrzewanego pomieszczenia). Ponadto obraz termalny wszystkich przedstawionych poniżej okien jest symetryczny względem osi pionowej, natomiast nie jest symetryczny względem osi poziomej okna, co jednoznacznie wynika z procesów cieplnych zachodzących w zestawach szyb zespolonych, w strefie przykrawędziowej oszklenia i w ramie okna [47].

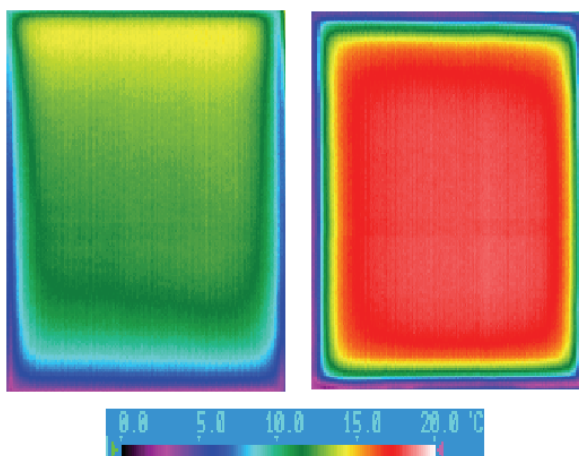
Komory klimatyczne pokazane na rysunku 6.78 umożliwiają termowizyjne badanie okien bez zakłóceń termalnych po obu stronach okien, a uzyskane termogramy mogą stanowić termogramy odniesienia dla okien badanych w budynkach istniejących. Z termogramów pokazanych na rysunkach 6.79–6.82 wynika, że obniżenie temperatury zestawu szyb zespolonych w strefie przykrawędziowej okna, zwłaszcza w strefie dolnej, jest zjawiskiem naturalnym i wynika z występującego w tym miejscu dwukierunkowego przenikania ciepła. *Termogramy okien uzyskane z pomiarów na budynkach istniejących i podobne do tych pokazanych na rysunkach 6.79–6.82 nie zawsze identyfikują wady okien, ale jedynie są potwierdzeniem zjawisk fizycznych występujących przy przenikaniu ciepła przez okna.* Oczywiście strefa przykrawędziowa zestawu szyb okien o gorszej izolacyjności cieplnej i o gorszej jakościowo ramce dystansowej jest



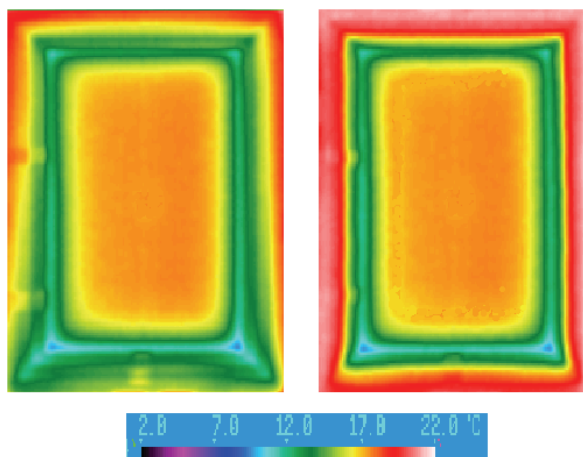
Rys. 6.79. Termogramy okien uzyskane w warunkach laboratoryjnych – po lewej stronie widoczny jest termogram okna szklonego podwójnie, po stronie prawej jest termogram okna szklonego pojedynczo. Okno pojedynczo szklone jest tylko nieznacznie cieplejsze od zimniejszego środowiska termicznego za oknem. Okno podwójnie szklone jest znacząco cieplejsze, co wskazuje na lepszą izolacyjność cieplną okna oraz na bardziej przyjazne warunki termiczne w pomieszczeniu. W obu przypadkach po stronie zewnętrznej występowała temperatura powietrza 0 °C [47], [183]



Rys. 6.80. Termogramy okien uzyskane w warunkach laboratoryjnych – oba okna są podwójnie szklone. Okno po lewej stronie składa się z zestawu zwykłych szyb zespolonych z przekładką aluminiową, natomiast okno po stronie prawej jest z powłoką niskoemisyjną i z przekładką izolacyjną. Niższa temperatura lewego okna na obrzeżach wynika z gorszych właściwości izolacyjnych zwykłej przekładki aluminiowej, co może być przyczyną kondensacji pary wodnej na szybie. Okno po prawej stronie jest cieplejsze, ponieważ powłoka niskoemisyjna powoduje wzrost oporu cieplnego zestawu szyb zespolonych (w obu przypadkach temperatura powietrza zewnętrznego wynosiła $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$). Obraz termalny w strefie przykrawędziowej okien, zwłaszcza w dolnej strefie okna, wynika z dwukierunkowego przenikania ciepła – w tych miejscach najczęściej pojawia się kondensacja pary wodnej od strony pomieszczenia [47], [183]



Rys. 6.81. Termogramy okien uzyskane w warunkach laboratoryjnych – oba okna są podwójnie szklone. Okno po lewej stronie jest z powłoką niskoemisyjną i z przekładką izolacyjną. Okno po prawej stronie jest również z powłoką niskoemisyjną, z przekładką izolacyjną oraz z wypełnieniem kryptonem (zamiast argonu). Tak skonstruowane okno jest nazywane „super okno” (ang. *superwindow*). W obu przypadkach temperatura powietrza zewnętrznego wynosi $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ [47], [183]



Rys. 6.82. Termogramy okien uzyskane w warunkach laboratoryjnych – oba okna są podwójnie szklone. Zestawy szyb zespolonych są takie same, natomiast różnią się ramy skrzydeł i ościeżnicy – rama i ościeżnica wykonana z profili PCV po lewej stronie są bez wypełnienia (są puste), natomiast te po prawej stronie są wypełnione pianką izolacyjną, przez co okno po prawej stronie ma większą izolacyjność cieplną, co przekłada się na obraz termalny okna. W obu przypadkach temperatura powietrza zewnętrznego wynosi $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [47], [183]

znacznie szersza i wówczas bez wątpliwości znaczne obniżenie temperatury w tym miejscu jest potwierdzeniem wady okna.

Termograficzne badania okien w komorach klimatycznych są badaniami podstawowymi w zakresie poprawy ich izolacyjności termicznej, optycznych właściwości radiacyjnych różnego rodzaju szyb, rozwoju stosownego oprogramowania komputerowego oraz w zakresie opracowywania norm, procedur klasyfikacji i oceny jakości okien.

6.7.4. Balkony

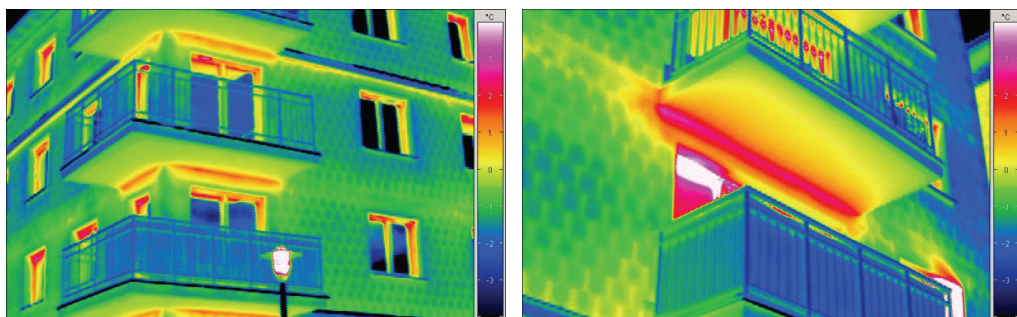
Ze względu na straty ciepła z budynku, specyficznymi elementami elewacyjnymi są balkony żelbetowe wspornikowo zamocowane w wieńcach stropowych. Połączenia balkonów żelbetowych ze ścianami zewnętrznymi i stropami bardzo często tworzą uciążliwe mostki cieplne liniowe, powodujące zwiększenie strat ciepła z budynku, kondensację pary wodnej i rozwój grzybów pleśniowych na powierzchniach ścian i stropów od strony pomieszczenia. Są trzy główne sposoby ograniczania wpływu liniowych mostków cieplnych powodowanych przez żelbetowe płyty balkonowe, a mianowicie:

1. Ocieplenie żelbetowej płyty balkonowej płytami izolacyjnymi, np. styropianowymi lub z wełny mineralnej, od spodu, z góry i krótszych krawędzi balkonu w taki sposób, aby izolacja tworzyła ciągłość z izolacją cieplną ściany.

2. Zastosowanie specjalnej wkładki styropianowej (z prętami zbrojeniowymi), np. typu Isokorb, w miejscu połączenia płyty balkonowej z wieńcem żelbetowym w taki sposób, aby była zachowana ciągłość izolacji z izolacją cieplną ściany.

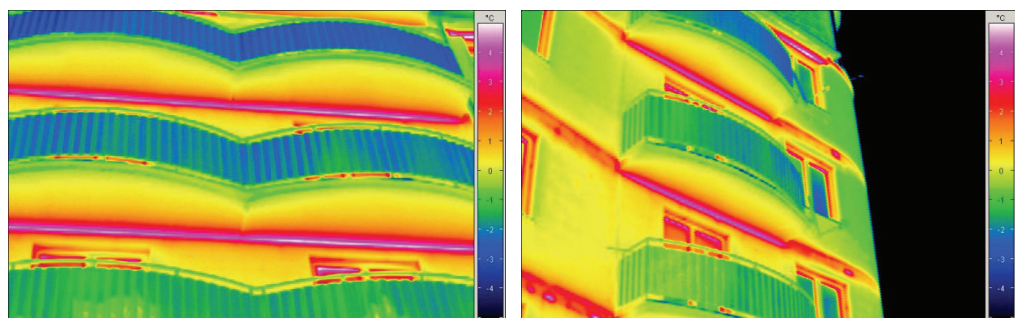
3. Zastosowanie konstrukcji płyty balkonowej niezależnej od konstrukcji budynku (niepołączonej z budynkiem), wspartej na słupach i belkach tworzących oddzielną konstrukcję od budynku.

Na rysunkach od 6.83 do 6.88 przedstawiono termogramy żelbetowych płyt balkonowych o różnej konstrukcji, z odpowiednim komentarzem pod termogramami (badania własne autora [132]).

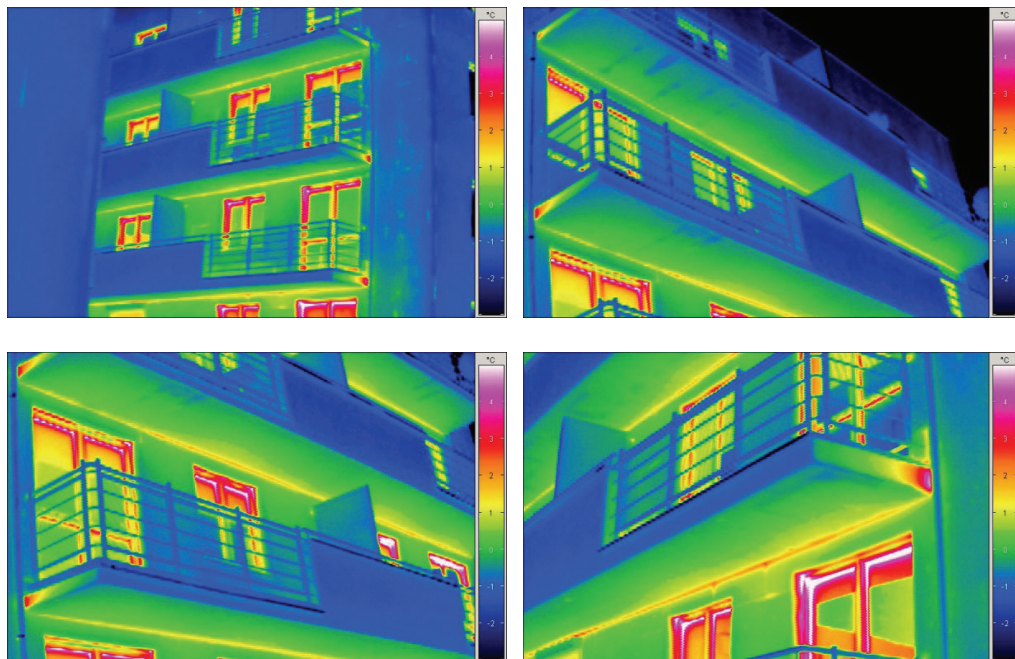


Rys. 6.83. Termogramy elewacji budynków z żelbetowymi płytami balkonowymi, w których zastosowano specjalną wkładkę styropianową typu Isokorb, rozdzielającą płytę balkonową od wieńca żelbetowego.

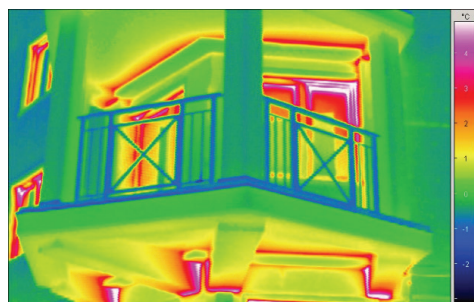
Okazuje się, że niezależnie od zastosowania tej wkładki izolacyjnej, bardzo istotne jest również prawidłowe zaizolowanie termiczne nadproża okiennego – złe wykonanie izolacji nadproża niweczy efekt zastosowania wkładki styropianowej, co widoczne jest na termogramach. Ponadto ściany zewnętrzne wykonane są z drążonych pustaków ceramicznych bez izolacji termicznej – widoczne są mostki cieplne w miejscach spoin oraz liniowe mostki cieplne wokół okien (brak izolacji cieplnej węgarów okiennych)



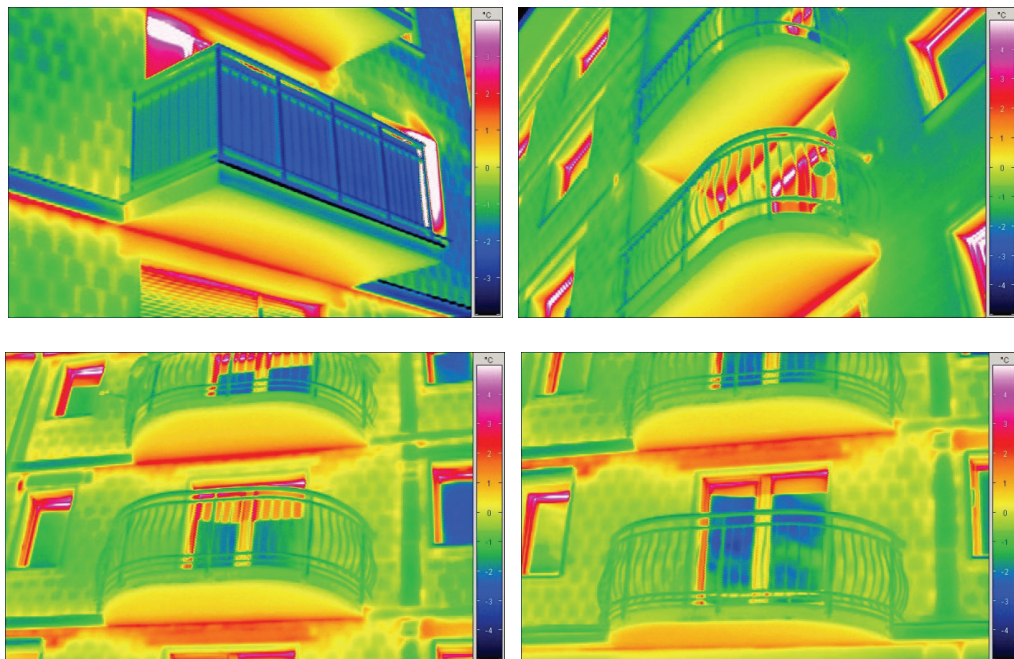
Rys. 6.84. Przykłady termogramów elewacji budynków z żelbetowymi płytami balkonowymi, w których zastosowano specjalną wkładkę styropianową typu Isokorb, rozdzielającą płytę balkonową od wieńca żelbetowego – komentarz podobny jak do rys. 6.83. Ponadto widoczne są mostki cieplne spowodowane przez złe zaizolowane wieńce żelbetowe



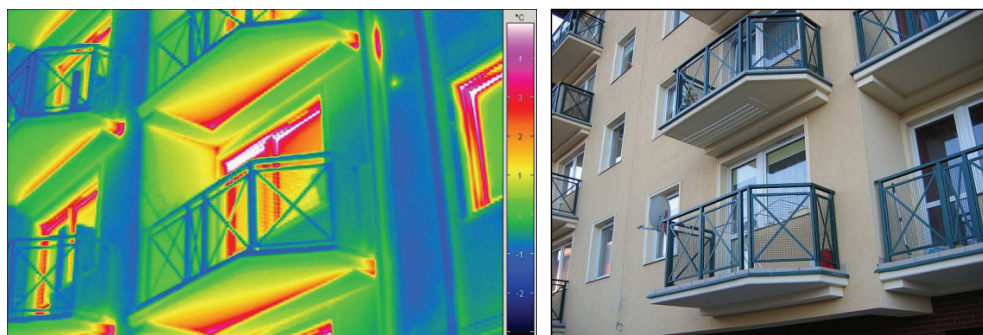
Rys. 6.85. Termogramy żelbetowych płyt balkonowych ocieplonych od spodu i z góry płytami styropianowymi o grubości 4 cm – ten sposób izolowania płyt balkonowych jest dosyć skuteczny, temperatura powierzchni płyt jest relatywnie niska (dla porównania patrz pozostałe termogramy balkonów). Gdyby zastosowano styropian o większej grubości (np. 6–8 cm) obraz termalny spodniej powierzchni płyty balkonowej byłby jeszcze bardziej korzystny (byłaby niższa temperatura spodniej powierzchni płyty). Z termogramów wynika, że powinno się również izolować boczne (krótsze) krawędzie balkonów. Widoczne jest również dobre zaizolowanie ścian zewnętrznych (jednorodna niska temperatura powierzchni ścian, bez widocznych mostków liniowych, np. w miejscach wieńców żelbetowych) oraz niewłaściwie zaizolowane węgariki okienne (mostki cieplne wokół okien)



Rys. 6.86. Przykłady liniowych mostków cieplnych na styku płyty balkonowej ze ścianą zewnętrzną oraz w miejscach połączenia żelbetowej konstrukcji wsporczej balkonów (wsporniki żelbetowe) z budynkiem. Widoczne są również źle zaizolowane węgariki okienne



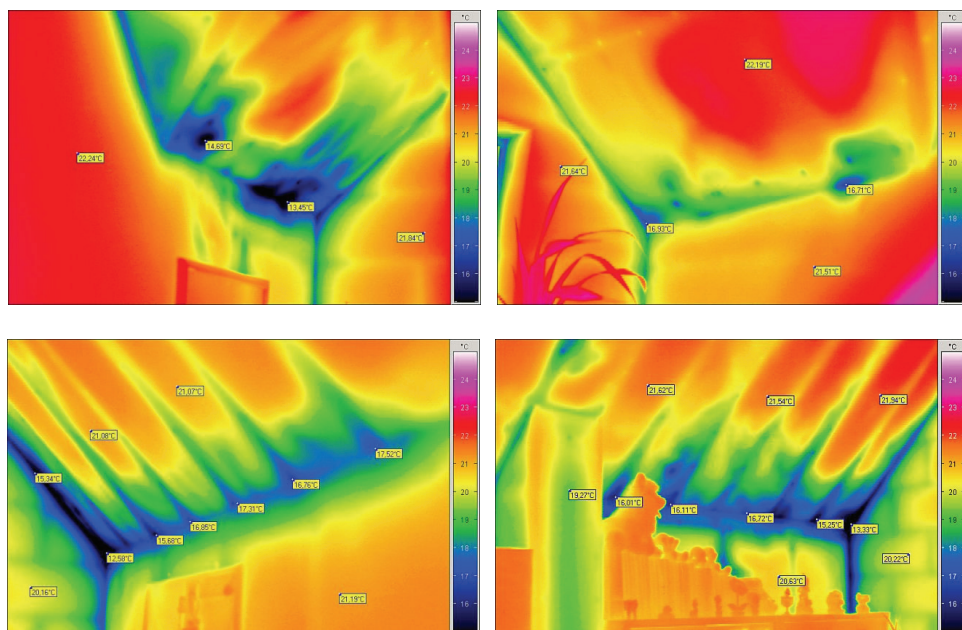
Rys. 6.87. Inne przykłady termogramów elewacji budynków z żelbetowymi płytami balkonowymi, w których zastosowano specjalną wkładkę styropianową typu Isokorb, rozdzielającą płytę balkonową od wieńca żelbetowego – komentarz podobny jak do rys. 6.84



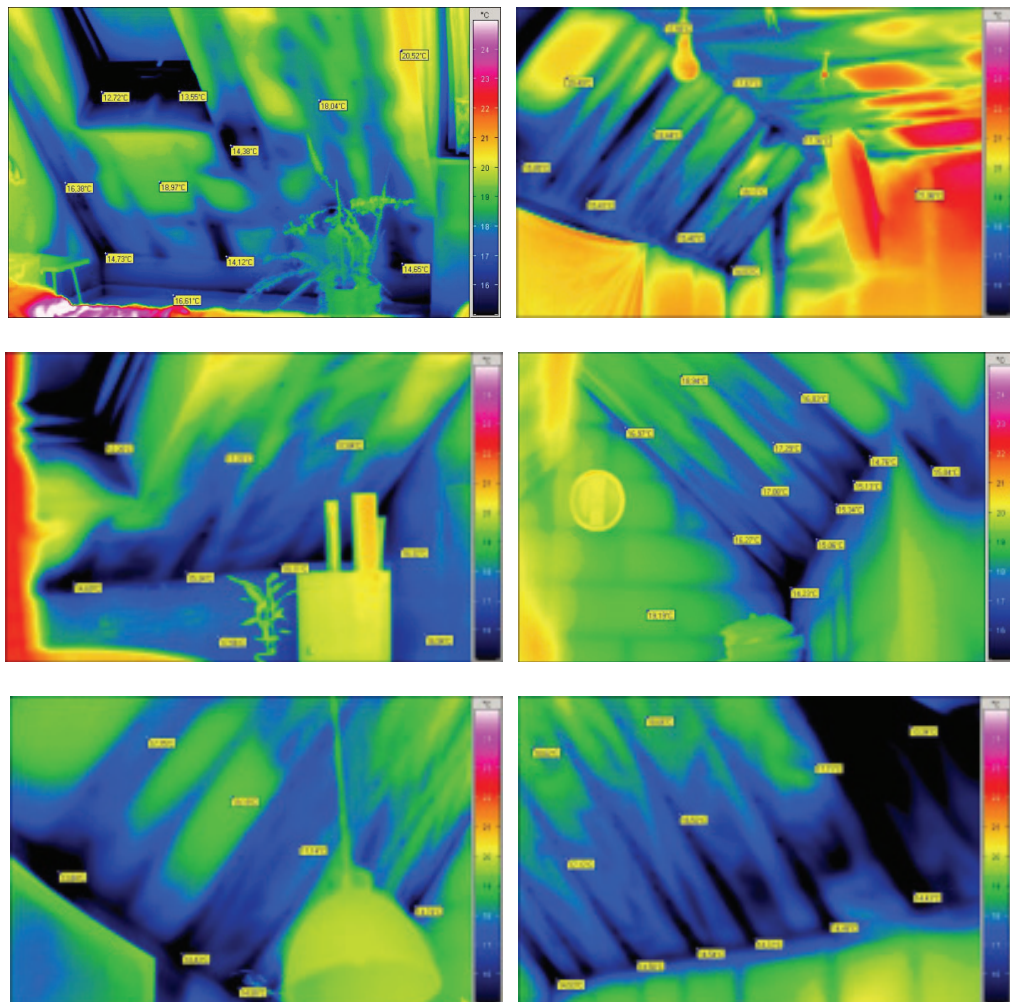
Rys. 6.88. Przykład termogramu płyt balkonowych zaizolowanych od spodu nietypowo płytami styropianowymi o grubości 12 cm, ale pasami o szerokości jedynie 25 cm – widoczny jest efekt termalny takiego dziwnego rozwiązania, tzn. widoczna jest podwyższona temperatura powierzchni płyt w miejscach poza izolacją. Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie styropianu o grubości 6–8 cm, ale na całej powierzchni płyty balkonowej. Ponadto widoczne są źle zaizolowane węgariki okienne

6.7.5. Połacie dachowe

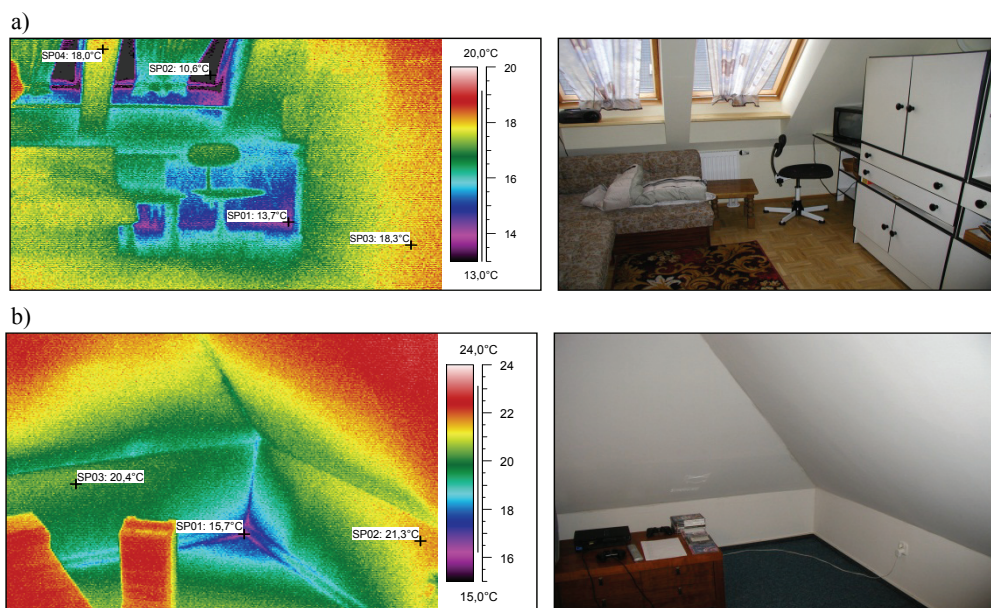
Specyficznymi przegrodami budowlanymi do badań termowizyjnych są połacie dachowe ogrzewanych poddaszy użytkowych – połaci tych nie możemy badać z poziomu terenu ze względu na niekorzystny kąt patrzenia kamery termowizyjnej. Drugim powodem jest to, że najczęściej połacie dachowe są wentylowane poprzez pustkę powietrzną między warstwą izolacji cieplnej i pokryciem dachowym. Nawet zatem gdyby była możliwość wykonania badania połaci dachowej z sąsiedniego wyższego budynku, wówczas i tak pomiary byłyby przekłamane – patrz komentarz do wykonywania badań elewacji wentylowanych (rys. 6.37). Najwłaściwszym sposobem badania tych przegród jest tzw. termografia lotnicza (rozdz. 6.7.10) i/lub badania przegród od strony pomieszczenia. W praktyce badania połaci dachowych odbywają się od strony pomieszczenia. Na rysunkach 6.89 i 6.90 pokazano termogramy połaci dachowych, wykonanych od strony pomieszczenia, wskazujących na mostki cieplne w miejscach



Rys. 6.89. Przykłady mostków cieplnych w połaciach dachowych, na poziomie belki podwalinowej (murlaty), w miejscach występowania niezaizolowanych od strony pomieszczenia krokwi dachowych oraz na stykach połaci dachowych ze ścianami. Przedmuchiwanie połaci dachowych zimnym powietrzem następują w wyniku przedostawania się do wewnątrz zimnego powietrza zewnętrznego w okolicach okapu dachu, a następnie infiltracji tego powietrza przez przestrzeń między płytami GK i wełną mineralną



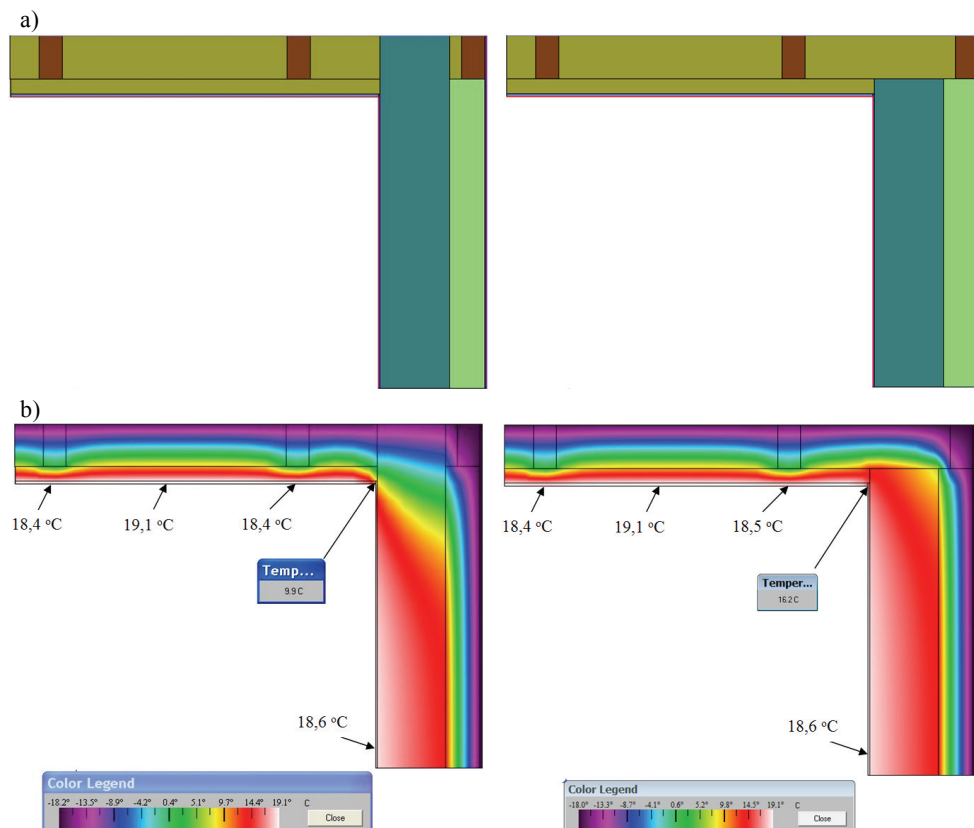
Rys. 6.90. Przykłady mostków termicznych w połaciach dachowych od strony pomieszczenia – na termogramach widoczne są miejsca występowania mostków ciepłych w miejscach krokwi (nieocieplonych od strony pomieszczenia), mostków ciepłych na poziomie nieocieplonej murlaty oraz na stykach połaci dachowej ze ścianami. Zimne powietrze przedostaje się przez okap oraz przez przestrzeń powietrzną między płytami GK, znajdującymi się od strony pomieszczenia i warstwę izolacji cieplnej, tworząc pokazany obraz termiczny. Tego typu termogramy mogą mylnie wskazywać na niewłaściwą izolację cieplną połaci dachowej – w tym przypadku grubość wełny mineralnej między krokiewiami jest odpowiednia do spełnienia wymagań odnośnie do współczynnika przenikania ciepła połaci dachowej. Tak naprawdę problem leży w wadliwym zabezpieczeniu połaci dachowej przed nadmiernym przewiewaniem zimnym powietrzem zewnętrznym w przestrzeni między płytami GK i izolacją z wełny mineralnej



Rys. 6.91. Przykładowe termogramy połaci dachowych na poziomie nieocieplonych ścianek kolankowych: a) ścianki kolankowej połaci dachowej w mieszkaniu środkowym, b) ścianki kolankowej w pomieszczeniu narożnym. We wszystkich mieszkaniach poddaszowych badanego budynku nie ocieplono ścianek kolankowych

niezaizolowanych cieplnie od spodu krokwi dachowych, w miejscach murłaty oraz w miejscach przedmuchiwania szczeliny powietrznej między izolacją cieplną i płytami GK powietrzem zewnętrznym.

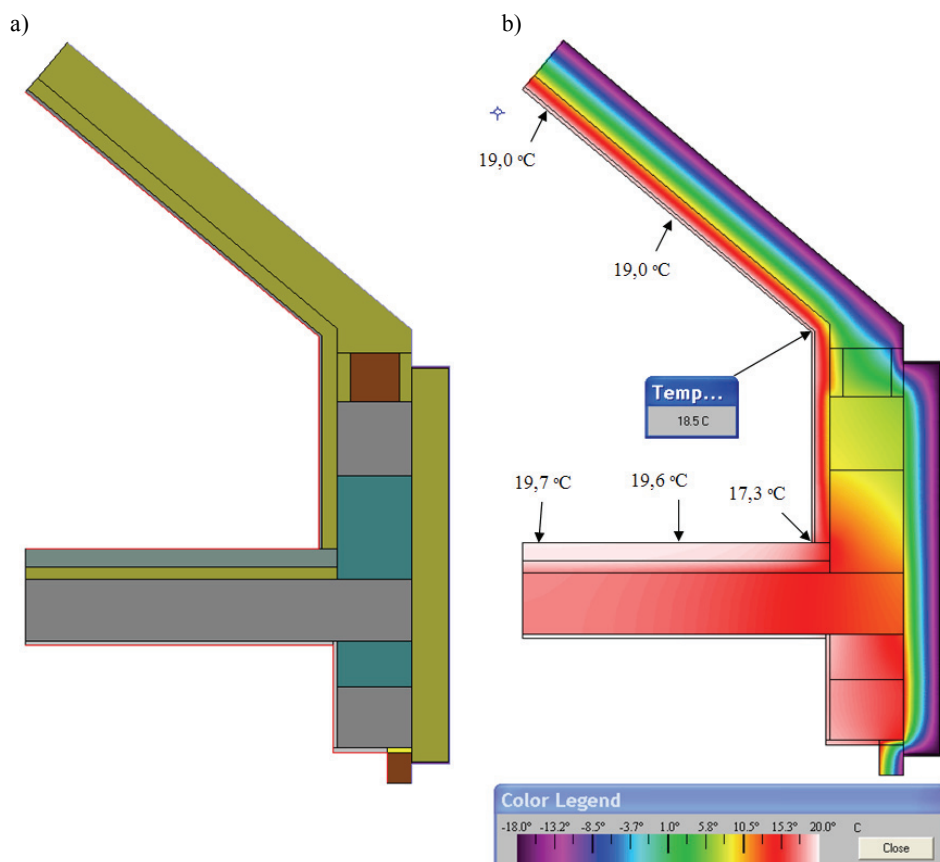
W analizowaniu termogramów badanych przegród budowlanych niemal zawsze pojawia się pytanie: „jaki w tym przypadku powinien być prawidłowy rozkład temperatury na powierzchniach badanych przegród?”. Aby odpowiedzieć na to pytanie, należy albo termowizyjnie przebadać takie same lub podobne przegrody budowlane dobrze zaizolowane termicznie (termogramy odniesienia, rozdz. 6.6), albo dokonać analizy numerycznej przenikania ciepła przez analizowane przegrody. Na rysunku 6.92 przedstawiono przykładowe wyniki analizy numerycznej rozkładu temperatury w przekroju połączenia ściany szczytowej z połacią dachową. Jest to przykład analizy rozkładu temperatury na powierzchniach granicznych przegród budowlanych poddanych inspekcji termograficznej – badanie to wspomaga się najczęściej obliczeniami numerycznymi rozkładu temperatury na powierzchniach granicznych analizowanych przegród. Do obliczeń przyjęto temperatury powietrza występujące w czasie badań, tj. temperaturę powietrza w pomieszczeniu 20 °C i na zewnątrz –18 °C.



Rys. 6.92. Przykłady wyników analizy rozkładu temperatury w złączach przegród – złącza ściany zewnętrznej wykonanej z bloczków silikatowych M24, ocieplonej styropianem grubości 12 cm i połaci dachowej, ocieplonej wełną mineralną grubości 18 cm, na poziomie poddasza użytkowego: a) przekrój przez dwa połączenia przegród, b) odpowiadający rozkład temperatury na powierzchniach i wewnątrz przegród. Temperatura w narożu $9,9^{\circ}\text{C}$ jest zdecydowanie za niska i powinna wynosić co najmniej $11,7^{\circ}\text{C}$ (dla temperatury powietrza w pomieszczeniu 20°C i wilgotności względnej 50%) – występuje ryzyko kondensacji pary wodnej na powierzchni styku przegród, ryzyko rozwoju grzybów pleśniowych oraz lokalne wychładzanie pomieszczeń. Temperatury na powierzchniach przegród można porównywać z wynikami badań termowizyjnych

Na rysunku 6.93 przedstawiono przykładowy rozkład temperatury w połączeniu ściany zewnętrznej z połacią dachową. W tym przypadku rozkład temperatury na powierzchniach badanych przegród nie stwarza ryzyka powierzchniowej kondensacji pary wodnej i rozwoju grzybów pleśniowych.

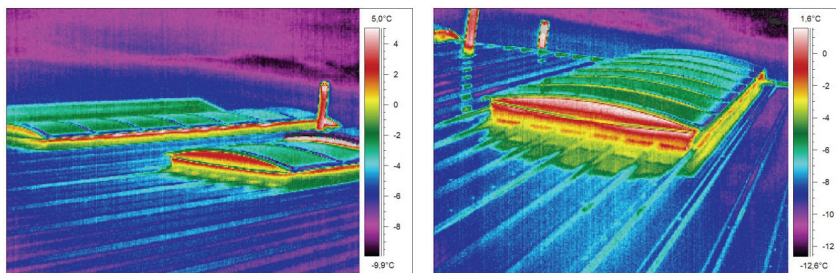
Obliczone wartości temperatury na powierzchniach przegród od strony pomieszczenia, dla warunków termicznych występujących w trakcie badań termowizyjnych, są bardzo pomocne w interpretacji termogramów.



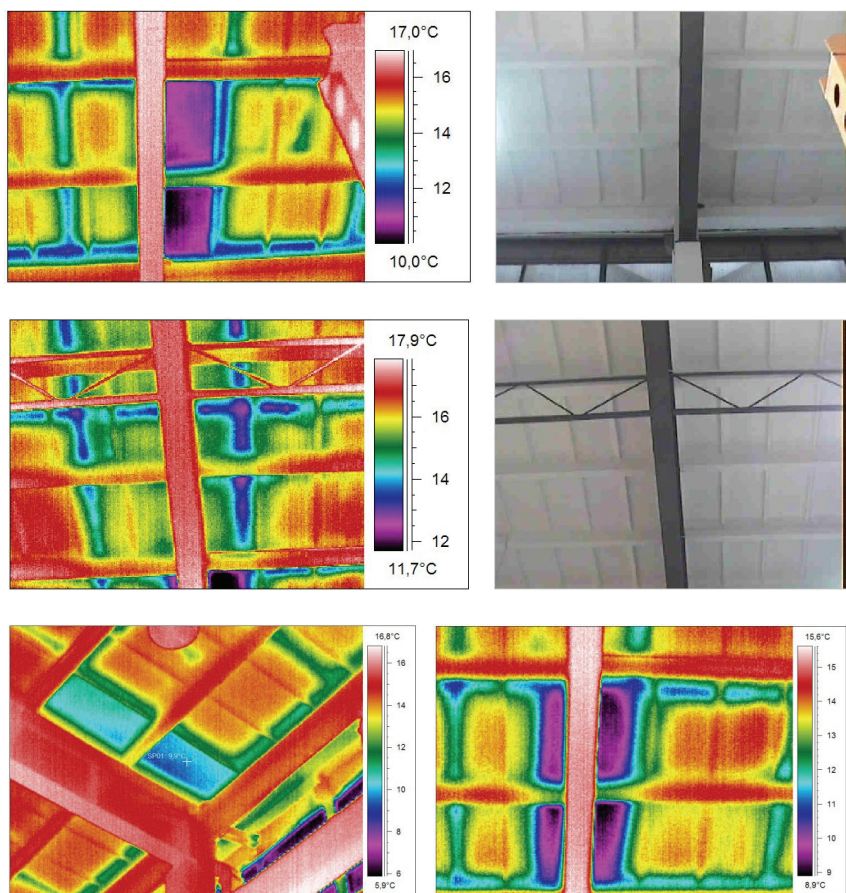
Rys. 6.93. Przekrój przez złącze ścianki kolankowej, stropu poddasza i połaci dachowej: a) przekrój przez połączenie przegród, b) rozkład temperatury na powierzchniach i wewnątrz przegród

6.7.6. Stropodachy

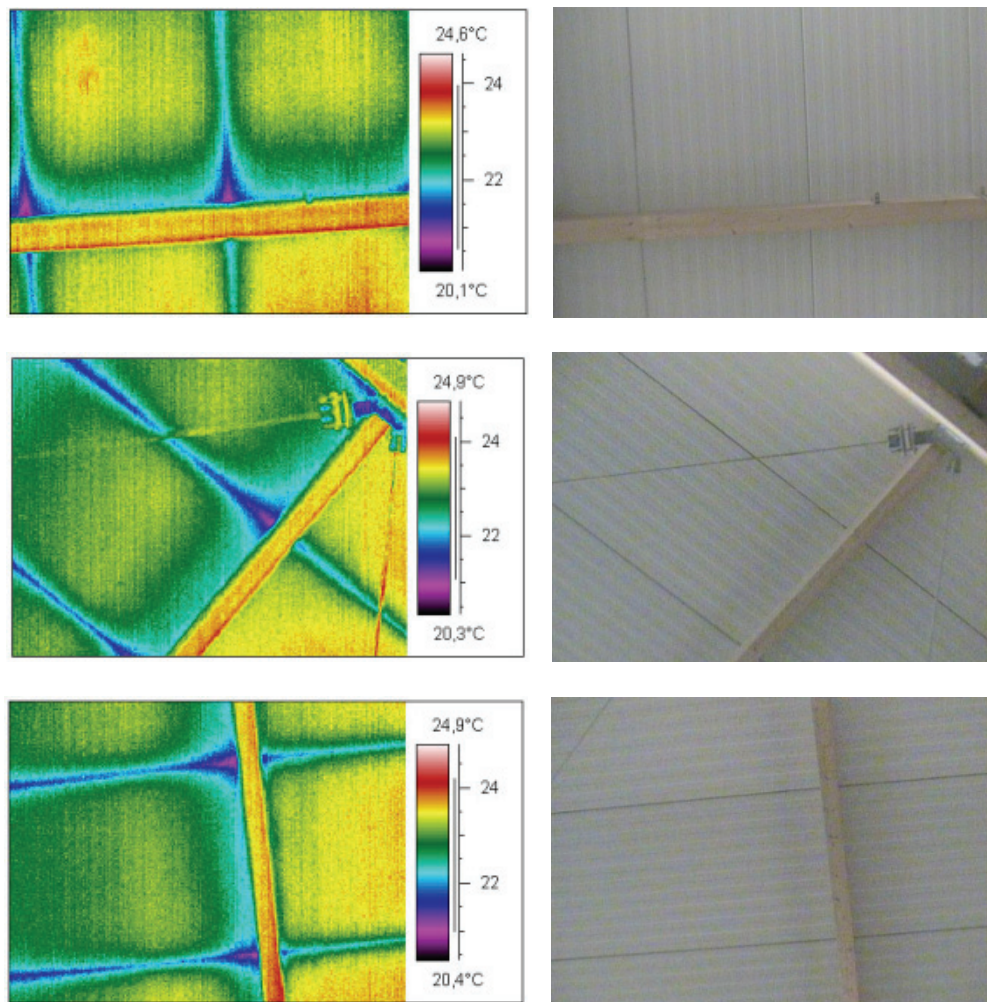
Podobnie jak połacie dachowe, stropodachy są również specyficznymi przegrodami budowlanymi, jeżeli chodzi o badania termowizyjne. Badania stropodachów można oczywiście wykonywać od strony pomieszczenia, natomiast od strony zewnętrznej można je wykonywać z poziomu stropodachu, z blisko położonego wyższego budynku sąsiedniego lub metodą tzw. termografii lotniczej (patrz rozdz. 6.7.10). Poniżej przedstawiono przykładowe termogramy wykonane od strony zewnętrznej i od strony pomieszczenia. Komentarz do badania stropodachów przedstawiono również w rozdziale 6.7.10.



Rys. 6.94. Termogramy stropodachu pełnego ogrzewanej hali produkcyjnej wykonane z poziomu stropodachu, z pokazaniem świetlików dachowych – widoczne są mostki cieplne na źle zaizolowanych ciepłnie ściankach wsporczych dla świetlików. Ścianki te są niewłaściwie zaizolowane i stanowią miejsca nadmiernych strat ciepła



Rys. 6.95. Termogramy pełnego stropodachu żelbetowego z płyt pianowych ogrzewanej hali laboratoryjnej, wykonane od strony pomieszczenia. Widoczne są mostki cieplne liniowe w miejscach łączenia żelbetowych płyt pianowych

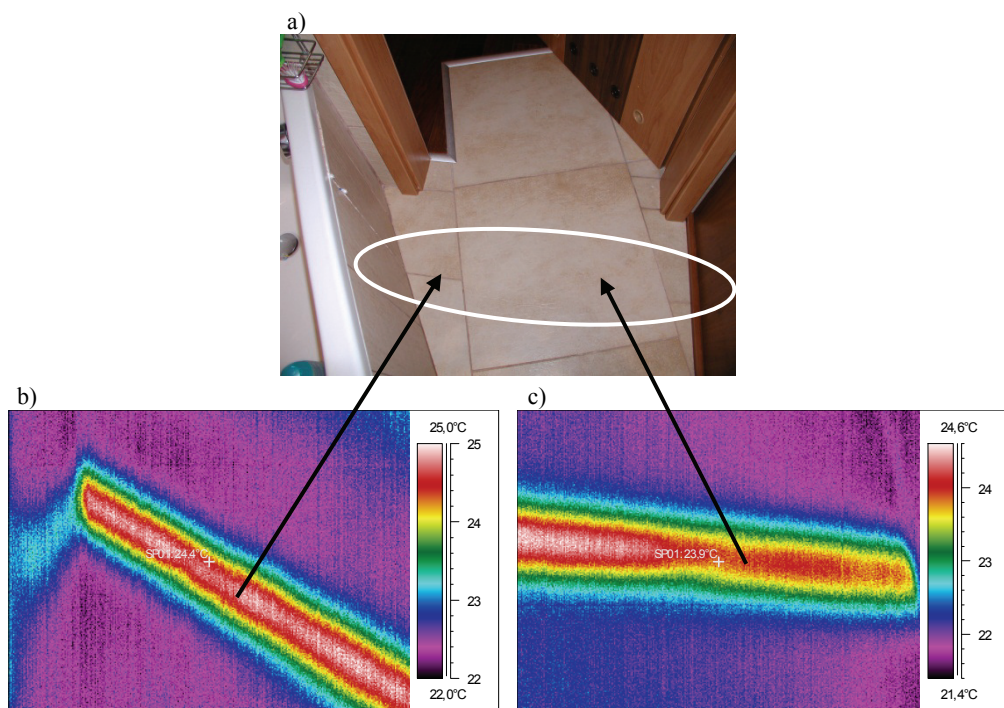


Rys. 6.96. Termogramy stropodachu pełnego, pokazanego na rys. 6.94, wykonane od strony ogrzewanego pomieszczenia. Termogramy jednoznacznie wskazują na nadmierne straty ciepła (niższa temperatura) w miejscach połączenia płyt dachowych (stropodach stanowią płyty faldowe powlekane z rdzeniem z wełny mineralnej)

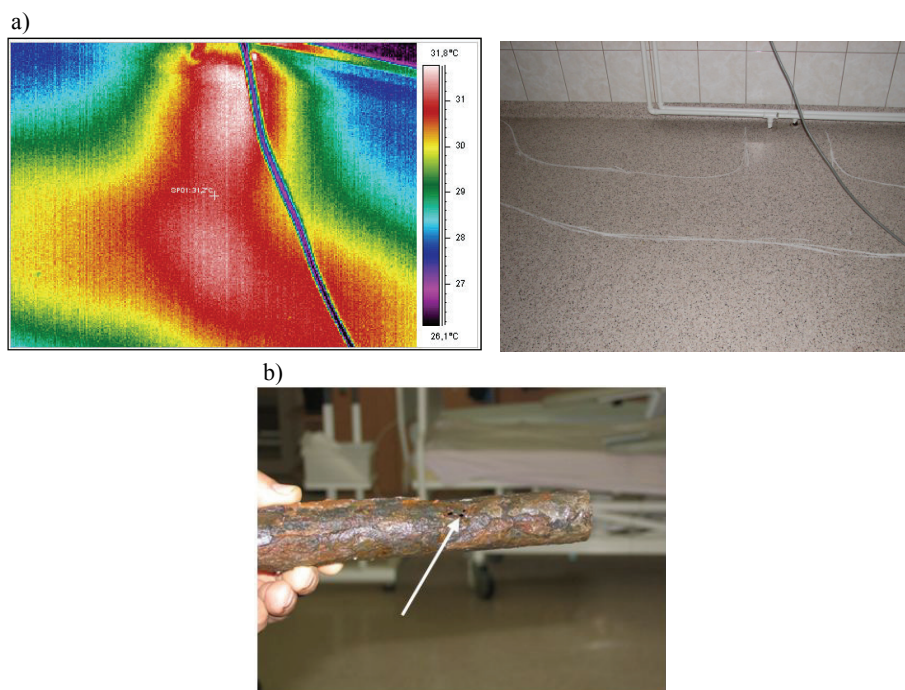
6.7.7. Instalacje centralnego ogrzewania, posadzki z ogrzewaniem podłogowym

Termografia podczerwona jest skutecznym narzędziem do identyfikacji awarii lub przebiegu instalacji transportujących gorące lub zimne media. Klasycznym przykładem jest lokalizacja awarii instalacji centralnego ogrzewania, w tym instalacji ogrzewania podłogowego. Może być również bardzo przydatna do lokalizacji przebiegu

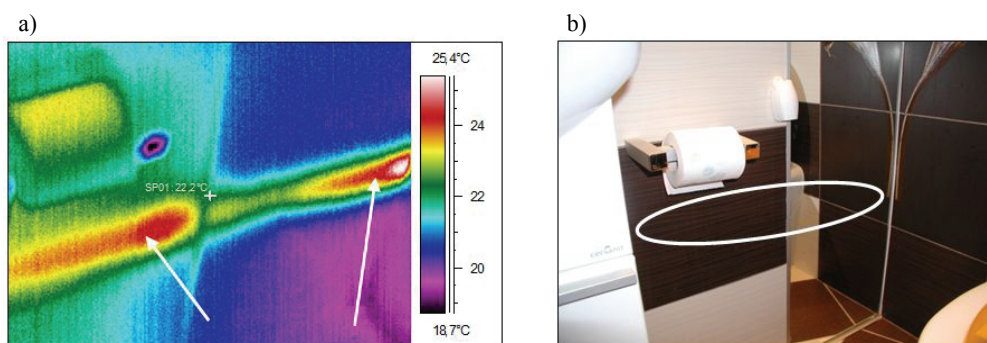
instalacji c.o. w murach i stropach (przy braku dokumentacji technicznej), dzięki czemu można uniknąć uszkodzenia instalacji w czasie remontu, do lokalizacji miejsc awarii, głównie pęknięć instalacji rurowych, najczęściej instalacji wodociągowych. Dzięki technice termowizyjnej możemy uniknąć wykonywania kosztownych i pracochłonnych odkrywek ścian i stropów. Warunkiem koniecznym lokalizacji przewodów lub ich awarii jest przepływ mediów o temperaturze różnej od temperatury materiałów, w którym przebiegają (przed pomiarami należy przepuścić gorącą lub zimną wodę). Przykładowe termogramy lokalizacji awarii i przebiegu instalacji ogrzewania podłogowego, przebiegu rury kanalizacyjnej w podłodze na gruncie oraz testowania sprawności instalacji centralnego ogrzewania przedstawiono poniżej [142].



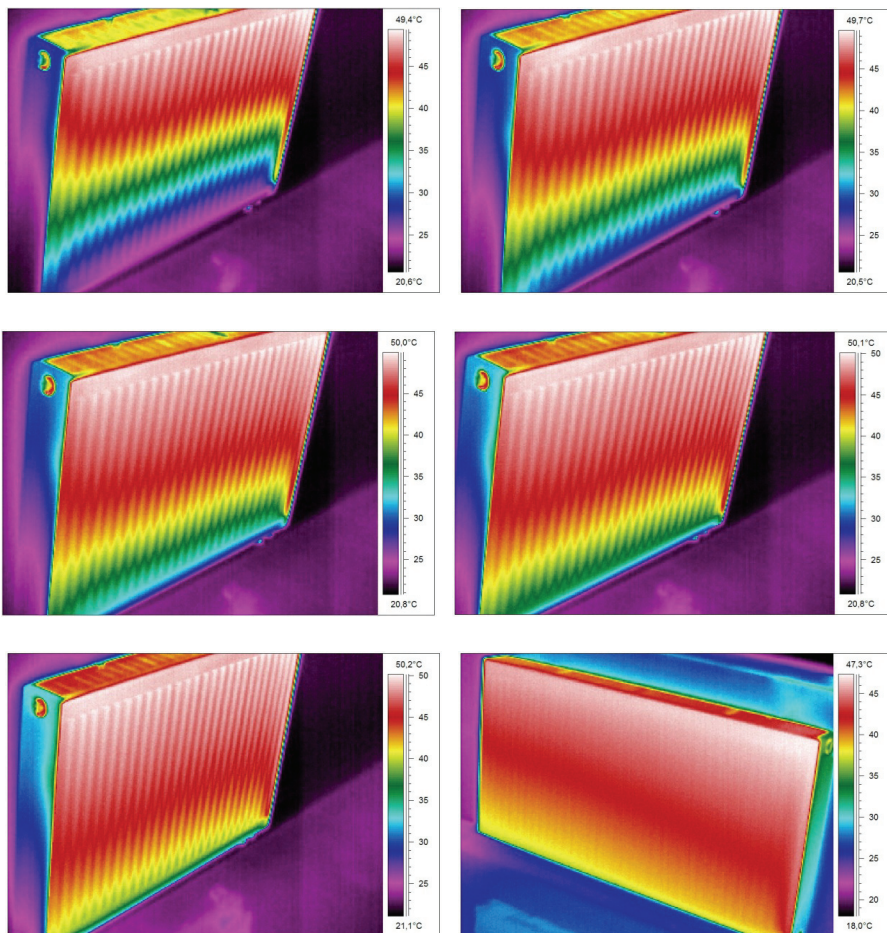
Rys. 6.97. Próba lokalizacji awarii rury kanalizacyjnej w łazience lokalu mieszkalnego na parterze budynku bez podpiwniczenia – termogramy powierzchni podłogi na gruncie w łazience przy drzwiach: a) widok na podłogę przy drzwiach od strony łazienki, b) termogram podłogi po lewej stronie drzwi, c) termogram podłogi po prawej stronie drzwi, patrząc na wejście do łazienki. Przed pomiarami przez kilka minut spuszczano gorącą wodę. Na obu termogramach widoczny jest rozkład temperatury na powierzchni podłogi w miejscu przebiegu rury kanalizacyjnej odprowadzającej wodę z wanny. Rozkład temperatury w miejscu przebiegu rury jest wyraźne liniowy, bez rozmazania, co świadczy o tym, że rura odprowadzająca wodę z wanny jest szczelna (brak przecieków wody). Strzałki wskazują miejsca wykonania termogramów



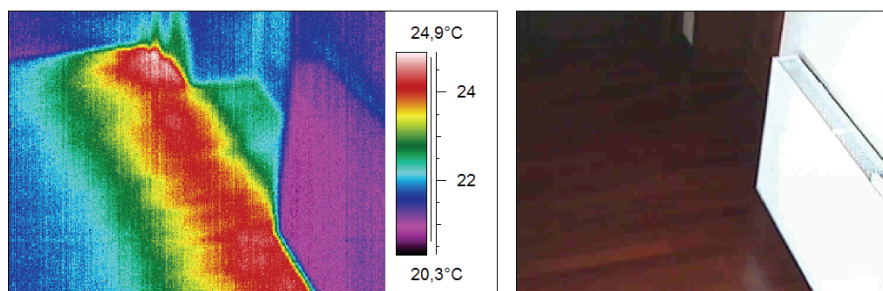
Rys. 6.98. Przykład termograficznej inspekcji awarii instalacji centralnego ogrzewania podłogowego. Termogram wskazuje miejsce awarii instalacji ogrzewania (podwyższona temperatura podłogi) (a), po wykonaniu odkrywki we wskazanym przez kamerę miejscu potwierdzono awarię instalacji (b)



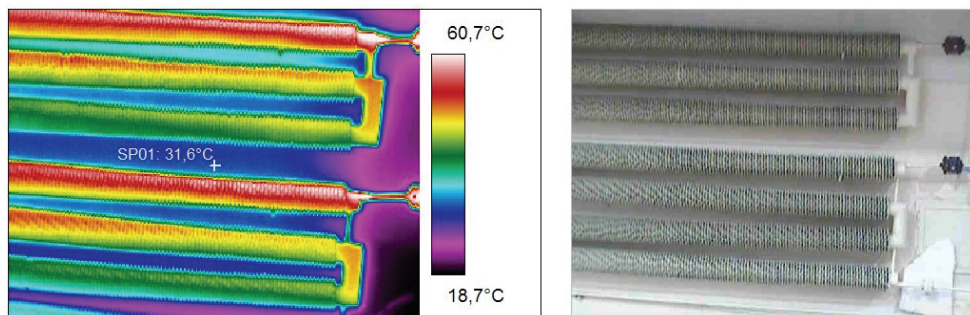
Rys. 6.99. Próba lokalizacji awarii instalacji ciepłej wody w ścianie pomieszczenia WC lokalu mieszkalnego: a) termogram fragmentu ściany, b) widok na ścianę po prawej stronie umywalki. Przed pomiarami przez kilka minut spuszczano ciepłą wodę. Na termogramie widoczny jest rozkład temperatury na powierzchni ściany w miejscu przebiegu rury odprowadzającej wodę z umywalki – rozkład temperatury jest wyraźne liniowy, bez rozmazania, co świadczy o tym, że rura odprowadzająca wodę z umywalki jest szczelna (brak przecieków wody). Strzałki wskazują miejsca przebiegu rury



Rys. 6.100. Przykład kontroli poprawności działania grzejników centralnego ogrzewania – badanie równomierności rozkładu temperatury na powierzchniach grzejników w trakcie rozruchu instalacji



Rys. 6.101. Przykład badania przebiegu instalacji centralnego ogrzewania w budynku bez dokumentacji technicznej



Rys. 6.102. Przykład analizy termicznej poprawności działania instalacji centralnego ogrzewania w hali laboratoryjnej – termogram wskazuje na nierównomierność działania instalacji c.o.

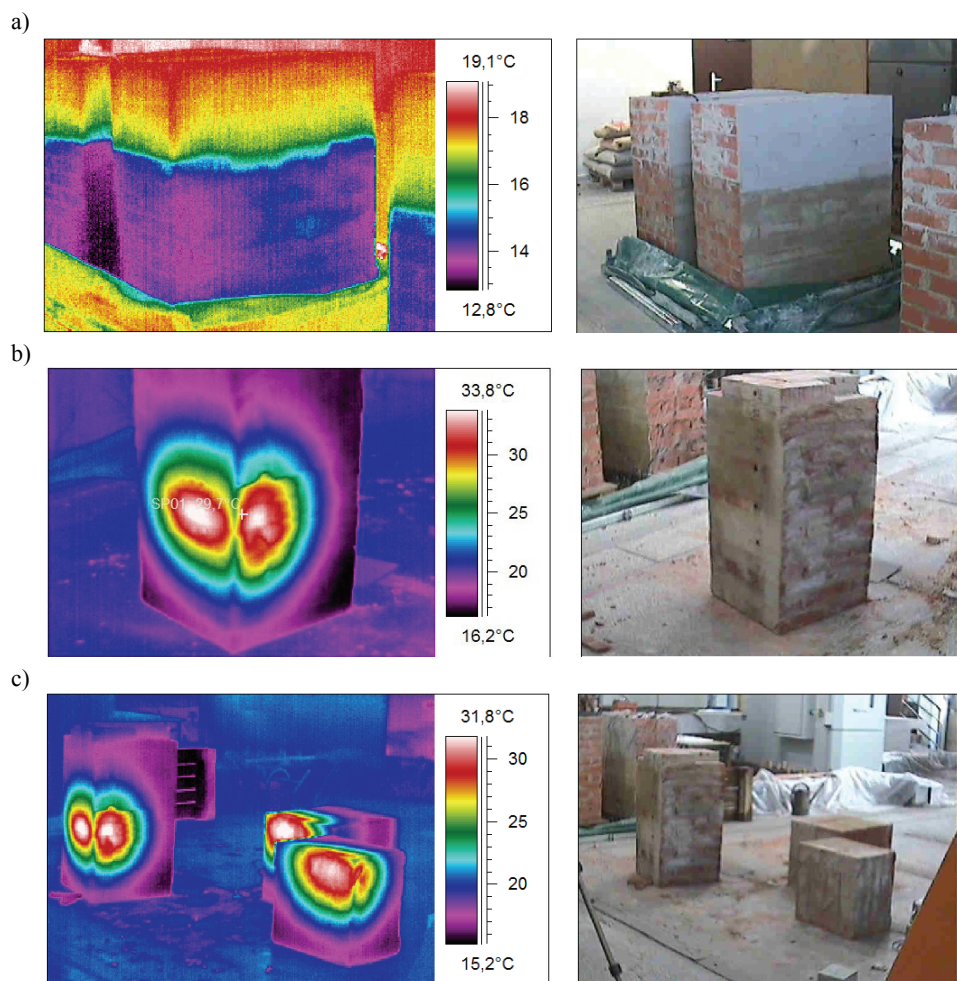
6.7.8. Przykłady różne

W poprzednich rozdziałach wskazano typowe możliwości zastosowania kamery termowizyjnej do badań w budownictwie. Kamera termowizyjna może być wykorzystana do dosyć specyficznych badań przedstawionych w tym rozdziale. Odrębność badań w tym przypadku wynika ze sporadycznego wykonywania pomiarów w zakresie przedstawionym poniżej.

Zawilgocone mury ceglane – weryfikacja badawcza metod osuszania murów

Jednym z podstawowych celów badań termowizyjnych, obok identyfikacji jakości izolacji cieplnej w przegrodach budowlanych i infiltracji zimnego powietrza do budynku, jest lokalizacja zawilgocenia przegród. Klasyczne badania termowizyjne w tym zakresie sprowadzają się do wykonywania pomiarów w budynkach lub w innych obiektach budowlanych i do wskazania zawilgoconych miejsc i zasięgu zawilgocenia – temperatura powierzchni zawilgoconych elementów jest niższa od pozostałych fragmentów przegród.

Zawilgocenie przegród budowlanych jest jednym z najbardziej destrukcyjnych czynników powodujących znaczne zmniejszenie ich wartości użytkowych, pogorszenie stanu technicznego i trwałości. Wilgoć zawarta w materiale wywołuje jego korozję biologiczną i chemiczną, destrukcję fizyczną i mechaniczną, zmniejsza opór cieplny, a w konsekwencji powoduje znaczne szkody i straty gospodarcze. Wilgotne przegrody budowlane, wysychając do wnętrza budowlanych, powodują wzrost wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, co z kolei sprzyja zjawisku kondensacji powierzchniowej i rozwojowi grzybów pleśniowych, które pogarszają warunki użytkowe pomieszczeń (groźne są zwłaszcza zarodniki pleśni, które unoszą się w powietrzu, które wdychamy). Ponadto pod wpływem wody większość materiałów zmienia swoje



Rys. 6.103. Przykładowe wyniki termowizyjnych badań muru ceglanego poddanego stałemu procesowi nawilgocenia i następnie intensywnego suszenia: a) termogram muru zawilgoconego do połowy wysokości, b) termogram muru tuż po nagrzaniu liniowym w wywierconym otworze, c) termogram muru tuż po nagrzaniu oraz dla porównania muru przełamanego tuż po nagrzaniu. Celem badań było opracowanie metody szybkiego suszenia zawilgoconych murów ceglanych ([57], termogramy Autora)

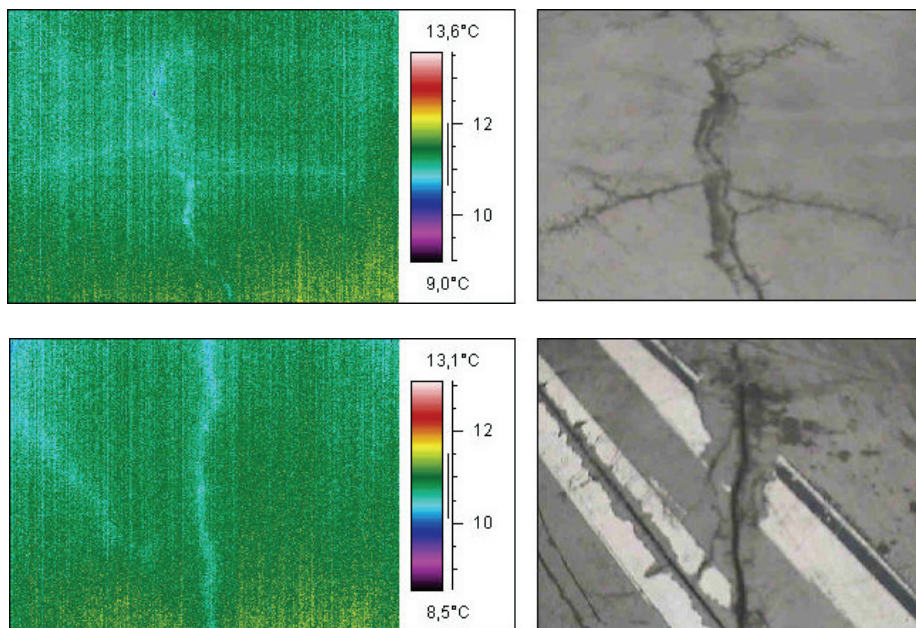
właściwości. Obecność grzybów pleśniowych oraz nadmierna wilgotność przegród budowlanych i powietrza w pomieszczeniach może być przyczyną licznych zachorowań (choroby reumatyczne, choroby nosa, gardła, bóle głowy itp.) oraz powodować liczne negatywne skutki mechaniczne, fizyczne i chemiczne. Bardzo istotne jest stosowanie skutecznych metod osuszania przegród budowlanych i pomieszczeń.

Istnieje kilka podstawowych i sprawdzonych od wielu lat metod osuszania przegród budowlanych i pomieszczeń, które skutecznie są stosowane w różnego rodzaju

budynkach, głównie zabytkowych. Jednocześnie jednak trwają prace badawcze nad udoskonalaniem istniejących metod osuszania budynków. W tym przypadku, jako jedną z metod wspomagających te badania, może być zastosowana technika badań termograficznych. Na rysunku 6.103 przedstawiono przykładowe termogramy z badań laboratoryjnych zawilgoconych murów i prób ich osuszania [57].

Badania płyty dennej garażu w pasażu handlowym

Pomiary termowizyjne są również bardzo pomocne jako wspomagające narzędzie badawcze w nieniszczących badaniach posadzek o różnym przeznaczeniu, ulegających destrukcji w wyniku intensywnej eksploatacji. W takich przypadkach termogramy są niezastąpionym uzupełnieniem tradycyjnych metod nieniszczących badań posadzek, umożliwiających ustalenie przyczyn występujących destrukcji oraz umożliwiających zaproponowanie stosownych zaleceń zleceńodawcy [55].

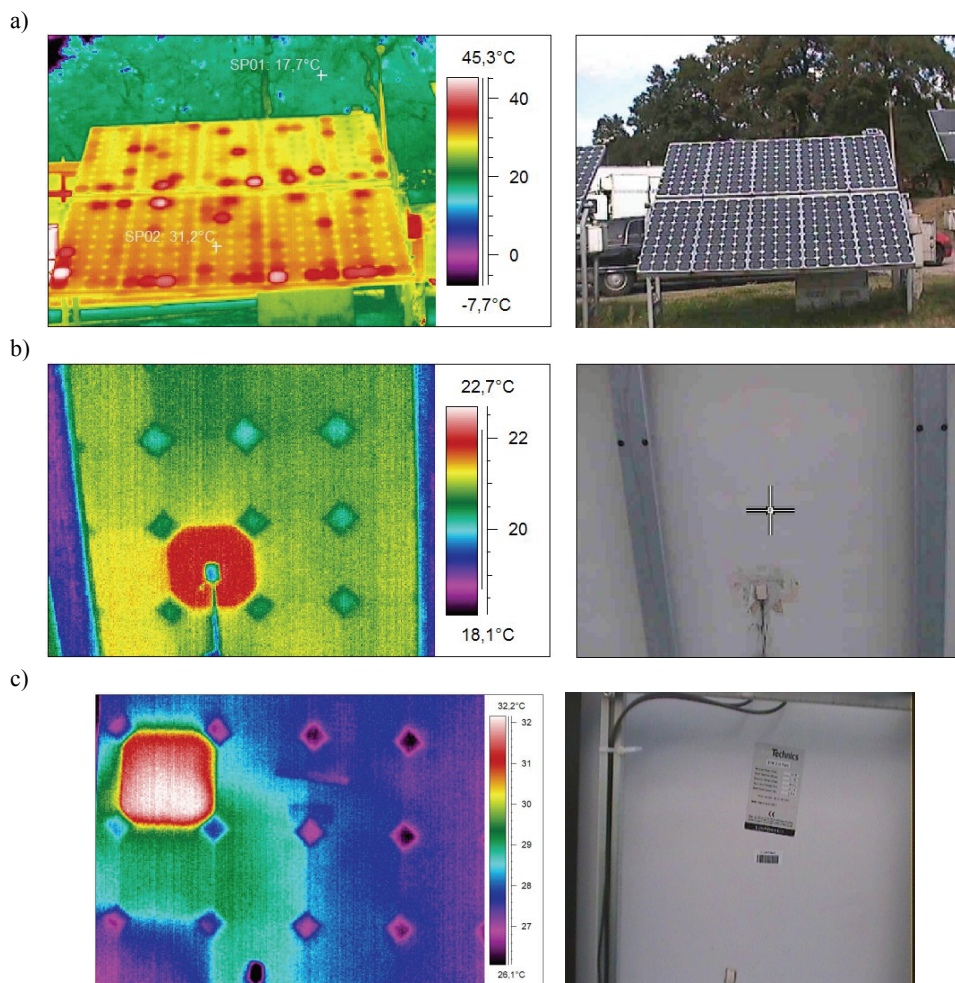


Rys. 6.104. Przykładowe termogramy powierzchni uszkodzonej posadzki w garażu pasażu handlowego [55]

Badania paneli fotowoltaicznych (PV)

Panele fotowoltaiczne (PV) konwertują energię promieniowania słonecznego na energię elektryczną, z możliwością wykorzystania na potrzeby użytkowników. Za-

montowane na obudowie budynku mogą tworzyć fotowoltaiczne nadwieszenie zacięniające zintegrowane z budynkiem (tzw. BIPV – ang. *Building Integrated Photovoltaics*), wspomagające energetyczny bilans budynku w skali roku [189], [190]. Zastosowanie technologii BIPV bardzo dobrze wpisuje się w niezmiernie ważny i aktualny problem oszczędności energii oraz poprawy efektywności energetycznej budynków użyteczności publicznej, z zastosowaniem pasywnych i aktywnych systemów pozy-



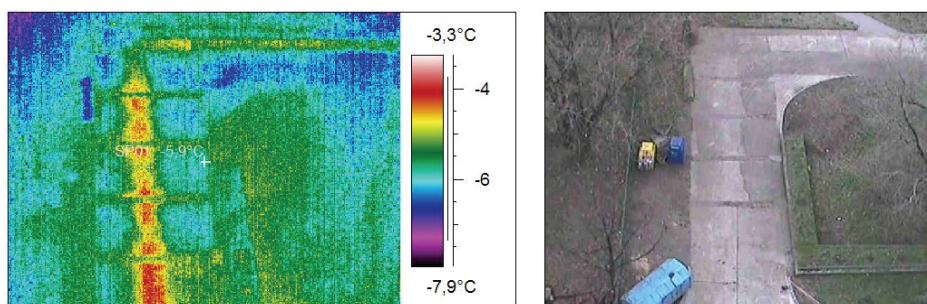
Rys. 6.105. Przykładowe wyniki termowizyjnych badań paneli fotowoltaicznych (PV), stosowanych w budynkach: a) widok ogólny paneli na stanowisku pomiarowym z pokazaniem rozkładu temperatury na roboczych powierzchniach paneli podczas generowania prądu elektrycznego z energii promieniowania słonecznego, b) i c) termogramy paneli PV od strony tylnej. Interpretacja termogramów w tym przypadku należy oczywiście do elektronika

skiwania energii promieniowania słonecznego na potrzeby kształtowania bilansu energetycznego budynków w skali roku.

Przed wdrożeniem do stosowania moduły fotowoltaiczne są badane w różnym zakresie między innymi w warunkach użytkowania. Przykładowe termogramy paneli pokazano na rysunku 6.105 (badania własne).

Sieci ciepłownicze

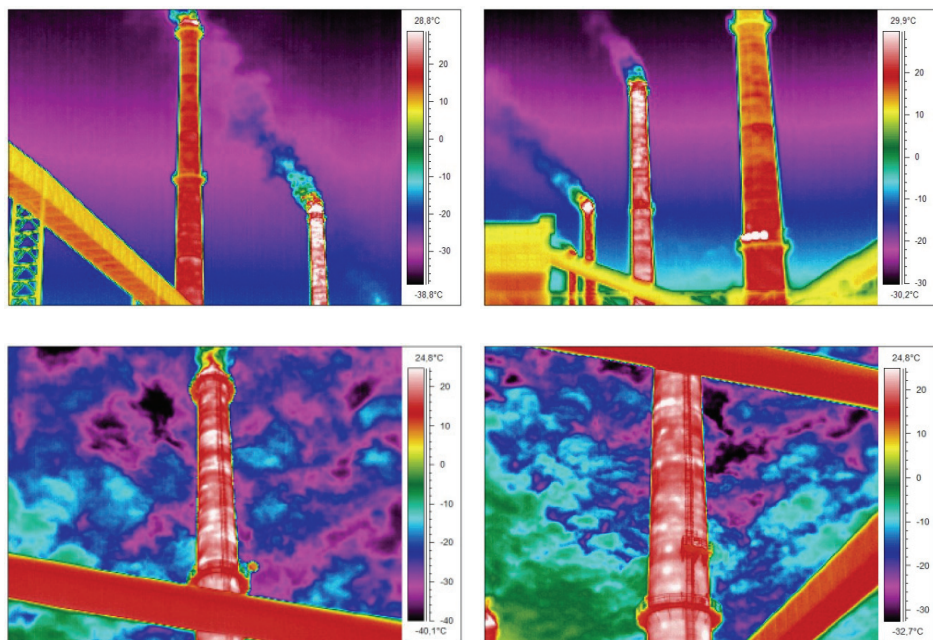
Metoda badań termograficznych jest bardzo skuteczna w identyfikacji przebiegu podziemnych rur sieci ciepłowniczych w przypadku, gdy nie dysponujemy dokumentacją techniczną. Pomiary w tym przypadku powinny być wykonywane z góry z sąsiadujących budynków lub metodą termografii lotniczej (rozdz. 6.7.10, patrz również rys. 6.127).



Rys. 6.106. Termogram powierzchni gruntu z pokazanym przebiegiem podziemnych rur sieci ciepłowniczej

Kominy przemysłowe

Klasycznymi przykładami badań obiektów przemysłowych są wysokie kominy ceglane, żelbetowe lub stalowe. Nowszej generacji kominy żelbetowe najczęściej są wykonywane jako trójwarstwowe: od strony przewodu spalin jest cegła szamotowa o grubości 11,4 cm, następnie jest izolacja cieplna w postaci wełny mineralnej o grubości 12–14 cm, a na zewnątrz płaszcz żelbetowy o zmiennej grubości na wysokości komina (od ok. 18 cm, poprzez 30 do nawet około 70 cm przy cokole). W wyniku eksploatacji komina wełna mineralna często ulega osiadaniu bądź kondensacyjnemu zawilgoceniu (przy przechodzeniu spalin przez nieszczelności w wewnętrznej obudowie z cegły szamotowej, przez izolację cieplną z wełny mineralnej do zimnej powierzchni płaszcza żelbetowego), co z kolei działa destrukcyjnie na komin. Metoda termograficzna jest bardzo przydatna w regularnym monitorowaniu stanu izolacji



Rys. 6.107. Przykłady termogramów kominów przemysłowych, wykazujących defekty w ich powłoce zewnętrznej – cieplejsze miejsca na zewnętrznej powierzchni kominów wskazują na brak (osunięcie) lub zawilgocenie izolacji z wełny mineralnej, zlokalizowanej między cegłą szamotową (11,4 cm) od wewnątrz i płaszczem żelbetowym zewnętrznym o zmiennej grubości na wysokości kominu. Systematyczne monitorowanie kominów przemysłowych umożliwia wczesne podjęcie decyzji o naprawie w początkowym etapie ich eksploatacji [142]

cieplnej i okładzin kominów przemysłowych oraz do identyfikacji miejsc wymagających remontu we wczesnym stadium powstawania defektów (rys. 6.107).

Badania termowizyjne najczęściej potwierdzają defekty występujące w płaszczu żelbetowym badanego komina, objawiające się zróżnicowanym rozkładem temperatury na powierzchni zewnętrznej. W przypadku gdyby płaszcz komina nie wykazywał defektów, temperatura jego powierzchni zewnętrznej byłaby jednorodna, stabilna i bez zakłóceń termalnych. Główną przyczyną występowania różnicy temperatury na zewnętrznej powierzchni komina najczęściej jest osiadanie wełny mineralnej, znajdującej się między cegłą szamotową, stanowiącą okładzinę wewnętrzną komina i zewnętrznym płaszczem żelbetowym (czyli lokalne braki wełny mineralnej w płaszczu komina).

W Polsce występuje jeszcze inny problem, a mianowicie większość kominów przemysłowych została wykonana 20–50 lat temu i nie były one projektowane na obecne parametry spalin. Aktualnie obowiązują wyższe standardy ochrony środowiska i dążenie do podwyższania efektywności energetycznej obiektów przemysłowych, co uzyskuje się poprzez modernizację i podnoszenie wydajności kotłów energetycznych,

stosowanie konwencjonalnych paliw wzbogaconych biopaliwami czy też wprowadzanie do układów odprowadzania spalin wysokowydajnych urządzeń odpylających, odsiarczania spalin itp. W konsekwencji obniża się temperatura spalin i wzrasta ich wilgotność, co często powoduje przekroczenie kwaśnego punktu rosy i wykraplanie się bardzo agresywnych substancji chemicznych na wewnętrznej wymurówce komina, obniżających trwałość komina. Badania termowizyjne, obok obserwacji wizualnych i badania próbek materiałów konstrukcyjnych, są skuteczną metodą oceny stanu technicznego i monitorowania kominów przemysłowych. Należy je wykonywać zgodnie z przedstawionymi zasadami wykonywania pomiarów (rozdz. 6.3.5), najkorzystniej w nocy przy całkowicie zachmurzonym nieboskłonie oraz odpowiednio interpretować termogramy (rozdz. 6.6).

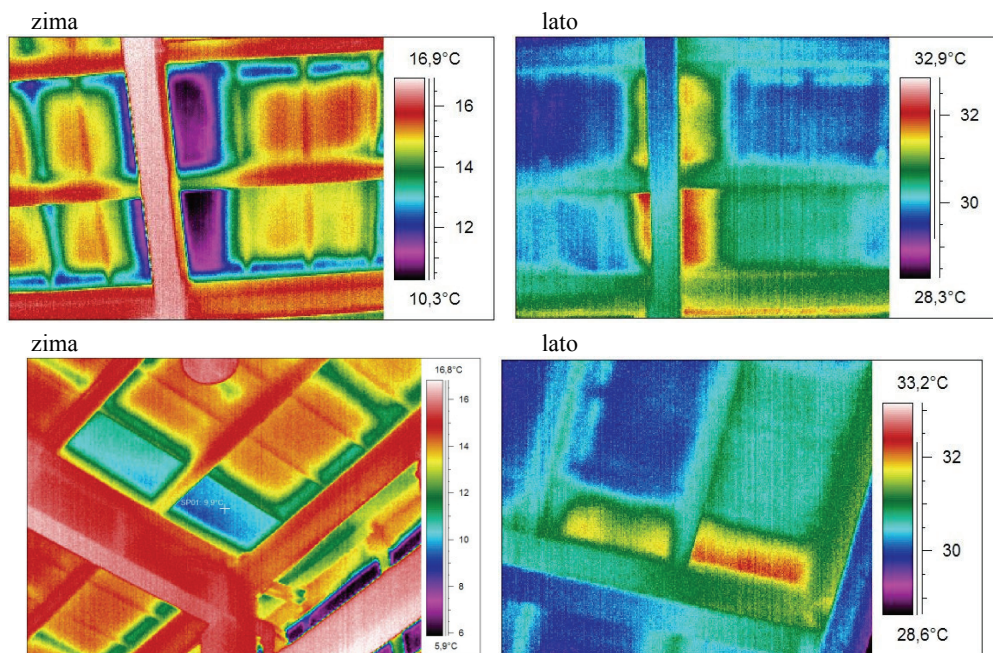
W przypadku badań obiektów o przekroju kołowym (kominy, chłodnie kominowe, silosy, bunkry itp.) pojawia się problem pomiarowy związany z zależnością współczynnika emisyjności badanej powierzchni od kąta patrzenia kamery (przypomnijmy, współczynnik emisyjności dla dielektryków zmienia się wraz z kątem padania promieniowania, rys. 4.10). Nasuwa się naturalne pytanie – z co najmniej ilu stanowisk pomiarowych należy wykonywać badania obiektów o przekroju kołowym, aby wyeliminować błędy pomiarowe związane z krzywizną badanej powierzchni, a w domyśle z zależnością wartości współczynnika emisyjności od kąta padania promieniowania. Pytanie to można sformułować jeszcze inaczej – jaką powierzchnię walca (cylindra) można bezpiecznie obserwować przy stałej emisyjności badanej powierzchni? Można wykazać [94], że przy bardzo dużej odległości d kamery termowizyjnej w stosunku do promienia R badanego komina $d \gg R$, a tak w praktyce przebiegają badania termograficzne kominów, długość krzywizny s komina, którą możemy bezpiecznie analizować przy stałej emisyjności powierzchni (bez zależności kątowej), wynosi $s \approx 1,75 R$ (połowa cylindra jest równa $3,14 R$). W praktyce oznacza to, że kominy przemysłowe należy badać z wzajemnie prostopadłych czterech kierunków głównych (co 90°), o ile jest to możliwe z uwagi na zabudowę najbliższego otoczenia badanego komina. Zaleca się, aby dodatkowo wykonywać pomiary kontrolne z kierunków pośrednich.

Ponadto bardzo ważny jest kąt patrzenia kamery termowizyjnej w pionie na badany obiekt – kąt ten nie powinien przekraczać 45° .

Badania termowizyjne dachów i stropodachów w lecie

Badania termowizyjne budynków ogrzewanych powinny być wykonywane w okresie zimowym, zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdziale 6.3.5. W ostatnim okresie w polskiej prasie technicznej pojawiły się publikacje sugerujące, że przegrody lekkie typu połacie dachowe czy też stropodachy o stosunkowo niewielkiej masie mogą być również skutecznie badane w okresie letnim. Należy jednak jednoznacznie podkreślić, że badania termowizyjne przegród w budynkach ogrzewanych powinny

być wykonywane w sezonie ogrzewczym, czyli w zimie, z powodu bardziej stabilnych zewnętrznych warunków temperaturowych. Badania termowizyjne w lecie, z uwagi na dosyć duże wahania temperatury powietrza zewnętrznego i w pomieszczeniach oraz zbyt małą masę termiczną połaci dachowych i stropodachów, absolutnie nie mogą być podstawą do wyciągania wniosków oceniających jakość wykonania izolacji cieplnej czy też do rozstrzygania sporów między inwestorem i wykonawcą. Natomiast mogą być wykonywane w celach dydaktyczno-szkoleniowych, co pokazano na rysunku 6.108.



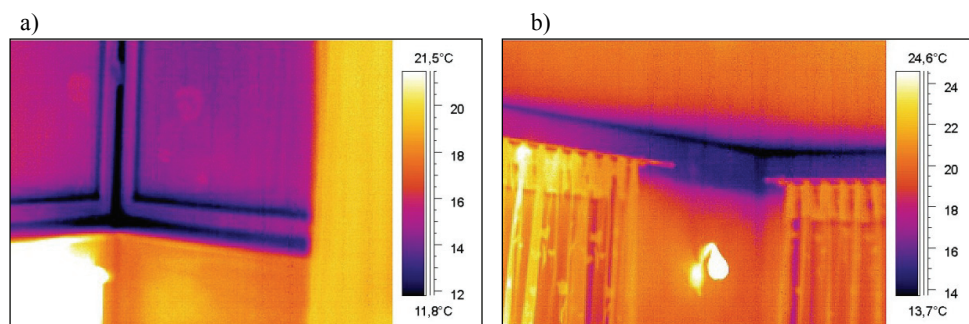
Rys. 6.108. Przykłady termogramów powierzchni od strony pomieszczenia nieocieplanego stropodachu pełnego ogrzewanej hali laboratoryjnej, wykonane w zimie oraz w lecie (patrz zakres temperatury na skali temperatury termogramów). Obraz termalny powierzchni stropodachu od strony pomieszczenia w lecie jest oczywiście „odwróceniem” rozkładu temperatury dla okresu zimowego [142]

6.7.9. Jak nie należy wykonywać badań termowizyjnych

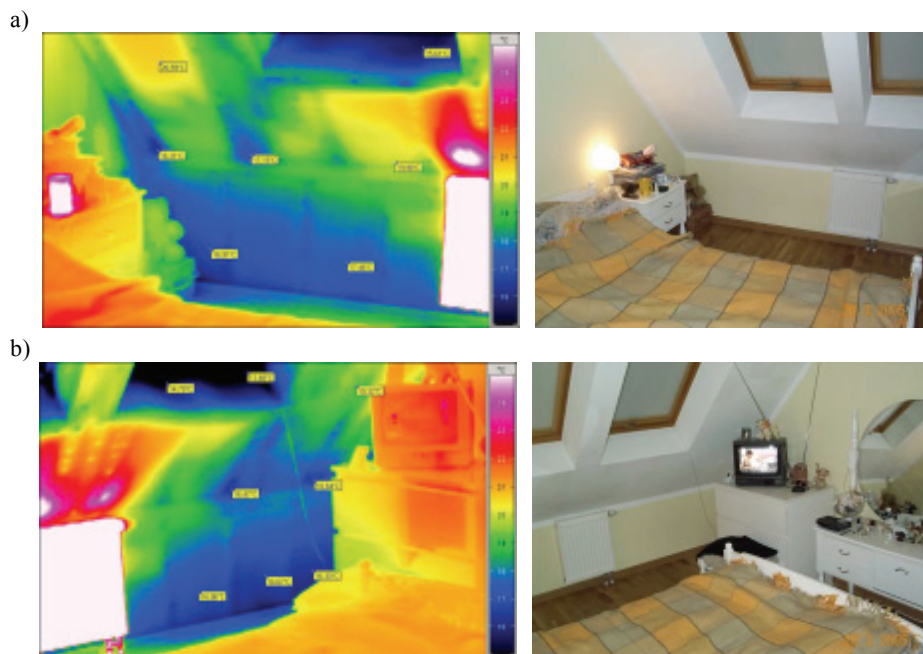
Podczas wykonywania badań termowizyjnych w budownictwie należy bezwzględnie przestrzegać procedury oraz zasady przeprowadzania tych pomiarów, co szczegółowo omówiono w rozdziale 6.3.4 i 6.3.5. Natomiast w tym rozdziale, na rysunkach 6.109–6.111, pokazano wybrane przykłady świadomie źle wykonanych termogramów, z odpowiednim komentarzem. Termogramy ścian na rysunkach 6.109 i 6.110 były wykonane w sytuacji obejmowania przez obiektyw kamery intensywnych źródeł ciepła, które zakłócały pomiar (rozgrzane grzejniki, palące się żarówki, włączony telewizor).

zor). Natomiast na rysunkach 6.111 pokazano przykład termogramu ściany zewnętrznej celowo wykonanego pod niewłaściwym kątem patrzenia kamery.

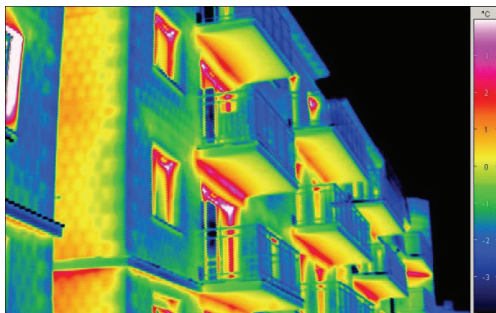
Przedstawione termogramy te są termogramami szkoleniowo-dydaktycznymi Auto-
ra [142].



Rys. 6.109. Termogramy wykonane od strony pomieszczenia – niedopuszczalne jest wykonywanie pomiarów w miejscach z rozgrzanym grzejnikiem c.o. (a) i włączonym oświetleniem ściennym (b), które zaburzają pomiar



Rys. 6.110. Termogramy wykonane od strony pomieszczenia – niedopuszczalne jest wykonywanie pomiarów w miejscach z gorącym grzejnikiem c.o. i włączonym oświetleniem (a) i w miejscach z gorącym grzejnikiem i włączonym telewizorem (b)



Rys. 6.111. Termogram jednolitej ściany zewnętrznej z pustaków ceramicznych szczelinowych, wykonany od strony zewnętrznej pod celowo źle dobranym kątem patrzenia na ścianę osłonową (za ostry kąt patrzenia kamery) – ściana przesunięcia jest wyraźnie cieplejsza od ściany osłonowej, która na termogramie jest wyraźnie zimniejsza, co mogłoby sugerować różną izolacyjność cieplną w różnych miejscach całej ściany. Zróżnicowanie temperatury tych ścian wynika wyłącznie z niewłaściwego kąta pomiarowego w odniesieniu do ścian z oknami. Widoczne są również mostki cieplne na styku płyt balkonowych ze ścianą, nieizolowane węgariki okienne oraz widać siatkę spoin zaprawy

6.7.10. Termografia lotnicza

Bardzo interesującą i nadal przyszłościową odmianą termowizyjnych badań budynków jest tzw. „termografia lotnicza” (ang. *aerial thermography*), wykonywana z helikoptera lub z małego samolotu, służąca do badania stropodachów i dachów budynków, głównie do lokalizacji zawilgocenia izolacji cieplnej. Przegrody te są dosyć specyficzne, jeżeli chodzi o badania od strony zewnętrznej, z uwagi na ich małe kąty pochylenia. Badania połaci dachowych dachów stromych oczywiście nie można wykonywać z poziomu terenu ze względu na niekorzystną wartość „kąta patrzenia” kamery na połac dachową oraz na zależność kątową wartości współczynnika emisyjności powierzchni zewnętrznej pokrycia (rozdz. 4.4.2). Jedynie badania wykonywane z pewnej wysokości dają pełny obraz termalny badanej zewnętrznej powierzchni dachu lub stropodachu.

Termografia lotnicza, podobnie jak badania tradycyjne, ma swoje korzenie w zastosowaniach wojskowych, a jej zalety dostrzeżono niemal od samego początku stosowania termowizji do pomiarów budynków. Literatura tematu jest dosyć obszerna, pierwsze artykuły w tym zakresie pojawiły się w Stanach Zjednoczonych pod koniec lat 70. ubiegłego stulecia (Schmer i inni 1979 [163], Burch 1980 [22], Treado i inni 1981 [182]). Badania te dotyczyły zarówno identyfikacji zawilgocenia izolacji cieplnej (Tobiasson 1988 [181]), badań dachów i sieci ciepłowniczych (Ljunberg 1987 [82]), jak i badań ilościowych (Goldstein 1978 [44]). Z początkiem lat 80. ubiegłego stulecia przeprowadzono badania poziomu zaizolowania cieplnego stropodachów (Scott i inni 1982, [164]) oraz określono najbardziej korzystne warunki meteorolo-

giczne, jakie powinny występować podczas tego typu badań (Evans 1981 [35]). W ostatnim okresie możliwości techniczne tej metody pomiarowej znacznie się rozszerzyły, między innymi dzięki wprowadzeniu nawigacji GPS (Stockton 2006 [171]).

Obecnie ten rodzaj badań, oprócz badań stropodachów i dachów budynków, jest wykorzystywany w wielu dziedzinach, w tym między innymi do:

- monitorowania przemieszczania się zanieczyszczeń w jeziorach i morzach, monitorowania wycieków ropy i wód gruntowych, obiegu ciepłej wody w elektrowniach i chłodniach kominowych, monitorowania awarii rurociągów sieci miejskiej i zasięgu wycieków,
- poszukiwania i przeliczania zwierząt,
- monitorowania aktywności geotermalnej,
- monitorowania pożarów lasów, składowisk torfu, drewna i węgla oraz pożarów podziemnych,
- monitorowania energetycznych sieci przesyłowych,
- prowadzenia akcji ratunkowych i pościgowych,
- monitorowania granic państwowych itp.

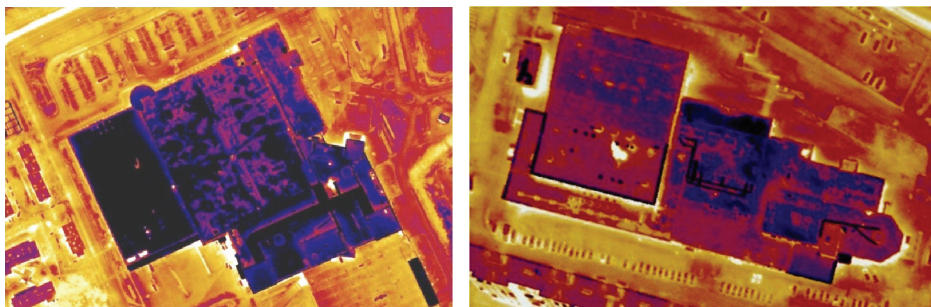
Stropodachy są specyficznymi przegrodami budowlanymi z uwagi na wieloletnie oddziaływanie na ich powierzchnię zewnętrzną dużej różnicy temperatury powietrza (od około -30°C do około $+80^{\circ}\text{C}$), wiatru, natężenia promieniowania słonecznego i długofalowego promieniowania atmosfery oraz opadów atmosferycznych. W wyniku oddziaływania tych czynników często dochodzi do przecieków i zawilgocenia izolacji cieplnej. Specyfika stropodachów przekrywających pomieszczenia ogrzewane lub całorocznie chłodzone polega na tym, że znaczna ich część absorbuje wodę opadową poprzez przecieki zewnętrznego pokrycia dachowego, najczęściej nie wykazując przy tym przecieków od strony pomieszczeń. Proces ten może trwać dosyć długo, do momentu pojawienia się przecieków wilgoci od strony pomieszczeń. Stąd regularne inspekcje zewnętrznej powierzchni stropodachu kamerą termowizyjną mogą już na wstępnym etapie pojawienia się zawilgocenia izolacji cieplnej spowodować prace remontowe i uchronić pozostałą część izolacji przed degradacją.

Termografia lotnicza służy głównie do identyfikacji przecieków, nieszczelności i niepożądanego infiltracji powietrza oraz miejsc zawilgocenia izolacji cieplnej w stropodachach i dachach stromych (w połaciach dachowych). W tym przypadku nie ma znaczenia jak woda opadowa dostaje się do wnętrza dachu – zasadniczym celem badań termowizyjnych jest zlokalizowanie i udokumentowanie miejsc występowania zawilgocenia izolacji cieplnej. Ta informacja jest najważniejsza dla właściciela obiektu, który powinien zareagować odpowiednimi działaniami konserwatorsko-remontowymi.

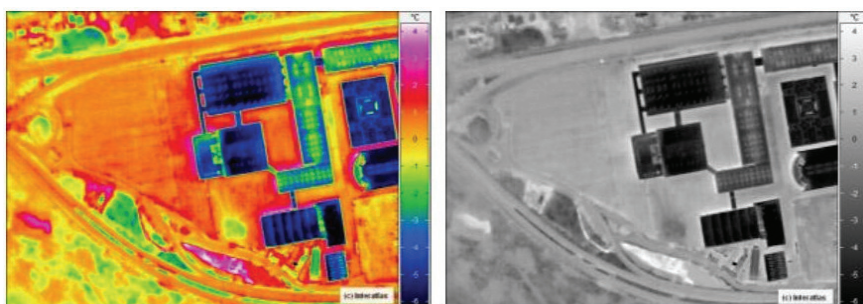
W ciągu dnia promieniowanie słoneczne nagrzewa całą powierzchnię stropodachu i dachu, w tym również miejsca zawilgocone. Po zachodzie słońca (i oczywiście w sposób ciągły w czasie dnia) nagrzana powierzchnia emituje własne promieniowanie cieplne, tj. zwrotne promieniowanie cieplne ku atmosferze. Ponieważ ciepło wła-

ściwe wody ma największą wartość ($4,19 \text{ (kJ/(kg}\cdot^{\circ}\text{C))}$), po zachodzie słońca i w nocy zawilgocone obszary są najcieplejsze, co obrazują termogramy wykonane z pewnej wysokości nad badaną powierzchnią (rys. 6.112–6.114).

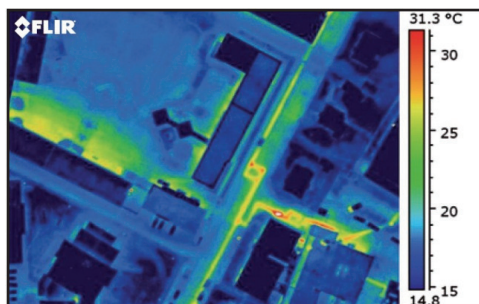
W trakcie badań stropodachów metodą termografii lotniczej mogą pojawić się problemy związane z występowaniem powierzchni o zbyt dużym współczynniku reflek-



Rys. 6.112. Przykładowe wyniki badań termowizyjnych stropodachów hal, wykonanych z helikoptera [172]



Rys. 6.113. Przykładowe wyniki badań termowizyjnych stropodachów hal, wykonanych z helikoptera (termogram kolorowy i w skali szarości) [173]



Rys. 6.114. Przykład zastosowania termografii lotniczej do lokalizacji awarii sieci ciepłowniczej przebiegającej w gruncie [93]

syjności dla promieniowania ciepłego, powyżej 0,40 (tzn. o współczynniku emisyjności równym 0,60 i niższym) oraz gdy masa stropodachu jest zbyt duża, przez co nie są zauważalne zmiany w reemisji promieniowania ciepłego do atmosfery.

Pomiary termowizyjne stropodachów, służące do lokalizacji zawilgocenia izolacji cieplnej i nadmiernej infiltracji powietrza, mogą być wykonywane:

- z poziomu stropodachów (na stropodachach),
- za pomocą termografii lotniczej.

Badania dachów budynków metodą termografii lotniczej można wykonywać za pomocą helikopterów lub małych samolotów. Helikopter powinien być zastosowany w przypadku małej liczby obiektów badań i małych odległości między nimi. Wówczas naturalne problemy związane z wibracjami i z małą prędkością przelotu oraz z wysokimi kosztami badań mogą być równoważone przez możliwość zastosowania w tym przypadku kamery o małej rozdzielczości, np. 256×256 (ok. 65 000) pikseli. Jeżeli stosujemy mały samolot, operator kamery termowizyjnej powinien dysponować kamerą o wyższej rozdzielczości, co najmniej 512×512 (ok. 262 000) pikseli, ponieważ pomiary w tym przypadku są wykonywane z większej wysokości. Taka kamera pozwala na zachowanie tej samej rozdzielczości z odległości cztery razy większej, a ponadto ma większe pole widzenia (tzw. FOV, ang. *Field of View*). Oczywiście pomiary zarówno z helikoptera, jak i z małego samolotu wykonuje się kamerą na sztywno lub obrotowo zamocowaną do podłoża, a nie „z ręki”.

Pomiary termowizyjne metodą termografii lotniczej oczywiście wykonuje się zgodnie z zasadami wykonywania tradycyjnych pomiarów termowizyjnych (rozdz. 6.3.5), w tym między innymi przestrzegając zasadę wykonywania pomiarów w nocy, przy braku opadów atmosferycznych i przy małej prędkości wiatru. Z powodu wykonywania badań w nocy, zarówno pilot jak i operator kamery termowizyjnej, muszą być odpowiednio przeszkoleni do wykonywania pomiarów w takich utrudnionych warunkach. W każdym przypadku, zarówno helikopter, jak i mały lekki samolot muszą być wyposażone w precyzyjny system GPS sprzężony z prędkościomierzem oraz z kamerą video. Kompleksowe wyposażenie techniczne powinno być nieustannie pod nadzorem odpowiednio przygotowanych i doświadczonych pilotów oraz operatorów kamer termowizyjnych. Ponieważ zarówno pilot, jak i operator kamery termowizyjnej w czasie pomiarów są bardzo zajęci, istotne jest bezawaryjne działanie systemu sekwencyjnego rejestrowania obrazów widzialnych i w podczerwieni w sprzężeniu z systemem GPS. Oczywiście jest, że pomiary nocne wymagają profesjonalnego przygotowania pilotów, którzy w nocy powinni latać nisko i wolno nad obiektami badań. Badania budynków za pomocą termografii lotniczej powinny być poprzedzone dziennym przelotem rozpoznawczym.

Badania lotnicze są bardziej użyteczne i mają przewagę nad badaniami wykonywanymi z poziomu stropodachów, ponieważ:

- obejmują dużą powierzchnię badań i pozwalają na lokalizację mniejszych różnic temperatury powierzchni stropodachu,

- badania z relatywnie dużej wysokości i w kierunku zbliżonym do normalnego oraz pod różnymi kątami do badanej powierzchni zmniejszają ewentualne problemy ze znacznym odbijaniem promieniowania cieplnego od badanej powierzchni,
- jest to metoda zdecydowanie szybsza i efektywna, a przy sprzyjających warunkach pogodowych pozwala na przebadanie wielu stropodachów w ciągu nocy,
- termogramy, filmy wideo, zdjęcia w zakresie widzialnym oraz rysunki AutoCAD całej powierzchni stropodachu są bardzo przydatne do precyzyjnej lokalizacji zawilgocenia izolacji cieplnej,
- raport z badań, w zależności od potrzeb, może być opracowany na różnym poziomie szczegółowości, z wykorzystaniem filmów video, wydrukowanych termogramów, zdjęć, rysunków AutoCAD, itp. Termogramy ze zdjęciami w zakresie widzialnym, filmy wideo oraz rysunki AutoCAD mogą być prezentowane oddzielnie (rys. 6.115),
- w razie potrzeby rysunki AutoCAD mogą być wykorzystane do precyzyjnego zaznaczenia na stropodachu miejsc zawilgocenia izolacji cieplnej stropodachu,
- przy cyklicznych badaniach stropodachów możliwe jest przewidywanie trendu zmian w czasie stopnia zawilgocenia izolacji cieplnej,
- może być stosowana do badania stropodachów i dachów o złożonej budowie, np. wielopoziomowych.

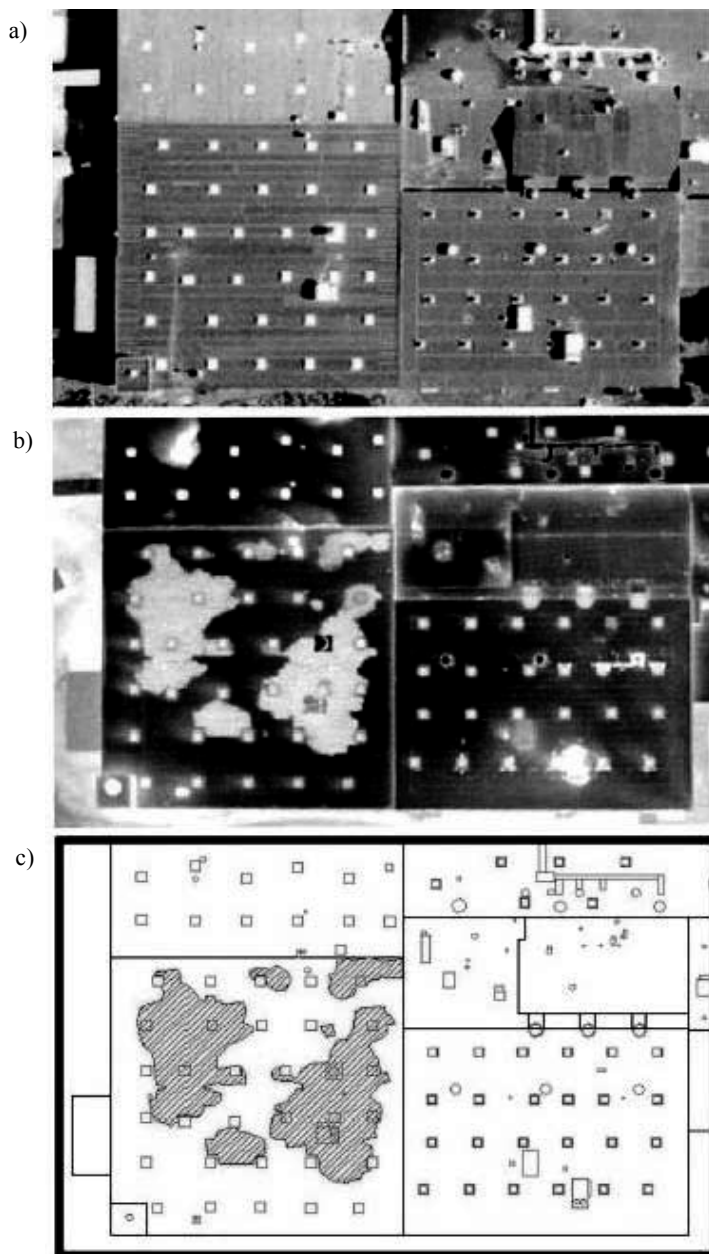
Prawdopodobnie największą przewagą termografii lotniczej w stosunku do termografii klasycznej, tj. wykonywanej z poziomu stropodachu, nie jest zastosowanie jej do identyfikacji dobrze zdefiniowanych (rozpoznanych) powierzchni z zawilgoconą izolacją cieplną, ale możliwość wykonywania pomiarów stropodachów trudnych do zbadania, np. z dużą liczbą dodatkowych urządzeń w postaci instalacji, kominów wentylacyjnych itp., które uniemożliwiają prawidłowe wykonanie pomiarów z poziomu stropodachów.

Na rysunku 6.115 pokazano przykładowe wyniki pomiarów stropodachu wykonanych z helikoptera.

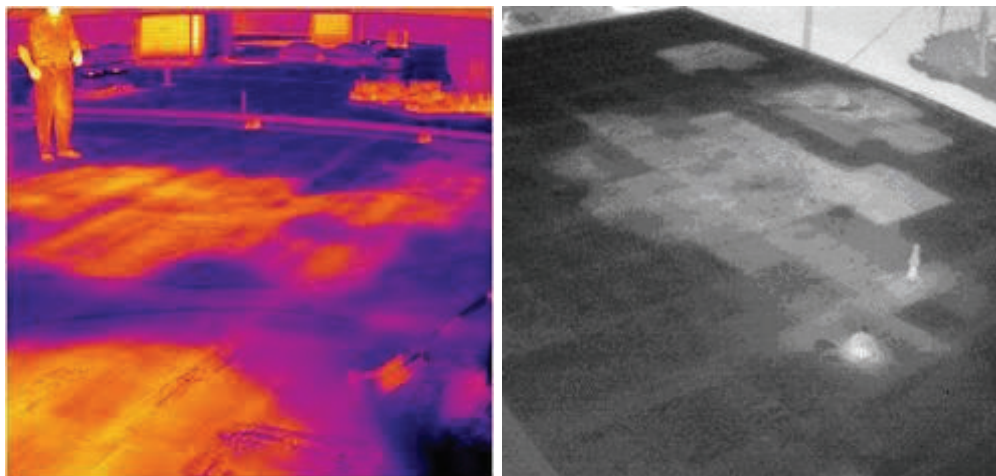
Mimo wykazanych korzyści ze stosowania termografii lotniczej, najczęściej wykonywane są jednak pomiary z poziomu stropodachów (rys. 6.116), ponieważ:

- ten rodzaj pomiarów jest zdecydowanie tańszy,
- wprawdzie jest znacznie wolniejszy w porównaniu z termografią powietrzną, ale równie skuteczny,
- oznaczenie miejsc zawilgoconych można wykonać w trakcie pomiarów.

Tego typu badania powinny być wykonywane za pomocą najnowocześniejszych, tj. najdroższych kamer. Należy również zaznaczyć, że tego typu obrazowanie termalne nie daje jednak tak użytecznych informacji, jak wyniki badań lotniczych.



Rys. 6.115. Przykładowe wyniki badań termowizyjnych stropodachu hali, wykonanych z helikoptera [172]: a) zdjęcie stropodachu, b) termogram w skali szarości, c) rysunek CAD z precyzyjną lokalizacją miejsc zawilgocenia izolacji cieplnej



Rys. 6.116. Przykładowe wyniki badań termowizyjnych stropodachów hal, wykonanych z poziomu stropodachu [93]

Zarówno w przypadku termografii lotniczej, jak i wykonywanej z poziomu stropodachu przed pomiarami lub następnego dnia należy wykonać zdjęcia badanych stropodachów, które powinny również być dołączone do raportu z badań.

Termograficzne badania lotnicze są specyficzne z uwagi na sposób przygotowania i realizacji oraz na opracowywanie i interpretację wyników badań. Stropodachy i dachy budynków są narażone na radiacyjne oddziaływanie „zimnego nieboskłonu” (na chłodzenie radiacyjne, rozdz. 5.2) w stopniu znacznie większym niż ściany zewnętrzne. To z kolei wymusza posiadanie przez operatora kamery termowizyjnej znacznie większej wiedzy i doświadczenia pomiarowego do prowadzenia badań w takich warunkach. Natomiast cały proces przygotowawczy do badań i opracowanie raportu z badań przebiegają podobnie jak w przypadku klasycznych badań.

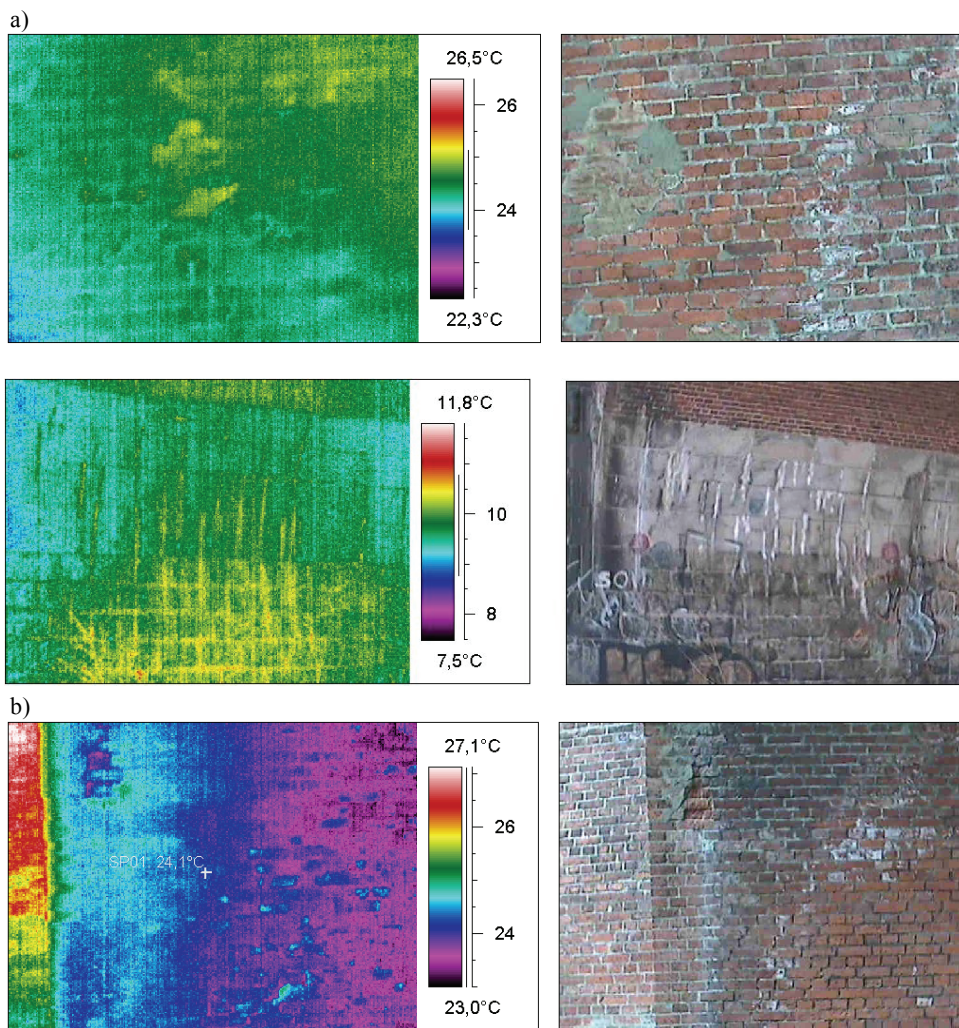
W Polsce, z uwagi na specyfikę tej metody badawczej oraz przede wszystkim na wysokie koszty realizacji, metoda termografii lotniczej praktycznie nie jest stosowana.

6.7.11. Badania obiektów mostowych

Badania termowizyjne służą również do nieinwazyjnej inspekcji różnych obiektów inżynierskich [2], w tym drogowych i kolejowych obiektów mostowych, do których zalicza się: mosty, wiadukty, estakady i kładki dla pieszych, do badania wzmacniania ich konstrukcji taśmami węglowymi typu CFRP (ang. *Carbon Fibre Reinforcement Polymer*) oraz do badania nawierzchni dróg na tych obiektach.

Obiekty mostowe są specyficznymi konstrukcjami, ponieważ stawia się im bardzo wysokie wymagania w zakresie niezawodnego i długoletniego użytkowania z jedno-

czesnym zapewnieniem pełnego bezpieczeństwa użytkowania, co wynika z ich roli w sprawnym działaniu systemu transportowego. Obiekty mostowe, podobnie jak każde inne obiekty budowlane, w wyniku długoletniego użytkowania i oddziaływania czynników destrukcyjnych z czasem ulegają uszkodzeniom i degradacji technicznej. W celu utrzymania odpowiedniego stanu technicznego mostów, niezbędne jest stosowanie właściwych metod badawczych, związanych z wykrywaniem, identyfikacją i klasyfikacją procesów degradacji i uszkodzeń obiektów mostowych [19].



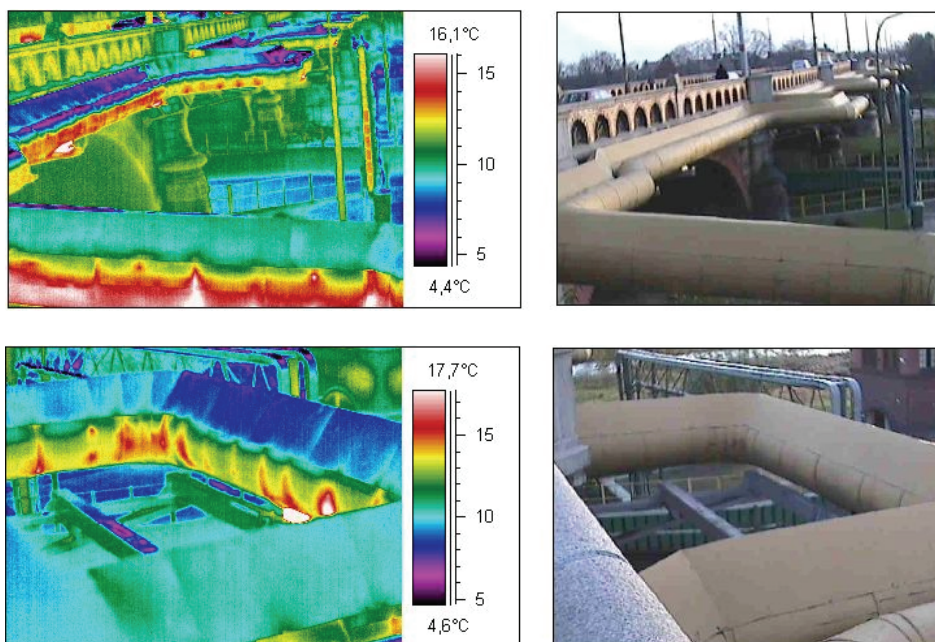
Rys. 6.117. Termogramy fragmentów sklepieniowego mostu ceglano: a) lokalizacja zawilgocenia konstrukcji, b) lokalizacja przypowierzchniowych ubytków cegieł i zawilgocenia konstrukcji [142]

W inżynierii mostowej wyróżnia się dwie podstawowe grupy metod badawczych, a mianowicie [19]: metody stosowane niezależnie od obciążeń działających na obiekt (metody nieniszczące, w tym metoda termowizyjna oraz metody nieznacznie inwazyjne, sprowadzające się najczęściej do pobierania próbek) oraz metody stosowane w trakcie badań obiektów pod obciążeniem, tj. badania przy zaprojektowanych i kontrolowanych statycznych i dynamicznych obciążeniach próbnych oraz badania w losowo zmieniającym się obciążeniem eksploatacyjnym.

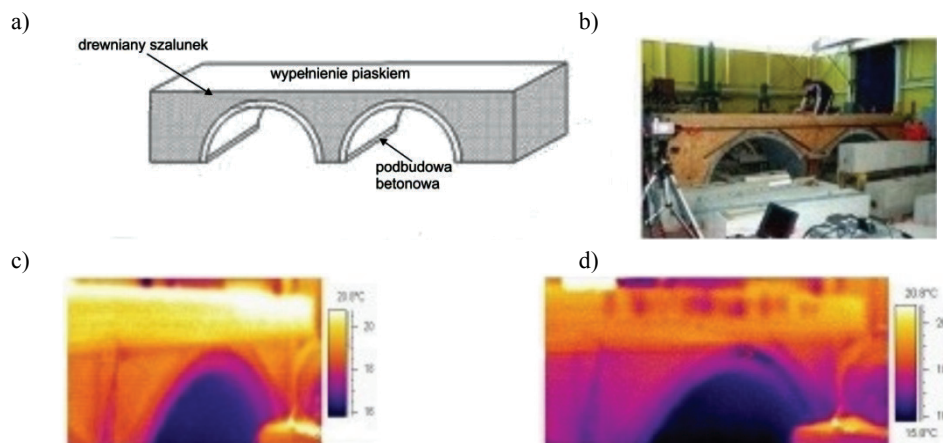
W diagnostycznych badaniach obiektów mostowych oprócz badań termowizyjnych stosuje się inne klasyczne metody badań nieniszczących NDT (ang. *Nondestructive Testing*), takie jak metody ultradźwiękowe, impulsowe, radarowe, laserowe, radiologiczne, magnetyczne, metodę emisji akustycznej itp. Klasyczną metodę termografii pasywnej w badaniach obiektów mostowych najczęściej wykorzystuje się do:

- lokalizacji zawilgoceń fragmentów obiektu (rys. 6.117),
- lokalizacji ubytków i nieciągłości materiału (najczęściej spękania i rozwarstwienia) w warstwach przypowierzchniowych (rys. 6.117),
- monitoringu stanu urządzeń usytuowanych na obiekcie, np. rurociągów ciepłowniczych (rys. 6.118).

Do badań mostów stosuje się również metodę termografii aktywnej, najczęściej metodę impulsową w trybie odbiciowym (patrz rozdz. 6.3.2), do lokalizacji zbrojenia



Rys. 6.118. Kontrolne badanie stanu izolacji cieplnej rurociągów ciepłowniczych zainstalowanych na moście [142]



Rys. 6.119. Stanowisko pomiarowe do termowizyjnego badania modelu mostu ceglanego: a) rysunek aksymetryczny i wymiary modelu badanego mostu, b) widok modelu dwuprzęsłowego mostu ceglanego, c) termogram mostu niezawilgoconego, d) termogram mostu zawilgoconego (na podstawie [26])

w mostach żelbetowych, do lokalizacji ewentualnego rozwarstwienia materiału w warstwach przypowierzchniowych oraz do sprawdzania jakości połączenia (identyfikacja nieciągłości połączenia) między wzmacniającymi taśmami węglowymi CFRP (*Carbon Fibre Reinforcement Polymer*) a konstrukcją.

Badania termowizyjne mogą być również wykorzystywane do badania modeli mostów pod kątem oceny skuteczności metody termowizyjnej do wykrywania i lokalizacji zawilgocenia konstrukcji. Na rysunku 6.119a i b przedstawiono, odpowiednio, wymiary modelu mostu oraz wykonany model mostu ceglanego (część nad sklepieniami została wypełniona piaskiem), zastosowanego do badania skuteczności metody termowizyjnej do identyfikacji różnego stopnia zawilgocenia konstrukcji [26]. Natomiast na rysunku 6.119c i d pokazano termogramy modelu, odpowiednio, bez zawilgocenia oraz modelu zawilgoconego [26].

Opisane badania laboratoryjne metodą termografii pasywnej potwierdziły skuteczność metody termowizyjnej do lokalizacji zawilgocenia konstrukcji obiektów mostowych, co również potwierdziły badania Autora na obiektach rzeczywistych (rys. 6.117) (w pracy [1]).

Bardzo często istniejące obiekty mostowe (również sklepienia ceglane i belki żelbetowe) na skutek upływu czasu tracą swoje właściwości wytrzymałościowe i dlatego nierzadko zachodzi potrzeba identyfikacji istniejącego stanu konstrukcji metodą nieniszczącą przed jej wzmocnieniem. Kontrolę istniejącego stanu konstrukcji metodą nieniszczącą można przeprowadzić między innymi za pomocą termografii aktywnej w trybie odbiciowym. Istotą tego badania jest nagrzewanie w sposób impulsowy badanej powierzchni źródłem ciepła o dużej mocy rzędu kilku kW i rejestracja termogramów za pomocą kamery termowizyjnej podczas dynamicznej zmiany stanu ter-

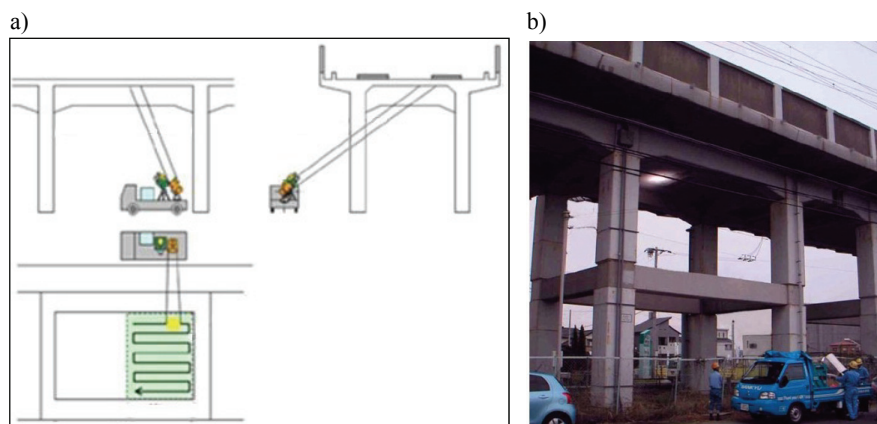
micznego tej powierzchni w czasie jej stygnięcia. Na podstawie sekwencji otrzymanych termogramów można wnosić o występujących defektach w konstrukcji do głębokości od 30 do 50 mm [77]. Badanie termowizyjne (termografia aktywna) jest lepszą alternatywą dla konwencjonalnej metody inwentaryzacji obiektu budowlanego, polegającej na szczegółowej analizie elementów konstrukcji powiązanej często z jej uszkodzeniem (odkrywką) bądź też pozostawieniem widocznych śladów na obiekcie.

Metoda termografii aktywnej do badania przypowierzchniowych defektów żelbetowych konstrukcji inżynierskich została zweryfikowana w badaniach laboratoryjnych [86], [87] i zastosowana do badania stanu konstrukcji żelbetowych obiektów mostowych [6], [77]. Na rysunku 6.120 przedstawiono stanowisko badawcze przy wiadukcie żelbetowym, natomiast na rysunku 6.121 przykładowe wyniki pomiarów kamerą termowizyjną fragmentu wiaduktu [77].

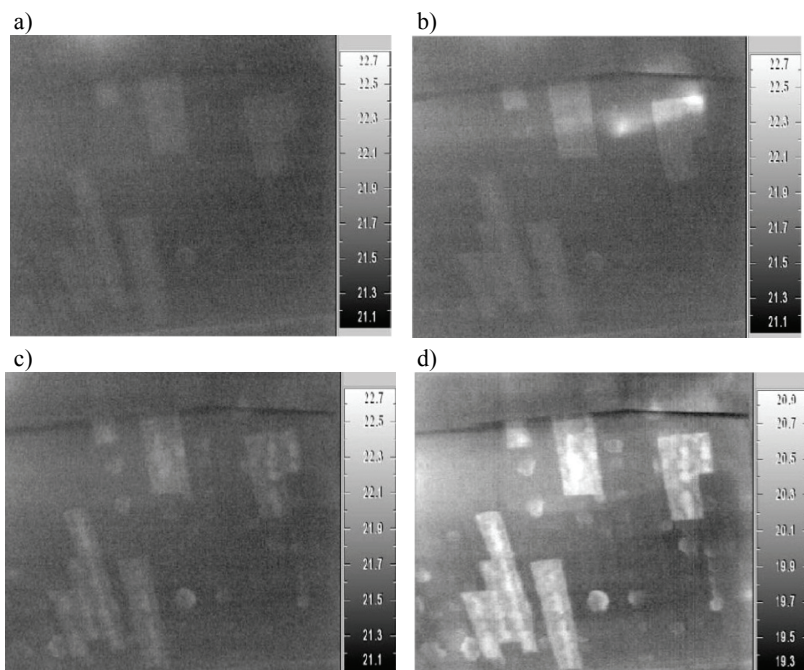
Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność metody termografii aktywnej w trybie odbiciowym do identyfikacji uszkodzeń elementów żelbetowego wiaduktu, występujących do głębokości 30–50 mm [77].

Technika termografii pasywnej może być również zastosowana jako metoda nieniszcząca do wykrywania i lokalizacji ukrytych wad i uszkodzeń nawierzchni dróg i chodników mostów, łącznie z informacją o mechanizmie degradacji, jako wstępne narzędzie diagnostyczne uzupełniające metodykę badań docelowo wykorzystywaną do oceny stanu technicznego tych nawierzchni.

Ocena stanu nawierzchni dróg i chodników mostów jest skutecznym narzędziem w opracowaniu strategii zarządzania mostem (utrzymanie, odbudowa i/lub przebudowa), a zwłaszcza w przewidywaniu i zapobieganiu destrukcji nawierzchni. Badania termowizyjne w tym przypadku spełniają podwójną rolę, a mianowicie jako narzędzie



Rys. 6.120. Mobilne stanowisko pomiarowe żelbetowej konstrukcji wiaduktu żelbetowego: a) przekrój przez badany wiadukt z pokazaniem kierunku działania impulsowego źródła ciepła o mocy 6 kW na most, b) zdjęcie w trakcie prowadzonych badań (na podstawie [77])



Rys. 6.121. Termogramy badanej żelbetowej powierzchni wiaduktu: a) przed włączeniem impulsowego źródła ciepła, b) w czasie nagrzewania powierzchni, c) po 10 minutach od momentu rozgrzewania powierzchni, d) wynikowy termogram z 95 termogramów wykonanych w ciągu 950 sekund [77]

do oceny stanu bieżącego oraz poprzez kontrole okresowe do identyfikacji rozwoju i prędkości postępowania degradacji nawierzchni. W trakcie badań obiekt mostowy powinien być wyłączony z eksploatacji. W skład typowego zestawu do pomiaru stanu nawierzchni dróg i mostów wchodzi cztery podstawowe elementy [170]:

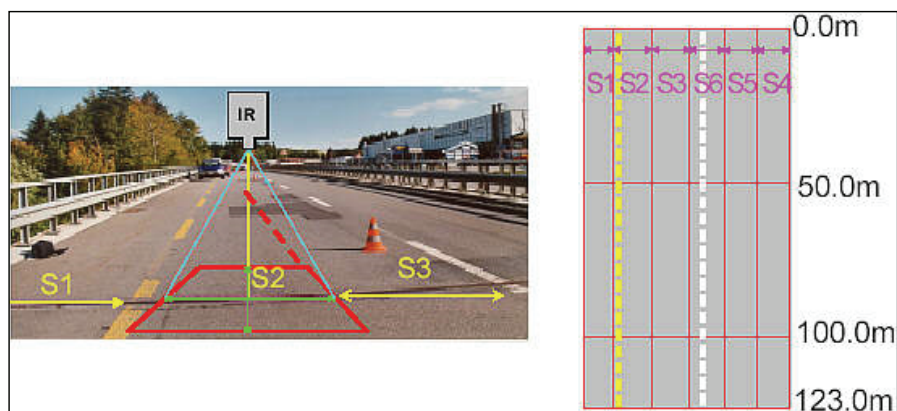
1. Kamera termowizyjna, zamontowana na specjalnym maszcie przymocowanym do samochodu terenowego, zamontowana na wysokości od 2 do 3,5 m.
2. System GPS, umożliwiający precyzyjną lokalizację systemu pomiarowego.
3. System sprzęgający kamerę termowizyjną, kamerę wideo oraz antenę GPS.
4. Samochód terenowy, na którym zamontowany jest system pomiarowy – w trakcie badań samochód porusza się z prędkością maksymalną nieco powyżej 10 km/h.

Naturalnie nie wszystkie uszkodzenia czy ukryte defekty w nawierzchni drogi i chodników mostowych, takie jak pęknięcia, mogą być zlokalizowane metodą termografii pasywnej. Ponadto tą metodą badawczą nie jest możliwe określenie głębokości uszkodzenia.

Ogólnie biorąc, te wady i/lub uszkodzenia, które generują zakłócenia w przepływie ciepła i zaburzają powierzchniowy rozkład temperatury nawierzchni, są wykrywane przez kamerę termowizyjną jako powierzchnie o podwyższonej temperaturze w po-



Rys. 6.122. Mobilne stanowisko pomiarowe nawierzchni dróg i chodników mostowych (po lewej stronie pokazano unowocześnione stanowisko pomiarowe, obecnie stosowane) [170]

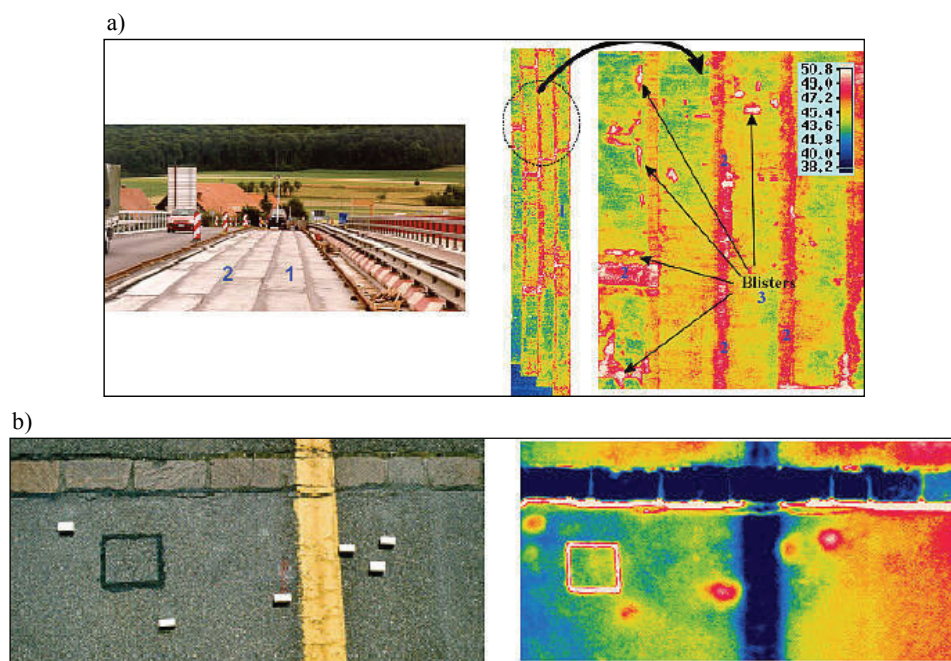


Rys. 6.123. Podział drogi mostowej na pasy pomiarowe [170]

równaniu z sąsiednimi powierzchniami. Dlatego pęcherze gazu, ubytki i rozwarstwienia materiału, które leżą w płaszczyźnie prostopadłej do przepływu ciepła, mogą być lokalizowane kamerą termowizyjną. Podobnie jak w przypadku budynków, termogramy nawierzchni dróg i mostów powinny być prawidłowo zinterpretowane, z uwzględnieniem warunków wykonywania pomiarów (głównie warunków meteorologicznych). Oczywiście wiele ciał obcych na nawierzchni drogi i chodników (plamy kolorowe lub plamy oleju, łaty naprawcze nawierzchni, cienie itp.) lub elementy konstrukcji pod

nawierzchnią (uszczelnienia, połączenia konstrukcyjne) mogą zniekształcać termogramy. Aby ominąć ten problem, można przeprowadzić porównanie termogramu ze zdjęciem badanej nawierzchni. Na rysunkach od 6.122 do 6.124 przedstawiono stanowisko badawcze i przykładowe wyniki pomiarów termowizyjnych [170].

Przedstawione badania potwierdziły, że termowizyjna metoda oceny stanu technicznego nawierzchni drogi i chodników mostu jest skutecznym narzędziem w diagnostyce i w systemie zarządzania obiektami mostowymi. Informacje uzyskane z badań na temat lokalizacji wad i uszkodzeń pozwalają na określenie skutecznych metod remontu i/lub ich odbudowy.



Rys. 6.124. Przykładowe wyniki badań termowizyjnych: a) termogram nie zakrytej membrany uszczelniającej, z pokazaniem potencjalnych miejsc uszkodzeń, b) przykładowe miejsca w nawierzchni drogi, które zostawiają ślady w obrazach w podczerwieni [170]

6.8. Zakres raportu termograficznego

Podsumowaniem badań termowizyjnych jest raport z badań, w którym, poza termogramami, powinny znaleźć się między innymi istotne informacje dla zleceniodawcy w postaci analizy i interpretacji termogramów, ustalenie przyczyn występujących nieprawidłowości oraz wnioski i zalecenia. W opracowywaniu raportu z badań bardzo przydatne jest doświadczenie w wykonywaniu ekspertyz budowlanych.

Na rynku dostępne są programy komputerowe umożliwiające przygotowanie raportu z termograficznych badań budynków lub innych obiektów budowlanych. Programy te zawierają zaawansowane narzędzia analityczne i pozwalają na kompleksową analizę i obróbkę termogramów, np. poprzez nanoszenie analizy pomiarowej, korektę obrazu termalnego poprzez zmianę palety kolorów i skali barw na termogramie, obliczanie temperatury na termogramie dla wybranych punktów, linii, obszarów, umożliwiają tworzenie histogramów temperatury, przedstawianie parametrów badanego obiektu i otoczenia podczas badań, dopisywanie komentarza do termogramów, zmianę zakresu temperatury, tworzenia termogramów typu „panorama” itp. Jednak tak utworzony raport jest tylko niepełnym sprawozdaniem z badań, ponieważ najczęściej nie daje możliwości zamieszczania istotnych informacji o badanym budynku (danych ogólnych o budynku, opisu technologii wykonania i konstrukcji budynku oraz materiałów wykończeniowych), pełnego opisu badań, rozmieszczenia stanowisk pomiarowych, uogólnienia wniosków, podsumowania oraz podania zaleceń. W związku z tym, zdaniem autora, raporty z badań termograficznych uzyskane za pomocą programów komputerowych mogą jedynie stanowić fragment (np. załącznik) właściwego raportu, którego układ i zawartość powinny być zbieżne z prawidłowo wykonaną ekspertyzą budowlaną.

Na bazie wieloletniego doświadczenia w wykonywaniu termowizyjnych badań budynków i raportów z tych badań, doświadczenia w wykonywaniu ekspertyz budowlanych oraz uwzględniając wskazania normy PN-EN13187 [217] w tym zakresie, Autor proponuje następujący zakres raportu z termowizyjnych badań budynków:

STRONA TYTUŁOWA – powinna zawierać informacje:

- nazwę zadania pomiarowego (z dokładnym adresem obiektu badań),
- dane dotyczące zleceniodawcy,
- nazwiska członków zespołu pomiarowego, ich uprawnienia zawodowe (budowlane, rzeczoznawcy, audytora i/lub certyfikatora energetycznego itp., z pieczętami i z podpisami,
- datę przekazania raportu zleceniodawcy.

1. WSTĘP

- *Przedmiot opracowania* – przedmiotem opracowania jest wykonanie badań termowizyjnych budynku, należy również podać adres i przeznaczenie budynku.
- *Cel i zakres opracowania* – w tym punkcie należy jednoznacznie sprecyzować i opisać cel badań oraz ich zakres (co oczywiście wpływa na czas realizacji, koszty badań i na pewne zobowiązania zleceniodawcy – te elementy powinny być precyzyjnie określone w umowie na wykonanie badań).
- *Podstawa opracowania* – należy wymienić wszystkie elementy, które stanowią podstawę opracowania:

- umowę na wykonanie badań (numer i dzień zawarcia umowy), w której między innymi należy jednoznacznie określić zakres prac, termin i koszty wykonania zlecenia oraz obowiązki zlecającego (np. dostarczenie dokumentacji technicznej budynku, udostępnienie pomieszczeń, zapewnienie zasilania kamery energią elektryczną itp.),
- częściową lub pełną dokumentację techniczną, wizje lokalne, badania termowizyjne, analizę i interpretację wyników badań (termogramów), analizę obliczeniową, własną dokumentację fotograficzną, informacje uzyskane od zlecającego i użytkowników budynku oraz aktualnie obowiązujące przepisy i normy budowlane w przedmiotowym zagadnieniu.

2. OGÓLNY OPIS TECHNICZNY BUDYNKU

- Dane ogólne – w tym rozdziale należy podać następujące dane:
 - adres budynku, jego przeznaczenie, rok budowy,
 - ogólny opis technologii wykonania budynku i układu konstrukcyjnego, rodzaj zastosowanych materiałów wykończeniowych na przegrodach budowlanych, charakter powierzchni przegród (chropowate, gładkie), rodzaj zastosowanych szyb w oknach (szyby zwykłe, niskoemisyjne, barwione w masie, szkło refleksyjne itp.),
 - opis wszystkich przegród budowlanych stanowiących termiczną obudowę budynku oraz opis i ocenę ich stanu technicznego,
 - w przypadku przeprowadzonych wcześniej remontów należy zamieścić ich krótki opis i zakres,
 - opis lokalizacji budynku na działce i najbliższego sąsiedztwa, orientację budynku względem stron świata,
 - dane ogólne dotyczące instalacji: ogrzewczej (źródło ciepła, instalacja c.o.), instalacji ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), kanalizacyjnej oraz wentylacyjnej itp.
 - wybrane dane inwentaryzacyjne budynku: powierzchnię zabudowy, całkowitą i użytkową, kubaturę całkowitą, kubaturę ogrzewaną.

3. OPIS WYSTĘPUJĄCYCH PROBLEMÓW – ten punkt występuje w raporcie w przypadku pojawienia się w budynku ewidentnych problemów ciepłno-wilgotnościowych (np. kondensacyjne zawilgocenie przegród, rozwój grzybów pleśniowych na powierzchni przegród w pomieszczeniach, itp. – należy wskazać te pomieszczenia) oraz problemów z wychładzaniem pomieszczeń.

4. TERMOWIZYJNE BADANIA BUDYNKU/ÓW:

- *Opis badań termowizyjnych* – ten rozdział powinien zawierać:
 - krótki opis termowizyjnej metody badawczej,

- podstawową specyfikację techniczną aparatury – ze wskazaniem producenta, modelu i numeru seryjnego oraz dokument poświadczający datę ostatniej kalibracji kamery termowizyjnej,
- datę i godziny badania,
- informację na temat temperatury powietrza zewnętrznego – przebieg w ciągu 2–3 dni przed pomiarami i w trakcie pomiarów termowizyjnych (najlepiej na wykresie), temperatura powietrza powinna być mierzona co 15–20 minut,
- informację na temat warunków meteorologicznych panujących w dniu pomiarów – informacja o warunkach nasłonecznienia na 12 godzin przed i podczas badań, informację o ewentualnych opadach atmosferycznych, o kierunku i prędkości wiatru podczas pomiaru, o różnicy ciśnienia powietrza po obu stronach przegród,
- informację o temperaturze powietrza wewnątrz budynku, mierzonej również co 15–20 minut,
- w przypadku gdy budynek nie jest jeszcze zasiedlony (np. badania przed odbiorem technicznym budynku), w umowie należy zawrzeć warunek o konieczności ogrzewania budynku do docelowej temperatury około 20 °C. W raporcie należy udokumentować przebieg temperatury powietrza w budynku na 2–3 dni przed pomiarami i w trakcie pomiarów,
- *Stanowiska pomiarowe* – na dołączonych rysunkach (plan sytuacyjny, rzuty poszczególnych kondygnacji) należy zaznaczyć i ponumerować:
 - kolejne stanowiska pomiarowe w czasie badania budynku od strony zewnętrznej i wewnętrznej,
 - numery kolejnych termogramów, każdy termogram powinien być oznaczony strzałką wskazującą kierunek patrzenia kamery,
 - odległość każdego stanowiska od budynku.

5. WYNIKI BADAŃ TERMOWIZYJNYCH – w tym rozdziale są przedstawiane wyniki pomiarów z komentarzem pod każdym termogramem lub w tekście (Autor stosuje zasadę dokładnego opisu i komentarza pod każdym termogramem). W celu jednoznacznej lokalizacji i identyfikacji termogramu, niezależnie od opisu stanowisk pomiarowych, zaleca się zamieszczanie obok siebie termogramu i zdjęcia fotograficznego badanego miejsca lub „termogramu w zdjęciu”. Do przedstawienia wyników pomiarów można wykorzystać programy komputerowe służące do przygotowywania raportów z badań lub wręcz ten raport. Osobno przedstawiamy:

- wyniki badań od strony zewnętrznej,
- wyniki badań od strony pomieszczeń.

W każdej z tych grup wyników badań zaleca się przedstawić:

- wyniki badań termicznej obudowy budynku pod kątem oceny izolacyjności cieplnej i identyfikacji mostków cieplnych,

- wyniki badań związanych z wykrywaniem zawilgocenia przegród,
- wyniki badań szczelności połączeń przegród.

Rozdział może również zawierać termogramy poddane zaawansowanej analizie specjalistycznymi programami komputerowymi.

6. ANALIZA I INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ – bardzo ważny, a być może najważniejszy, rozdział decydujący o ostatecznych rezultatach pomiarów termowizyjnych i stanowiący podstawę do końcowego wnioskowania i opracowania zaleceń dla zleceniodawcy. W analizie i interpretacji termogramów należy uwzględnić uwagi zawarte w rozdziałach od 6.4 do 6.6 oraz ewentualnie wyniki analizy numerycznej rozkładu temperatury w przekrojach mostków cieplnych.

7. PODSUMOWANIE, WNIOSKI I ZALECENIA – bardzo istotny rozdział dla zleceniodawcy, w którym zawarte jest podsumowanie badań, ustalenie przyczyn występujących nieprawidłowości, wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy oraz zalecenia. O ile to możliwe, wnioski należy pogrupować i przedstawić jako wnioski ogólne oraz szczegółowe. Bardzo istotne jest również podanie zaleceń, które umożliwią zleceniodawcy wyeliminowanie występujących nieprawidłowości oraz ich skutków.

ROZDZIELNIK (np. Zleceniodawca 3 egz., Autorzy 1 egz., Archiwum 1 egz.).

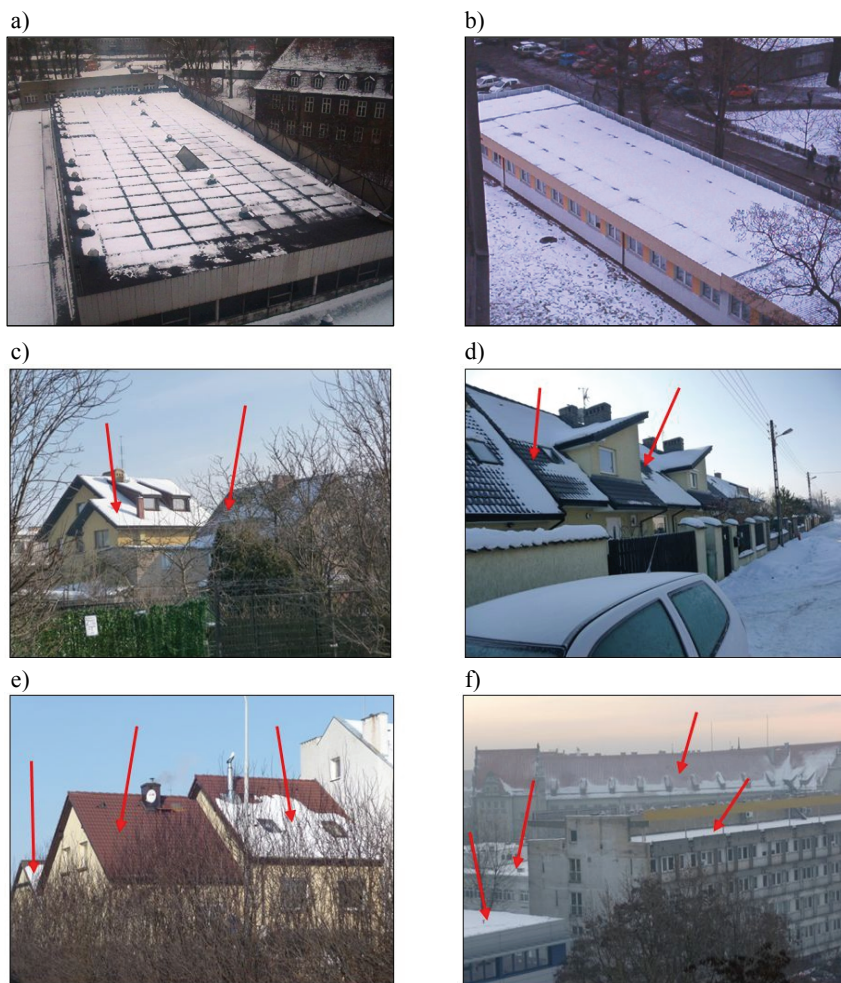
UWAGA: Do raportu z badań bezwzględnie powinien być załączony dokument potwierdzający ważność kalibracji kamery termowizyjnej (punkt 4).

Naturalnie przedstawiony proponowany układ i zakres raportu z termowizyjnych badań budynków może się zmieniać w zależności od specyfiki występujących w każdym przypadku problemów z zakresu ochrony cieplnej budynków i/lub mykologii budowlanej, od przeznaczenia, wielkości i liczby budynków oraz może też być inny w przypadku badania pojedynczego lokalu mieszkalnego.

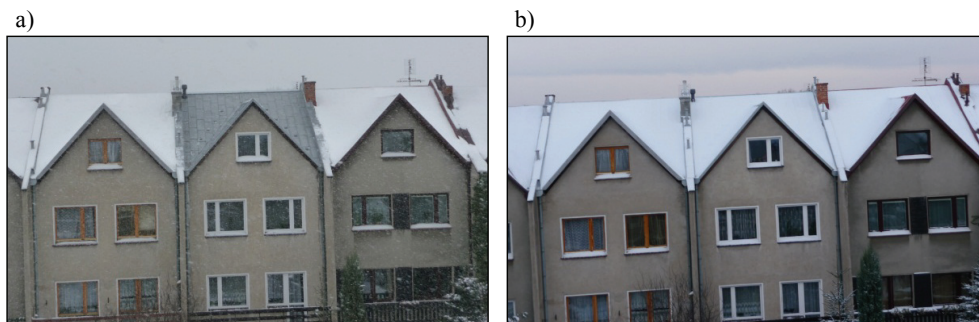
W przypadku wykonywania termowizyjnych badań budynków w sprawach spornych (w tym w sprawach sądowych) między inwestorem i wykonawcą lub między inwestorem, wykonawcą i projektantem, w układzie raportu końcowego do badań należy bezwzględnie wprowadzić rozdział o przykładowym brzmieniu „Wykaz dokumentów przekazanych przez zleceniodawcę” (np. punkt 2 w przykładowym, przedstawionym powyżej, układzie raportu z badań). w którym powinno się wymienić wszystkie przekazane dokumenty, stanowiące wraz z wynikami badań termowizyjnych podstawę wnioskowania końcowego. Ponadto należy również zamieścić rozdział, w którym po przeprowadzeniu badań termowizyjnych i analizie termogramów oraz dostarczonych dokumentów trzeba jednoznacznie odnieść się do dostarczonych dokumentów, co powinno mieć swoje odzwierciedlenie we wnioskach końcowych raportu.

6.9. Czy zawsze badania kamerą termowizyjną

Badania termowizyjne budynków służą przede wszystkim do jakościowej oceny stanu izolacyjności cieplnej przegród budowlanych. Do badań niezbędna jest oczywi-



Rys. 6.125. Przykłady zachowania się śniegu na stropodachach i połaciach dachowych, strzałkami zaznaczono miejsca charakterystyczne: a) przykład topnienia śniegu w miejscach klasycznych mostków termicznych na połączeniach żelbetowych płyt panwiowych nieocieplonego stropodachu żelbetowego nad ogrzewaną halą laboratoryjną, b) miejscowe topnienie śniegu na stropodachu nad pomieszczeniami biurowymi, c), d), e) topnienie śniegu na połaciach dachowych domów jednorodzinnych (strzałkami zaznaczono miejsca dobrze i źle zaizolowane), f) topnienie śniegu na dachu stromym nad pomieszczeniami ogrzewanymi, dla porównania pokazano zaleganie śniegu na stropodachach innych budynków, również nad pomieszczeniami ogrzewanymi



Rys. 6.126. Przykłady zachowania się śniegu na dachach domów jednorodzinnych w zabudowie szeregowej: a) wytopienie śniegu na nieocieplonym dachu środkowego domu, b) zaleganie śniegu na tym samym dachu w czasie następnej zimy, po ociepleniu połączenia dachowej

ście odpowiednia, ale jednocześnie droga aparatura, tj. kamera termowizyjna wraz z niezbędnymi przyrządami uzupełniającymi (rys. 6.2). Konieczne jest również spełnienie odpowiednich warunków przez operatora kamery, przede wszystkim musi on mieć odpowiednią wiedzę i doświadczenie pomiarowe.

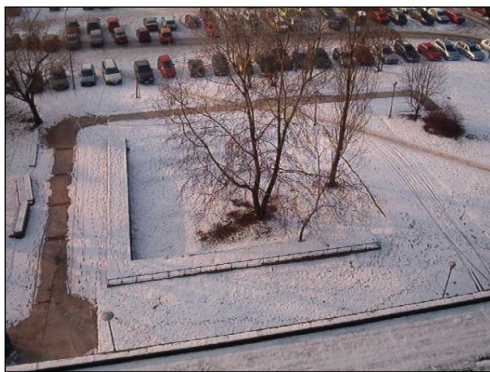
Nie zawsze jednak do jakościowej oceny izolacyjności termicznej przegród budowlanych należy stosować kamerę termowizyjną. W przypadku stropodachów pełnych lub połaci dachowych dachów stromych, przekrywających pomieszczenia ogrzewane, przybliżoną ocenę ich stanu izolacyjności cieplnej można przeprowadzić, obserwując zachowanie się śniegu leżącego na tych przegrodach, który w miejscach występowania mostków termicznych i w miejscach braku izolacji termicznej się topi. Podczas obserwacji śniegu zalegającego na stropodachach lub na połaciach dachowych, podobnie jak w trakcie badań termowizyjnych, powinniśmy mieć informacje o warunkach termicznych panujących w pomieszczeniach pod tymi przegrodami. Może się bowiem zdarzyć, że śnieg będzie zalegał na stropodachach i połaciach dachowych bez żadnych objawów występowania mostków cieplnych, w przypadku gdy pomieszczenia pod tymi przegrodami nie będą ogrzewane.

Na rysunkach 6.125 i 6.126 przedstawiono przykłady identyfikacji mostków cieplnych w stropodachach i źle zaizolowanych termicznie połaci dachowych poddaszy użytkowych.

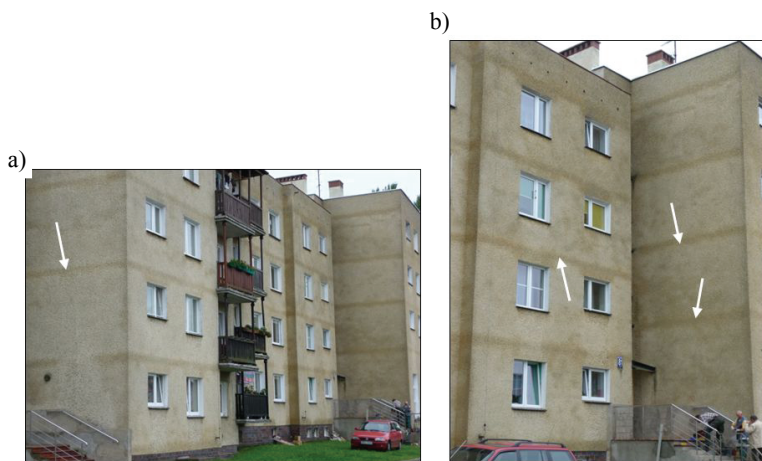
Topniejący śnieg na chodnikach i trawnikach może wskazywać przebieg rur sieci ciepłowniczej i wskazywać na jakość izolacji cieplnej tych rur (rys. 6.127).

Nieco nietypowym przykładem identyfikacji mostków cieplnych liniowych na elewacjach budynków może być obserwacja zachowania się nieocieplonej elewacji po zacinającym deszczu w lecie. Na rysunku 6.128 przedstawiono przykład elewacji budynku wielorodzinnego wykonanego w technologii tradycyjnej, z klasycznym tynkiem cementowo-wapiennym, w kilkanaście minut po ustaniu zacinającego deszczu w sierpniu. Widoczne są zawilgocenia tynku w miejscach wieńców żelbetowych, gdyż

woda deszczowa nie została jeszcze wchłonięta przez szczelny beton wieńców, a z tynku na poziomie wieńców jeszcze nie zdążyła odparować. Natomiast na pozostałej powierzchni ściany woda częściowo odparowała, a częściowo została wchłonięta przez tynk i ścianę, ściana sprawia wrażenie suchej. W tym przypadku nie ma potrzeby wykonywania szczegółowych obliczeń ciepłno-wilgotnościowych dla ściany zewnętrznej czy też badań termowizyjnych budynku w zimie, aby jednoznacznie zakwalifikować budynek do ocieplenia albo do przeprowadzenia kompleksowej termomodernizacji.



Rys. 6.127. Przykład topnienia śniegu zalegającego na gruncie nad źle zaizolowanymi rurami sieci ciepłowniczej



Rys. 6.128. Widok elewacji budynku wielorodzinnego wykonanego w technologii tradycyjnej, bez ocieplenia ścian zewnętrznych, w kilkanaście minut po zacinających opadach deszczu w sierpniu – widoczne są zaznaczone strzałkami zawilgocenia tynku na poziomie żelbetonowych wieńców stropowych, woda opadowa nie została jeszcze wchłonięta przez szczelny beton wieńców żelbetonowych i nie zdążyła odparować z tynku

6.10. Standaryzacja kwalifikacji zawodowych personelu termograficznego

Jak już wspomniano w rozdziale 1.2, w Polsce nie ma formalnych wymagań w odniesieniu do osób wykonujących badania termowizyjne w budownictwie na kształt stosownych zawodowych uprawnień budowlanych bądź odpowiedniego certyfikatu do wykonywania pomiarów. Z drugiej strony prawidłowe wykonywanie pomiarów termowizyjnych oraz właściwa interpretacja termogramów wymaga od osób je wykonujących odpowiedniej wiedzy zawodowej i doświadczenia pomiarowego (patrz rozdz. 1.2). Ponadto norma PN-EN 1387 [217] nie jest przywoływana w odpowiednich rozporządzeniach z zakresu budownictwa, co dowodzi, że nie jest obowiązująca w naszym kraju. W praktyce oznacza to, że badania termowizyjne może wykonywać każdy, kto ma dostęp do kamery termowizyjnej, ale niekoniecznie jest specjalistą w zakresie budownictwa. To z kolei często powoduje, że badania termowizyjne budynków często wykonują osoby do tego zupełnie nieprzygotowane od strony wiedzy teoretycznej, w tym od strony wiedzy w zakresie budownictwa ogólnego, fizyki budowli oraz wiedzy o wymianie ciepła przez przegrody budowlane, o energetycznym bilansowaniu budynków o różnym przeznaczeniu oraz o procedurach pomiarowych w tym zakresie. W praktyce oznacza to, że pomiary termowizyjne często wykonują osoby nieuczciwe w stosunku do zleceńodawców.

Przypomnijmy, aby wykonywać samodzielne funkcje w budownictwie, należy mieć tzw. uprawnienia budowlane (wykonawcze lub projektowe), uzyskiwane po co najmniej kilkuletnim wykonywaniu i nadzorowaniu odpowiedniego zakresu prac budowlanych i po zdaniu stosownych trudnych egzaminów w Izbach Budowlanych. Zasady uzyskiwania uprawnień zawodowych w budownictwie reguluje ustawa Prawo Budowlane. Przypomnijmy również, że np. certyfikaty energetyczne budynków (przepisy obowiązują od 2 stycznia 2009 r.) mogą wykonywać osoby legitymujące się odpowiednimi uprawnieniami krajowymi (ministerialnymi) w tym zakresie. Jeżeli natomiast chodzi o badania termowizyjne w budownictwie nie ma w naszym kraju odpowiadających stosownych wymagań.

Pierwszym krajem, w którym wprowadzono standaryzację kwalifikacji i certyfikację personelu wykonującego pomiary termowizyjne, były Stany Zjednoczone. W USA działania takie od roku 1989 prowadzi Amerykańskie Towarzystwo Badań Nieniszczących (ASNT – ang. *American Society for Non-destructive Testing*). Organizacja ta najpierw wprowadziła plan szkoleń, odpowiednie standardy egzaminacyjne, zestawy pytań [223] oraz procedury certyfikacji personelu [223]. Wprowadzono trzy poziomy szkolenia – poziom I, II i III, każdy po 40 godzin (każdy po 4 dni szkolenia). Najwyższy poziom III upoważnia do przygotowania programu badań termowizyjnych, przeprowadzania szkoleń oraz do egzaminowania potencjalnych operatorów kamer termowizyjnych na poziomie I i II. Oprócz organizacji ASNT, w Stanach Zjednoczonych

są również inne organizacje, które opracowały normy w zakresie badań termowizyjnych, a mianowicie: ANSI (ang. *American National Standards Institute*), ASTM (ang. *American Society for Testing and Materials*), ISO (ang. *International Standards Organization*), IEEE (ang. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), NETA (ang. *International Electrical Testing Association*) oraz NFPA (ang. *National Fire Protection Association*).

Największą na świecie organizacją specjalizującą się w szkoleniu, egzaminowaniu i przydzielaniu okresowych 5-letnich certyfikatów operatorom kamer termowizyjnych jest Infrared Training Center (ITC) z siedzibą w Bostonie. Przedstawicielstwa firmy znajdują się również w Ontario w Kanadzie oraz w Danderyd w Szwecji. Organizacja ta ma największą liczbę najlepiej wyszkolonych instruktorów i wykładowców, rocznie przeprowadza setki szkoleń w USA i w innych krajach. ITC prowadzi zarówno podstawowe szkolenia na poziomie I, II i III (teoria, zajęcia praktyczne, oprogramowanie, raportowanie badań), jak i zaawansowane specjalistyczne szkolenia w zakresie diagnostyki budynków, badania dachów i stropodachów, zaawansowanych badań radiometrycznych w podczerwieni oraz badań naukowych.

Organizacja Infrared Training Center (ITC) prowadzi działalność na całym świecie. W obu Amerykach ITC prowadzi działalność na bazie standardów wyznaczonych przez organizację ASNT, ANSI oraz przez normę ISO 9001. W Europie ITC posiada certyfikat ISO 9001 w zakresie szkolenia, edukacji i certyfikacji profesjonalnych użytkowników systemów podczerwieni w Szwecji, Belgii, Francji, Niemczech i we Włoszech. Licencjonowanym partnerem ITC jest Rumunia, spełniająca normę ISO 9001. W Niemczech ITC jest autoryzowaną organizacją szkoleniową, spełniającą również standard europejski EN 473 [225], wprowadzony pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia, a dotyczący kwalifikacji i certyfikacji osób wykonujących badania nieniszczące. W Wielkiej Brytanii *Infrared Training Center* jest autoryzowany zgodnie z wymaganiami instytutu BINT (ang. *British Institute of Non-Destructive Testing*) zgodnie z normą ISO 18436-1 [228], natomiast w Norwegii zgodnie z normą ISO 17024 [226]. Władze ITC są audytowane jako organy centralne odpowiedzialne za przestrzeganie wszystkich wymienionych norm. Działalność ITC w Europie, Środkowym Wschodzie, w Afryce i w Azji opierają się na normie *ISO 18436: Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for training and certification of personnel*. Odpowiednie działy tej normy zawierają:

- ISO 18436-1 (*International Standard*): *Requirements for certifying bodies and the certification process* [228],
- ISO 18436-3 (*Draft International Standard*): *Requirements for training bodies and the training process* [229],
- ISO 18436-7 (*Draft International Standard*): *Thermography* [230].

Certyfikaty ITC do wykonywania badań termowizyjnych, na każdym poziomie szkolenia, są wydawane na okres 5 lat. Po tym okresie należy przedłużyć jego waż-

ność poprzez ukończenie kolejnego kursu albo poprzez wykazanie się odpowiednim dorobkiem badawczym i publikacyjnym w tym zakresie.

Należy dodać, że organizacja ITC jest również pomysłodawcą i głównym sponsorem największej na świecie, corocznej konferencji „InfraMation”, poświęconej badaniom termowizyjnym w różnych dziedzinach, w tym również w budownictwie [139].

W Polsce nie ma wymagań formalnych co do kwalifikacji osób wykonujących badania termowizyjne, w tym również w budownictwie i w związku z tym nie ma oczywiście dopracowanego systemu szkolenia w tym zakresie, podobnego do opisanego poprzednio. W Polsce nie ma zatem możliwości uzyskania certyfikatu potwierdzającego kwalifikacje zawodowe operatora kamery termowizyjnej. Istnieje oczywiście możliwość ubiegania się o certyfikat w uprawnionym do tego celu ośrodku w innym kraju, np. w Szwecji (przedstawicielstwo *Infrared Training Center*) lub w Niemczech. W Polsce szkolenia w zakresie wykonywania pomiarów termowizyjnych w budownictwie prowadzi kilka ośrodków, są to szkolenia 1–2 dniowe o różnym zakresie tematycznym, z elementami badań praktycznych. Wydawane zaświadczenia ukończenia takich kursów mają znaczenie jedynie informacyjne dla potencjalnych zleceniodawców i poświadczają jedynie, że uczestnik szkolenia zaznajomił się z określoną wiedzą, natomiast nie poświadczają, że uczestnik szkolenia jest wykwalifikowanym operatorem kamery termowizyjnej.

7. Podsumowanie

Pomiary termowizyjne w budownictwie w Polsce mają prawie 40-letnią tradycję i od samego początku były stosowane przede wszystkim do badania budynków, ponieważ są jednym z najbardziej skutecznych narzędzi diagnostyki termicznej budynków. Metoda ta służy do jakościowej oceny przegród budowlanych w zakresie poprawności doboru (zaprojektowania i wykonania) izolacji cieplnej w przegrodach, do lokalizacji mostków cieplnych, zawilgocenia przegród, do identyfikacji miejsc nadmiernej infiltracji powietrza przez przegrody budowlane oraz do badania awarii instalacji w budynkach. Przedmiotem badania termowizyjnego mogą być również inne obiekty budowlane, np. zbiorniki, silosy, sieci instalacyjne i kominy przemysłowe, sieci ciepłownicze, mosty, nawierzchnie drogowe na mostach itp.

Termografia budynków prawdopodobnie jest jednym z najbardziej popularnych i rozpoznawalnych zastosowań diagnostyki cieplnej w podczerwieni. Jednak, jak już zasygnalizowano wcześniej, nie jest to łatwa metoda pomiarowa, jeżeli chodzi o dosyć rzadko stosowaną ilościową ocenę przegród budowlanych pod względem cieplnym. Co więcej, dosyć często jest bardzo trudna nawet do najczęściej stosowanej i z pozoru rutynowej jakościowej oceny przegród i to dla doświadczonych operatorów kamer termowizyjnych. Termogram jest bardzo łatwo wykonać, natomiast często jest go trudno zinterpretować, nawet przez doświadczonych badaczy.

Termografia podczerwona jest bardzo wydajnym i skutecznym narzędziem do lokalizacji ukrytych defektów materiałowych w przegrodach budowlanych poprzez lokalizację powierzchniowych anomalii rozkładu temperatury na granicznych powierzchniach przegród. W każdym przypadku przepływ ciepła przez poszczególne części zdefektowanej przegrody powoduje różnice temperatury na powierzchniach granicznych przegród, co wynika z różnej przewodności cieplnej materiałów, ich układu geometrycznego oraz z pojemności cieplnej materiałów. Każda anomalia rozkładu temperatury na powierzchniach przegród, identyfikowana kamerą termowizyjną, powinna być dogłębnie analizowana w powiązaniu z konstrukcją i strukturą przegrody, zastosowanymi materiałami, z warunkami wymuszenia temperaturowego oraz z warunkami wykonania badań.

Pomiary termowizyjne badanego obiektu obejmują nieniszczącą ocenę i kontrolę stanu termicznego jego powierzchni. Jest to metoda badawcza, która na podstawie

rozkładu temperatury na powierzchni badanego elementu umożliwia w sposób bezkontaktowy, nieniszczący i nieinwazyjny na przewidywanie lub rozpoznawanie termicznych uszkodzeń tego elementu. Tą metodą pomiarową można również identyfikować zawilgocenie przegród (w tym zawilgocenie kondensacyjne), nadmierną infiltrację powietrza przez nieszczelności przegród oraz awarie instalacji wodnej lub grzewczej. W termowizyjnym procesie badawczym budynków i innych obiektów budowlanych bardzo ważne są wszystkie etapy pomiarów – od rozpoznania obiektu badań, poprzez prace przygotowawcze, wykonanie badań, analizę komputerową termogramów, interpretację termogramów, aż po opracowanie raportu z badań. Ale najbardziej istotnym problemem w termowizyjnych badaniach w budownictwie (i w innych dziedzinach badawczych), przy założeniu spełnienia wszystkich wymaganych warunków wykonywania pomiarów, jest poprawna interpretacja termogramów. Jak już sygnalizowano, operator kamery termowizyjnej nie może ograniczyć się jedynie do obsługi sprzętu i wykonania termogramów – zasadniczym jego zadaniem jest kompleksowa analiza i wnikliwa interpretacja termogramów oraz sformułowanie wniosków i zaleceń dla zleceniodawcy. Jest to jeden z najtrudniejszych i najbardziej odpowiedzialnych etapów badań termowizyjnych. Operator kamery termowizyjnej powinien być dobrze przygotowany merytorycznie do wykonywania badań w budownictwie, powinien posiadać niezbędną wiedzę zarówno z zakresu budownictwa ogólnego, materiałów budowlanych, fizyki budowli, jak i zasad wykonywania i interpretacji termogramów. Powinien również mieć duże doświadczenie w wykonywaniu pomiarów.

Diagnostyka budynków (i innych obiektów budowlanych) metodą termografii podczerwonej jest znakomitym narzędziem badań nieniszczących, służących zwłaszcza do monitorowania i diagnostyki budynków, przez bezdotkowy pomiar temperatury badanej powierzchni przegród budowlanych, stanowiących termiczną obudowę budynków, wykonywany zarówno od strony zewnętrznej budynków, jak i od strony pomieszczeń. Jak do tej pory w tym zakresie nie doczekano się sztywnych zasad nakazujących bądź zalecających badania od strony zewnętrznej i/lub jedynie od strony wewnętrznej. Zdaniem Autora, termowizyjne badania budynków, o ile to możliwe, powinny być wykonywane zarówno od strony zewnętrznej, jak i od strony pomieszczeń. Badania od zewnątrz są niestety narażone na duże zakłócenia w postaci większych zmian temperatury powietrza, zmiennej prędkości i kierunku wiatru, nagrzewania ścian przez promieniowanie słoneczne (badania należy oczywiście wykonywać w kilka godzin po zachodzie słońca), zacienianie, oddziaływanie opadów atmosferycznych czy też chłodzące oddziaływanie radiacyjne bezchmurnego nieboskłonu. Stąd też bardzo istotne jest przestrzeganie podstawowych zasad wykonywania pomiarów termowizyjnych, które przedstawiono w niniejszej książce. Ale niezaprzeczalną zaletą badań od strony zewnętrznej jest uzyskanie ogólnego oglądu badanego obiektu, a w przypadku budynków ogólnego oglądu wszystkich elewacji i możliwość wytypowania mieszkań do badań szczegółowych od strony wewnętrznej. Oczywiście zdarzają się sytuacje, w których badanie budynków od zewnątrz niewiele wnosi i nie powinno

być wykonywane – przykładem może być badanie ścian zewnętrznych wentylowanych (np. ściana z wentylowaną pustką powietrzną znajdującą się między izolacją termiczną i zewnętrzną okładziną kamienną).

Badania termowizyjne od strony pomieszczenia są wykonywane w zdecydowanie bardziej stabilnych warunkach temperaturowych. Są pomieszczenia, które mogą być badane praktycznie jedynie od strony wewnętrznej – przykładem mogą być badania przegród zewnętrznych w mieszkaniach poddaszowych lub w innych lokalach użytkowych na poddaszach. Badania połaci dachowych nie można wykonywać od zewnątrz z poziomu gruntu, z uwagi na niekorzystny kąt patrzenia kamery termowizyjnej na połać dachową. Oczywiście w trakcie badań przegród od strony pomieszczenia muszą być przestrzegane podstawowe zasady wykonywania badań termowizyjnych (przedstawione w tej książce), dotyczące głównie stabilności temperatury powietrza zewnętrznego na 2–3 dni przed i w trakcie wykonywania pomiarów.

Uogólniając, można stwierdzić, że termowizyjne badania budynków mogą być zastosowane do identyfikacji problemów związanych z przepływem ciepła przez przegrody budowlane poprzez lokalizację mostków termicznych i ubytki izolacji cieplnej, do lokalizacji zawilgocenia przegród i nadmiernej infiltracji powietrza do budynku przez przegrody budowlane, tworzące termiczną obudowę budynków oraz do lokalizacji awarii instalacji. Zakłócenie w przepływie ciepła przez mostki termiczne i ubytki izolacji cieplnej w przegrodach oraz zawilgocenie przegród stanowią dwa najgroźniejsze źródła ich destrukcji. Wczesna i regularna diagnostyka termowizyjna budynków może doprowadzić do przeprowadzenia odpowiednio wcześniej prac remontowo-termomodernizacyjnych, co w konsekwencji spowoduje bardziej racjonalne zużycie energii w tych budynkach, oraz poprzez korektę zużycia energii, ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i przestrzeganie zasad zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

W budownictwie najczęściej stosowana jest metoda pasywna termografii podczerwonej, tj. metoda, w której badamy obiekt w stanie takim, jakim jest, bez wymuszającej ingerencji temperaturowej, przy czym w zdecydowanej większości przypadków jest to ocena jakościowa, a nie ilościowa. W praktyce oznacza to, że metoda termografii pasywnej sprowadza się do oceny termicznej obudowy budynków (głównie ścian zewnętrznych, okien i połaci dachowych) pod kątem stanu izolacyjności cieplnej przegród i wskazaniu miejsc występowania mostków termicznych, to jest do wskazania miejsc zwiększonych strat ciepła w stosunku do pozostałej części przegrody. Na podstawie tak przeprowadzanych i najczęściej stosowanych termowizyjnych badań jakościowych nie można wyznaczyć na przykład wartości oporu cieplnego dla badanych przegród. Jest to możliwe, jednak dopiero pod warunkiem przeprowadzenia w tym samym czasie dodatkowych ciągłych pomiarów natężenia strumienia przepływającego ciepła (za pomocą mierników płytowych, tzw. ciepłomierzy) oraz temperatury powietrza po obu stronach przegrody i temperatury granicznych powierzchni przegrody. W ostatnich kilku latach zintensyfikowano badania termowizyjne, które

mają na celu ocenę ilościową przegród budowlanych – możliwe jest np. wyznaczenie oporu cieplnego przegrody i w pośredni sposób określenie współczynnika przenikania ciepła, pod warunkiem jednak ciągłego pomiaru w tym samym czasie dodatkowych innych wielkości warunkujących przenikanie ciepła przez przegrodę, po założeniu ustalonego przepływu ciepła przez przegrodę. Niestety, jak do tej pory, nie dopracowano się jeszcze skutecznej i niezawodnej metody badawczej w tym zakresie z uwagi na to, że wymiana ciepła przez przegrody budowlane jest zawsze nieustalona w czasie (patrz rozdz. 2.3.3). Ponadto sprawą kluczową jest niezbędny czas wykonywania pomiarów na obiektach rzeczywistych – w zależności od masy termicznej badanej przegrody budowlanej, od układu warstw w przegrodzie oraz warunków pogodowych, czas ten może się wahać od 3 do nawet ponad 21 dni. Jak do tej pory nie dopracowano się uniwersalnych zasad regulujących tę kwestię. Jak pokazano w rozdziale 6 w usługowych termowizyjnych badaniach budynków zdecydowanie dominuje sprawdzona jakościowa ocena przegród budowlanych pod względem cieplnym.

Badania termowizyjne w budownictwie wykazują kilka niezaprzeczalnych zalet, które zostały omówione w rozdziale 6.3.3. Niestety mają dosyć poważne ograniczenia, wynikające z zasad wykonywania pomiarów. Przede wszystkim pomiary termowizyjne budynków są ograniczone do sezonu ogrzewczego, a do tego powinna być zapewniona niezbędna różnica temperatury powietrza po obu stronach przegrody oraz wymagania dotyczące stabilności temperatury na 2–3 dni przed i w trakcie wykonywania pomiarów. Z kolei budynki całorocznie chłodzone powinny być badane w okresie lata, oczywiście w godzinach nocnych, w stabilnej temperaturze powietrza zewnętrznego.

W Polsce występuje dosyć poważny problem związany z uprawnieniami do wykonywania pomiarów termowizyjnych, a mianowicie aktualnie w naszym kraju nie ma obowiązku posiadania odpowiednich uprawnień do wykonywania badań termowizyjnych w budownictwie, na kształt uprawnień obowiązujących w innych krajach (poziom I, II i III). Zdaniem Autora, wprowadzenie obowiązku szkolenia i posiadania takich uprawnień powinno być obligatoryjne w naszym kraju, co pozwoliłoby na zdecydowane ograniczenie częstych błędów merytorycznych popełnianych w trakcie badań i uniknięcie negatywnych zjawisk z tym związanych opisanych w rozdziale 1. Zaświadczenia ukończenia kursów i szkoleń z zakresu termowizyjnych badań budynków, prowadzonych przez nieliczne ośrodki, mają znaczenie jedynie informacyjne o ukończeniu szkolenia, a na pewno nie są potwierdzeniem o przygotowaniu danej osoby do samodzielnego wykonywania badań.

Zdaniem Autora, badania termowizyjne powinny należeć do podstawowych badań budynków i stanowić część procesu inwestycyjnego na etapie odbioru technicznego budynków nowych i termomodernizowanych budynków istniejących.

Literatura

- [1] Adamczyk S., Rabiega J., Rawa P., Bień J., Kamiński T., Kuźawa M., Nowak H., *Ocena stanu technicznego i przydatności użytkowej mostu Osobowickiego we Wrocławiu*. Raporty Inst. Inż. Łąd. PWr. 2009, Ser. SPR Nr 20, 90.
- [2] Aggelis D.G., Kordatos E.Z., Souli D.V., Matikas T.E., *Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete*. Construction and Buildings Materials, Vol. 24, Issue 10, October 2010.
- [3] Ambrosini D., Daffara C., Di Biase R., Paoletti D., Pezzati L., Bellucci R., Bettini F., *Integrated reflectography and termography for wooden paintings diagnostics*. Journal of Cultural Heritage, Vol. 11, Issue 2, April–June 2010.
- [4] Arendarski J., Rusjan D., *Termografia w budownictwie*. Przegląd Budowlany, Nr 46, 10, 1974, 504–505.
- [5] Arndt Ch.R., Röllig M., Rieck C., Walther A., Scheel H., Hillemeier B., *Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures*. Cement & Concrete Composites 28, 2006, 393–401.
- [6] Arndt R.W., *Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering*. Infrared Physics & Technology, Vol. 53, Issue 4, July 2010.
- [7] ASHRAE Handbook, Fundamentals, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, New York 2005.
- [8] Avdelidis N.P., Moropoulou A., *Emissivity considerations in building thermography*. Energy and Buildings, No. 35, 2003, 663–667.
- [9] Avdelidis N.P., Moropoulou A., Marioli-Riga Z.P., *The technology of composite patches and their structural reliability inspection using infrared imaging*. Journal of Progress in Aerospace Sciences, Vol. 39, 2003, 317–328.15.
- [10] Avdelidis N.P., Moropoulou A., *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*. Journal of Cultural Heritage 5, 2004, 119–127.
- [11] Avdelidis N.P., Almond D.P., *Transient thermography as a through skin imaging technique for aircraft assembly: modelling & experimental results*. Journal of Infrared Physics & Technology, Vol. 45, 2004, 103–114.14.
- [12] Avdelidis N.P., Almond D.P., Dobbison A., Hatwin B.C., Ibarra-Castaneda C., Maldague X., *Invited Review Paper: Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT*. Journal of Progress in Aerospace Sciences, Vol. 40, 2004, 143–162.
- [13] Balaras C.A., *The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods*. Energy and Buildings, Vol. 24, 1996.
- [14] Balaras C.A., Argiriou A.A., *Infrared Thermography for building diagnostic*. Energy and Buildings 34, 2002, 171–183.

- [15] Bazilian M.D., Kamalanathan H., Prasad D.K., *Thermographic analysis of a building integrated photovoltaic system*. Renewable Energy, Vol. 26, 2002, 449–461.
- [16] Berdahl P., Fromberg R., *The thermal radiance of clear skies*. Solar Energy, Vol. 29, 1982, 299–314.
- [17] Berdahl P., Martin M., Sakkal F., *Thermal performance of radiative cooling panels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 26, No. 6, 1983, 871–880.
- [18] Barreira E., Vasco P., *Evaluation of building materials using infrared thermography*. Construction, Vol. 21, 2007.
- [19] Bień J., *Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [20] Breitenstein O., Langenkamp M., *Lock-in thermography: basics and use for functional diagnostics of electronic components*. Springer 2003.
- [21] Breitenstein O., Warta W., Langenkamp M., *Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*. Springer 2010.
- [22] Burch D.M., *Infrared audits of roof heat loss*. ASHRAE Transactions, Vol. 86, Part 2, 1980, 209–226.
- [23] Byrnes J., *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation*. Springer 2009, 21–22.
- [24] Caniou J., *Passive infrared detection: theory and applications*. Wydawnictwo Springer 1999.
- [25] Cena K., Clark J.A., Editors, *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*, Scientific Papers of the Institute of Building Science of Wrocław Technical University, Monographs No. 12, 1980, Wrocław Technical University Press, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam–Oxford–New York, 1980.
- [26] Clark M.R., McCann D.M., Forde M.C., *Application of infrared thermography to the nondestructive testing of concrete and masonry bridges*. NDT&E International, Vol. 36, Issue 4, June 2003.
- [27] Clark M.R., *Infrared Thermography Assessment of Masonry Arch Bridges Laboratory and Field Case Studies*. International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering, September 16–19, 2003, Berlin.
- [28] Clarke J.A., *Energy simulation in building design*. 2nd ed., Butterworth Heinemann, 2001.
- [29] Colantonio A., *Thermal performance patterns on solid masonry exterior walls of historic buildings*. Journal of Insulation and Building Envelopes, Vol. 21, October 1997, 185–201.
- [30] Defer D., Shen J., Lassue S., Duthoit B., *Non-destructive testing of a building wall by studying natural thermal signals*. Energy and Buildings 34, 2002, 63–69.
- [31] Dereniak E.L., Boreman G.D., *Infrared detectors and systems*. Wiley 1996.
- [32] Dmochowski M., Grzeszczyk W., Łakomy T., Marszałek K., Nowak H., Śliwowski L., *A building and its physical environment*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1992. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Seria: Monografie Nr 28, 68.
- [33] Duffner K.L., Wolfe D.E., Bailey D.T., Arya S.P., *Determination of climate variation within metropolitan areas*. Phase I Summary. ASHRAE Transactions, Vol. 99, Part I, 1993, 430–449.
- [34] Dzieniszewski W., *Procesy ciepłno-przepływowe w budynkach. Podstawy modelowania matematycznego*. Sekcja Fizyki Budowli, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Seria: Studia z Zakresu Fizyki Budowli, Łódź 2005.
- [35] Evans J.B., *Meteorology and infrared measurements*. Thermosense IV: Thermal Infrared Sensing Applied to Energy Conservation in Building Envelopes, Ottawa, Canada, R.A. Grot and J.T. Wood, SPIE Vol. 313, 1981, 9–11.
- [36] Finger G., Thiebaud F., Zürcher Ch., Kneubühl F.K., Frank Th., *IR-properties of the atmosphere relevant to energy losses of buildings caused by heat radiation*. Fourth International Conference on Infrared and Millimeter Waves and their Applications, December 10–15, 1979, Miami Beach, Florida, 55–56.

- [37] Gawin D. (red.), Kossecka E. (red.), *Typowy rok meteorologiczny do symulacji procesów wymiany ciepła i masy w budynkach*. Komputerowa Fizyka Budowli, t. 2, Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002.
- [38] Gawin D., Krenzel H.M., Radoń J., Więckowska A., Witczak K., *Program komputerowy WUFI i jego zastosowanie do symulacji zjawisk cieplno-wilgotnościowych w przegrodach budowlanych*, Komputerowa Fizyka Budowli t. 3, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.
- [39] Gaussorgues G., *Infrared thermography*. Springer 1994,
- [40] Gayo E., De Frutos J., Palomo A., Massa S., *A Mathematical Model Simulating the Evaporation Processes in Building Materials: Experimental Checking through Infrared Thermography*. Building and Environment, Vol. 31, No. 5, 1996, 469–475.
- [41] Gertis K., Erhorn H., *Infrarotwirksame Schichten zur Energieeinsparung bei Gebäuden? Gesundheits-Ingenieur*, Vol. 103, Heft 1, 1982, 20–24, 33–34.
- [42] Givoni B., *Cooling by longwave radiation*. Passive Solar Journal, Vol. 1, No. 3, 1982, 131–150.
- [43] Givoni B., *Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems*. Energy and Buildings, Vol. 17, 1991, 177–199.
- [44] Goldstein R.J., *Application of aerial infrared thermography to measurement of building heat loss*. ASHRAE Transactions, Vol. 84, Part 1, 1978.
- [45] Górski J., *Termografia – podstawy teoretyczne*. Energia i Budynek, Nr 2, 2007, 20–25.
- [46] Granqvist C.G., *Spectrally selective surfaces for heating and cooling applications*. SPIE Optical Engineering Press, Vol. TT1, Washington 1989.
- [47] Griffith B.T., Türler D., Arasteh D., *Surface temperatures of insulated glazing units: infrared thermography laboratory measurements*. ASHRAE Transactions 1996, V. 102 PT. 2.
- [48] Grinzato E., Vavilov V., Kauppinen T., *Quantitative infrared thermography in buildings*. Energy and Buildings, No 29, 1998, 1–9.
- [49] Grinzato E., Bressan C., Marinetti S., Bison P., Bonacina C., *Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared*. Infrared Physics & Technology, Vol. 43, Issues 3–5, 2002.
- [50] Grot R.A., Silberstein S., *Measurement method for evaluation of thermal integrity of building envelopes*. Report NBSIR 82-2605, USA, Nov. 1982, 124.
- [51] Grzeszczyk W., Nowak H., Marszałek K., Cena K., *Skorygowana temperatura powietrza jako wskaźnik termiczny przegród budowlanych*. Archiwum Inżynierii Ładowej, 1985 t. 31, z. 1/2, 213–228.
- [52] Heinrich H., Dahlem K.H., *Thermography of low energy buildings*. QIRT Conference 2000, 18–21 Juli, 2000.
- [53] Henderson R., *Wavelength considerations*. Instituts für Umform – und Hochleistungs. Archived from the original on 2007-10-28.
- [54] Henini M., Razeghi M., *Handbook of infrared detection Technologies*. Elsevier 2002.
- [55] Hoła J., Nowak H., Sadowski Ł., Schabowicz K., *Badania w sprawie uszkodzenia płyty dennej w garażu w budynku Pasażu Grunwaldzkiego we Wrocławiu*. Raporty Inst. Bud. PWr. 2008, Ser. SPR Nr 11, 101.
- [56] Hoła J., Matkowski Z., Schabowicz K., *Wady wykonawcze bezspoinowego systemu ociepleń ścian zewnętrznych budynków*. XI Konferencja Naukowo-Techniczna REMO 2004: Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, 177–182, Wrocław 2004.
- [57] Hoła J., Sikora J., Filipowicz S., Matkowski Z., Nita K., Schabowicz K., Wójtowicz S., Biernat K., *New Tomographic Method of Brickwork Damp Identification. Collective work*. Scientific editors Hoła J., Wójtowicz S. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
- [58] Jacobs P.A., *Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds*. Second Edition, SPIE Press, Bellingham, Washington 2006.

- [59] Jasieńko J., Gosowski B., Nowak H., Wójcicki Zb., Bednarz Ł., Czepizak D., Dudkiewicz J., Engel L., Grosel J., Karyś J., Nowak T., Marek A., Miśków R., Tomaszewska-Marek M., Babij M., Matros Zb., *Praca badawcza mająca na celu ustalenie stanu faktycznego elementów konstrukcji znajdujących się w pomieszczeniu Auli Leopoldina zlokalizowanym w gmachu głównym Uniwersytetu Wrocławskiego*. Raporty Inst. Bud. PWr. 2008, Ser. SPR Nr 36, 208.
- [60] Jaworski J., *Termografia budynków*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000.
- [61] Jaworski J., *Termografia budynków w otaczającym środowisku. Obrazy termalne budynków w ocenie ich sprawności cieplnej*. IPPT PAN, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Studia z Zakresu Inżynierii, Nr 60, Warszawa 2008.
- [62] Kandemir-Yucel A., Tavukcuoglu A., Caner-Saltik E.N., *In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity*. Infrared Physics & Technology, Vol. 49, Issue 3, January 2007.
- [63] Kaplan H., *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*. SPIE Press, 2007.
- [64] Kisilewicz T., *Izolacyjność termiczna przegród zewnętrznych budynków mieszkalnych*. W: Termomodernizacja budynków dla poprawy jakości środowiska. NAPE Warszawa, Gliwice 2004, 174–189.
- [65] Kisilewicz T., *Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych*. Monografia 364, Seria Inżynieria Lądowa, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
- [66] Kisilewicz T., Wróbel A., *Detection of thermal bridges – aims, possibilities and conditions*. QIRT 2008 Proceedings – 9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, July 2–5, Kraków 2008.
- [67] Kisilewicz T., Wróbel A., *Diagnostyka termowizyjna przegród w zmiennych warunkach brzegowych*. XII Polska Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź 2009.
- [68] Klemm P. (red.), *Budownictwo ogólne*. T. 2. *Fizyka budowli*, Arkady, Warszawa 2006.
- [69] Klemm P., Jabłoński M., Klemm K., *Wpływ wiatru na lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1997, 202–207.
- [70] Kneubühl F.K., Finger G., Thiebaud F., Zürcher Ch., Sagelsdorff R., Frank Th., *Energy saving by reduction of thermal radiation from building envelopes*. The International Congress on Building Energy Management, Portugal, May 12–15, 1980.
- [71] Kossecka E., *Heat transfer through building wall elements of complex structure*. Arch. Civ. Eng., Vol. 38, No. 1–2, 1992, 117–126.
- [72] Kossecka E., Kosny J., Christian J.E., *A Simple Algorithm for Determining the Thermal Resistance of a Wall Based on Measurements of Surface Heat Flux and Temperature*. Building Research Journal, Vol. 3, No. 1, Spring 1994, 57–66.
- [73] Kossecka E., *Wybrane zagadnienia dynamiki cieplnej ścian budynków*. Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Studia z Zakresu Inżynierii Nr 45, Warszawa 1998.
- [74] Kostkowski E., *Promieniowanie cieplne*. Wydawnictwo PWN, Warszawa 1993.
- [75] Krenzinger A., Andrade A.C., *Accurate outdoor glass thermographic thermometry applied to solar energy devices*. Solar Energy, Vol. 81, 2007, 1025–1034.
- [76] Kruczek T., *Termowizja i możliwości jej zastosowań w audytingu energetycznym oraz w diagnostyce obiektów*. Gospodarka Paliwami i Energią, Nr 7, 2002.

- [77] Kurita K., Oyado M., Tanaka H., Tottori S., *Active infrared thermographic inspection technique for elevated concrete structures using remote heating system*. Infrared Physics & Technology, Vol. 52, 2009, 208–213.
- [78] Laguela S., Martinez J., Armesto J., Arias P., *Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies*. Energy and Buildings, Vol. 43, 2011, 1216–1221.
- [79] Laskowski L., *Wybrane zagadnienia fizyki miasta*. COiB, Warszawa 1987.
- [80] Laskowski L., *Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynków*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [81] Ljungberg, S.A., *Infrared Techniques in Building and Structures: Operation and Maintenance*, in *Infrared Methodology and Technology*, X.P.V. Maldague, ed., 1994, 211–252.
- [82] Ljungberg, S.A., *Aerial Thermography – A Tool for Detecting Heat Losses and Defective Insulation in Building Attics and District Heating Networks*. Proceedings of SPIE – The International Society of Optical Engineering, Thermosence IX, Vol. 790, 1987.
- [83] Lloyd J.M., *Thermal imaging systems*. Wydawnictwo Springer, 1975.
- [84] Madding R., *Finding R-values of stud frame constructed houses with IR Thermography*. Inframation 2008, Proceedings Vol. 9, 2008, 261–277.
- [85] Maierhofer Ch., Wigenhauser H., Drink A., Röllig, M., *Quantitative numerical analysis of transient IR experiments on buildings*. Infrared Physics and Technology Vol. 46, 2004, 173–180.
- [86] Maierhofer Ch., Brink A., Röllig M., Wigenhauser H., *Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations*. Construction and Building Material, Vol. 19, Issue 10, December 2005, 731–737.
- [87] Maierhofer Ch., Arndt R., Rolling M., Rieck C., Walther A., Scheel H., Hillemeier B., *Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures*. Cement and Concrete Composites, Vol. 28, Issue 4, April 2006.
- [88] Maldague X., Largouet Y., Couturier J.P., *A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modeling, noise, experiments*. Rev. Gen. Therm., Vol. 37, 1998, 704–717.
- [89] Maldague X., *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [90] Maldague X., *Introduction to NDT by active infrared thermography*. Materials Evaluation, Vol. 60, No. 9, September 2002, 1060–1073.
- [91] Maldague X., Galmiche F., Ziadi A., *Advances in pulsed phase thermography*. Infrared Physics & Technology, Vol. 43, No. 3–5. (June 2002), 175–181.
- [92] Materiały szkoleniowo-informacyjne firmy AGA Infrared Systems AB.
- [93] Materiały szkoleniowo-informacyjne firmy FLIR SYSTEMS.
- [94] Materiały szkoleniowo-informacyjne firmy FLUKE.
- [95] Materiały szkoleniowo-informacyjne firmy HUKSEFLUKS (Holandia).
- [96] Materiały szkoleniowo-informacyjne firmy PHYSIBEL (Belgia).
- [97] Marks W., *Multi-criteria optimization of block of flats*. Archives of Civil Engineering, 43 (3), 1997, 283–300.
- [98] Marks W., *Multicriteria optimization of shape of energy-saving building*. Building and Environment, 32 (4), 1997, 331–339.
- [99] Marks W. (red.), *Optymalizacja w fizyce budowli*. Sekcja Fizyki Budowli KILiW PAN, Łódź 2001.
- [100] Martin M., *Radiative cooling*. In: Cook J. (ed.), *Passive cooling*, Series: Solar heat technologies, No. 8, Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [101] Meola C., Di Maio R., Roberti N., Carlomagno G., *Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures*. Engineering Failure Analysis, Vol. 12, Issue 6, 2005, 875–892.

- [102] Meola C., *Infrared thermography of masonry structures*. Infrared Physisc & Technology, Vol. 49, 2007, 228–233.
- [103] Michalczyk J., Nowak H., *Względny pomiar lokalnych właściwości cieplnych przegród budowlanych za pomocą urządzenia termowizyjnego*. Inżynieria i Budownictwo, 1980, R. 37, Nr 3, 98–101.
- [104] Minkina W., Rutkowski P., Wild W., *Podstawy pomiarów termowizyjnych*. Pomiary, Automatyka, Kontrola (PAK), Vol. 46, Nr 1, 2000, 7–14.
- [105] Minkina W., *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [106] Minkina W., Dudzik S., *Infrared thermography: errors and uncertainties*. John Wiley and Sons, 2009.
- [107] Nowak H., Stępniewski W., *Termografia obiektów budowlanych w aspekcie jakości budownictwa ogólnego*. W: Problemy jakości budownictwa. II Sympozjum naukowo-techniczne, Wrocław, czerwiec 1978, Wrocław 1979, 141–150.
- [108] Nowak H., *Ochrona cieplna obiektów budowlanych w aspekcie oszczędności energii w budownictwie na świecie – nowe możliwości pomiarów za pomocą urządzenia termowizyjnego*. W: Optymalizacja systemów budownictwa uprzemysłowionego. Toruń, 21–22 maja 1979, Czwarta Toruńska Konferencja Problemowa. 205–217.
- [109] Nowak H., Michalczyk J., Śliwowski L., *Temperatura operatywna – cieplny wskaźnik środowiska zewnętrznego stropodachów*. Problemy efektywności systemów budownictwa. XVII Konferencja problemowa, Kołobrzeg, październik 1980. Referaty. Gdańsk, 1980. 97–99.
- [110] Nowak H., *Radiative heat transfer between the outside surface of the flat roof and the thermal environment*. Third International Conference on Infrared Physics, ETH Zurich, Switzerland, July 23–27, 1984, 347–349.
- [111] Nowak H., *The influence of solar and thermal radiation on the thermal balance of the flat roof*. International Conference on Passive and Low Energy Architecture in Housing, PLEA '86, Pecs, Hungary, September 1–5, 1986, Vol. II, 48–59.
- [112] Nowak H., *Wpływ selektywnych własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu na jego bilans cieplny*. I Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce, Łódź, 11–13 listopada, 1987.
- [113] Nowak H., *The sky temperature in net radiant heat loss calculations from low-sloped roofs*. Infrared Physics, Vol. 29, No. 2–4, 1989, 231–232.
- [114] Nowak H., *Radiative interaction between low-sloped roofs and the atmosphere*. The 6th Conference on Thermogrammetry and Thermal Engineering, 31 May–2 June, 1989, 453–496.
- [115] Nowak H., *The influence of the atmospheric radiation on the heat balance of low-sloped roofs*. International Conference on Millimeter Wave and Far Infrared Technology June 18–22, 1990, Beijing, China, T7.2, 174–177.
- [116] Nowak H., *The longwave radiative heat transfer of the building envelopes*. Infrared Physics, Vol. 32, 1991, 357–363.
- [117] Nowak H., *Długofalowe promieniowanie środowiska zewnętrznego a bilans cieplny przegród budowlanych*. III Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce, Łódź, czerwiec 26–28, 1991, 15–20.
- [118] Nowak H., Cena K., *The longwave radiation around buildings at different angles*. International Conference on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology, August 17–21, 1992, Beijing, China, Th1.3, 451–454.
- [119] Nowak H., *The longwave radiation around buildings*. Proceedings of an Interuniversity Research Seminar, Eindhoven University of Technology-Technical University of Wrocław, Eindhoven, The Netherlands, November 18–20, 1992, 65–69.

- [120] Nowak H., *On modelling of the longwave radiation around buildings*. Dept. Physical Aspects of the Built Environment (FAGO Group), Faculty of Architecture, Building and Planning, Eindhoven University of Technology, Report No. 94.40.K, August 1994, Eindhoven, The Netherlands.
- [121] Nowak H., De Wit M., Schellen H., *Estimation of the atmospheric longwave radiation*. Proceedings of an Interuniversity Research Seminar, Technical University of Wrocław–Eindhoven University of Technology, Wrocław, Poland, November 23–25, 1994, 193–198.
- [122] Nowak H., Śliwowski L., *Pomiary natężenia ciepłego promieniowania atmosfery w Eindhoven*. V Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce, Łódź, czerwiec 1995, 271–276.
- [123] Nowak H., Marszałek K., *Thermographic survey of basement walls in multifamily buildings in Poland*. The International Conference on North American Tunneling '96, Washington, DC, USA, 21–24 April, 1996, 823–829.
- [124] Nowak H., *Analiza i ocena możliwości kształtowania bilansu ciepłego okien*. Kwartalnik „Okno”, Nr 1(8), 1997, 196–204.
- [125] Nowak H., *Wybrane zagadnienia bilansu ciepłego okna*. Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce. VI Konferencja naukowo-techniczna. Materiały konferencyjne, Łódź, 17–21 czerwca, 1997, 283–289.
- [126] Nowak H., *Oddziaływanie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa PWr. Nr 72, Seria Monografie Nr 31, Wrocław, 1999.
- [127] Nowak H., Śliwowski L., Cena K., *Energy conservation in buildings in Poland*. International Building Physics Conference. Proceedings, Eindhoven, The Netherlands, September 18–21, 2000, Department of Building and Architecture. Eindhoven University of Technology, 2000, 621–628.
- [128] Nowak H., *Własności spektralne selektywne powierzchni przegród budowlanych*. Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię. Energodom '2000. V Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna. PKrak., Kraków-Zakopane, 25–27 października 2000, 259–268.
- [129] Nowak H., *Modelling of the longwave radiation incident upon a building*. Archives of Civil Engineering. 2001 Vol. 47, Issue 2, 243–267.
- [130] Nowak H., *Braki i błędy projektowe w zakresie ochrony ciepłej budynków*. Konferencja Fizyka budowli w teorii i praktyce. IX Polska konferencja naukowo-techniczna. Łódź, 10–13 czerwca 2003, 532–539.
- [131] Nowak H., *Błędy projektowe i wykonawcze realizacji termicznej obudowy budynków*. W: Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych. REMO 2004. XI Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław-Kliczków, 9–11 grudnia 2004. Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2004, 313–320.
- [132] Nowak H., *Badania termowizyjne połączeń żelbetowych płyt balkonowych ze ścianami zewnętrznymi w wybranych budynkach mieszkalnych we Wrocławiu*. Raporty Inst. Bud. PWr. 2005, Ser. SPR Nr 13, 41.
- [133] Nowak H., *Badania termograficzne budynków*. Współczesne Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa Lądowego i Wodnego. Oficyna Wydawnicza PWr., 2007, 199–206.
- [134] Nowak Ł., Nowak H., *Możliwości wykorzystania zestawów szyb elektrochromowych w budownictwie jednorodinnym*. VIII International Research-Technical Conference on the Problem of Designing, Construction and Use of Low Energy Housing, Energodom, Kraków, 2006, 451–458.
- [135] Nowak Ł., Nowak H., *Szyby elektrochromowe jako element fasady inteligentnej*. Kwartalnik Okno. 2007, R. 12, Nr 2, 58, 60, 62, 64–65.
- [136] Nowak Ł., Nowak H., *Zaawansowane systemy przeszklenia elewacji budynków energooszczędnych*. Energia i Budynek. 2011, R. 5, Nr 1, 18–24,

- [137] Nowak H., *Badania termowizyjne przegród zewnętrznych w budynku hali produkcyjnej*. Raporty Inst. Bud. PWr. 2007, Ser. SPR Nr 20, 37.
- [138] Nowak H., Barański J., *Badania termowizyjne budynku Dworca Głównego PKP we Wrocławiu*. Raporty Inst. Bud. PWr. 2009, Ser. SPR Nr 18, 101.
- [139] Nowak H., Kucypera M., *Application of active thermography for detecting material defects in the building envelope*. Infrared Camera Applications Conference: InfraMation 2010, Proceedings Vol. 11, November 8–12, 2010, Las Vegas, NV, USA, 369–380.
- [140] Nowak H., Kucypera M., *Wybrane problemy badań przegród budowlanych metodą termografii aktywnej*. Inżynieria i Budownictwo 12/2010, 682–687.
- [141] Nowak H., Kucypera M., *Zastosowanie termografii aktywnej w nieniszczących badaniach przegród budowlanych*. Energia i Budynek, Nr 7, 2011, 13–18.
- [142] Nowak H., *Materiały szkoleniowo-dydaktyczne*. Wrocław 2010.
- [143] Ocana S.M., Guerrero I.C., Requena I.G., *Thermographic survey of two rural buildings in Spain*. Energy and Buildings, Vol. 36, 2004, 515–523.
- [144] Oke T.R., *Boundary layer climates*. Methuen and Co. Ltd., London, 2nd ed., 1987.
- [145] Oke T.R., *Street design and urban canopy layer climate*. Energy and Buildings, Vol. 11, 1988, 103–113.
- [146] Oliferuk W., *Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń*. Biuro Gamma, Warszawa 2008.
- [147] Omar M., Hassan M.I., Saito K., Alloo R., *IR self-referencing thermography for detection of in-depth defects*. Infrared Physics & Technology, Vol. 46, 2005, 283–289.
- [148] Ozisik M.N., Orlande H.R.B., *Inverse Heat Transfer*. Fundamentals and Application. Taylor & Francis 2000.
- [149] Paljak I., Pettersson B., *Thermography of buildings*. The National Swedish Institute for Building Research, Report No. T-12/1972, Stockholm 1972.
- [150] Pettersson B., Axen B., *Thermography testing of the thermal insulation and airtightness of buildings*. Swedish Council for Building Research, Stockholm 1980.
- [151] Pogorzelski J.A., Firkowicz-Pogorzelska K., *Deklarowana i obliczeniowa przewodność cieplna materiałów budowlanych*. Prace Instytutu Techniki Budowlanej, 1/98.
- [152] Pogorzelski J.A., *Powszechne braki i wady projektów i możliwość ich usunięcia*. Konferencja Naukowo-Techniczna: Energooszczędne budownictwo Mieszkaniowe, Mrągowo 2001.
- [153] Pogorzelski J.A., *Zagadnienia cieplno-wilgotnościowe przegród budowlanych*. Budownictwo Ogólne, T. 2, Fizyka Budowli, Piotr Klemm (red.), Arkady, Warszawa 2005, 103–364.
- [154] Prager Ch., Kohl M., Heck M., Herkel S., *The influence of the IR reflection of painted facades on the energy balance of a building*. Energy and Buildings, Vol. 38, 2006, 1369–1379.
- [155] Praca zbiorowa pod redakcją Henryka Madury – *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Agenda Wydawnicza PAKu, Warszawa 2004.
- [156] Rogalski A., *Fundamentals of Infrared Detector Technologies*. CRC Press 2009.
- [157] Rudowski G., *Termowizja i jej zastosowanie*, WNT, Warszawa 1978.
- [158] Rybiński J., Bednarek M., Jokiel A., *Stanowisko badawcze do wykrywania i identyfikacji defektów podpowierzchniowych metodą fali cieplnej*. Zeszyty Naukowe SGSP, Nr 32/2005.
- [159] Rymarczyk Z., *Diagnostyka przegród zewnętrznych budynków z wykorzystaniem termografii*. Izolacje, Nr 3, 1999, 50–56.
- [160] Sala A., *Radiacyjna wymiana ciepła*. PWN, Warszawa 1993.
- [161] Sandrolini F., Franzoni F., *An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings*. Building and Environment, Vol. 41, 2006, 1372–1380.

- [162] Sasaki R., Uematsu Y., Yamada M., Seaki H., *Application of infrared thermography and a knowledge-based system to the evaluation of the pedestrian-level wind environment around buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 67, 68, 1997, 873–883.
- [163] Schmer F.A., Hause D.R., Eidenshink J.C., *Planning and conducting an airborne thermography survey*. Thermosense II: Second National Conference on thermal infrared sensing technology for energy conservation programs, Albuquerque, New Mexico, USA, S.A. Morain, American Society of Photogrammetry, 1979, 151–160.
- [164] Schott J.R., Biegel J.D., Wilkinson E., *Quantitative aerial survey of building heat loss*. Thermosense V: Thermal Infrared Sensing Diagnostics, Detroit, USA, G.E. Courville, SPIE Vol. 0371, 187–194, 1982.
- [165] Sham F.C., Huang Y.H., Liu L., Chen Y.S., Hung Y.Y., Lo T.Y., *Computerized tomography technique for reconstruction of obstructed temperature field in infrared thermography*. Infrared Physics and technology, Vol. 53, Issue 1, January 2010.
- [166] Shepard S.M., *Introduction to active thermography for nondestructive evaluation*. Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 44, No. 4, 1997, 236–239.
- [167] Siegel R., Howell J.R., *Thermal Radiation Heat Transfer*. McGraw-Hill, New York, 1981.
- [168] Staniec M., Nowak H., *Analysis of the earth-sheltered buildings' heating and cooling energy demand depending on type of soil*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011, Vol. 11, Nr 1, 221–235.
- [169] Staniszewski B., *Wymiana ciepła*. PWN, Warszawa 1979.
- [170] Stimolo M., *Passive Infrared Thermography as Inspection and Observation Tool in Bridge and Road Construction*. International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering, September 16–19, 2003, Berlin.
- [171] Stockton G.R., Tache A., *Advances in applications for aerial thermography*. Thermosense XXVIII, Orlando, USA, SPIE, Vol. 6205, 2006.
- [172] Stockton G.R., *How aerial IR can be used as a NDT Tool for Asset Management*. AAENDE Conference, Buenos Aires 2007.
- [173] Stockton G.R., *Applications for Infrared Thermography as an NDT Method for Buildings*. AAENDE Conference, Buenos Aires 2007.
- [174] Swinbank W.C., *The longwave radiation from clear skies*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 89, 1963, 339–348.
- [175] Śliwowski L., *Mikroklimat wnętrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach*. Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2000.
- [176] Śliwowski L., *Mikroklimat wnętrz*. Budownictwo Ogólne, t. 2. Fizyka Budowli, Piotr Klemm (red.), Arkady, Warszawa 2005, 53–102.
- [177] Ślusarek J., *Selected problems concerning maintenance of structures*. Acta Scientiarum Polonorum – Architectura, SGGW, Vol. 6, No. 4, Warszawa 2007, 3–21.
- [178] Ślusarek J., Szymanowska-Gwiżdż A., *The analysis of the thermal-humidity conditions of the chosen parts of the building with regard to the mould hazard*. Acta Scientiarum Polonorum – Architectura, SGGW, Vol. 5, No. 1, 2006, Warszawa 2006, 25–33.
- [179] Tavukeuoglu A., Duzgunes A., Caner-Saltic E.N., Demirci S., *Use of IR thermopography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building*. NDT&E International, Vol. 38, 2005, 402–410.
- [180] Titmann D.J., *Applications of thermography in non-destructive testing of structures*. NDT&E International, Vol. 34, 2001, 149–154.
- [181] Tobiasson W., *A method for conducting airborne infrared roof moisture surveys*. Thermosense X: Thermal Sensing for Diagnostics and Control, Orlando, Florida, USA, SPIE Vol. 934, 1988, 50–61.

- [182] Treado S.J., Burch D.M., *Applications of aerial thermography for residential energy analysis*. ASHRAE Transactions, Washington, D.C., USA, ASHRAE, Vol. 83 Part 2B, 1983, 95–101.
- [183] Türler D., Griffith B.T., Arasteh G.K., *Laboratory procedures for using infrared thermography to validate heat transfer models*. Insulation Materials: Testing and Applications: Third Volume, ASTM STP 1320, R.S. Graves and R.R. Zarr (eds.), American Society for Testing and Materials, 1997.
- [184] Wawrzyniek A., *Odwrotne zagadnienia przewodzenia ciepła z dużą liczbą danych pomiarowych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
- [185] Więcek B., Felczak M., Pokosińska M., Cupa A., *Wielospektralne badania zabytków architektury*. VI Konferencja Krajowa – Termografia i Termometria w Podczerwieni, Ustroń 2006.
- [186] Więcek B., De Mey G., *Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania*, Warszawa 2011.
- [187] Wiśniewski S., Wiśniewski T., S., *Wymiana ciepła*. WNT, Warszawa 1997.
- [188] Wiśniewski T., *Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie*. Energia i Budynek, Nr 2, 2007, 26–29; Nr 3, 9–15; Nr 4, 18–25.
- [189] Włodarczyk D., Nowak H., *Różne aspekty projektowania systemów fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkiem*. W: Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Praca zbiorowa pod red. Tadeusza Bobki. Częstochowa: Wyd. PCzest., 2005. 437–444.
- [190] Włodarczyk D., Nowak H., *Statistical analysis of solar radiation models onto inclined planes for climatic conditions of Lower Silesia in Poland*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2009, Vol. 9, Nr 2, 127–144.
- [191] Wolfe W.L., *Introduction to infrared system design*. SPIE Press 1996.
- [192] Wróbel A., *Termografia w pomiarach inwentaryzacyjnych obiektów budowlanych*. Wydawnictwa AGH, Seria: Rozprawy, Monografie nr 209, Kraków 2010.
- [193] Wróbel A., Wróbel A., Kisilewicz T., Ortyl Ł., Kwartalnik-Pruc A., Szafarczyk A., Owerko T., Rakoczy A., Nowak K., *Ilościowe określenie cieplnych właściwości przegród budowlanych z wykorzystaniem techniki termograficznej*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2011.
- [194] Wyrwał J., Świrski J., *Problemy zawilgocenia przegród budowlanych*. Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z Zakresu Inżynierii, Nr 44, Warszawa 1998.
- [195] Wyrwał J., *Termodynamiczne podstawy fizyki budowli*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2004.
- [196] Vavilov V.P., Kauppinen T., Grinzato E., *Thermal characterization of defects in buildings envelopes using long square pulse and slow thermal wave techniques*. Res. Nondestr. Eval. 9, 1997, 181–200.
- [197] Vavilov V.P., Demin V., *Infrared thermographic inspection of operating smokestacks*. Infrared Physics & Technology, Vol. 43, 2002, 229–232.
- [198] Vollmer M., Mollmann K., P., *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, research and Applications*. Ailey-VCH Verlag, GmbH & KGaA, Germany 2010.
- [199] Zürcher Ch., Finger G., Kneubühl F.K., Thiebaud F., Vetsch H., *Thermal radiation properties of building envelopes relevant to energy losses*. Proc. the 9th CIB Congress, August 15–19, Stockholm 1983, Vol. 3A, 431–442.

Dyrektywy

- [200] Dyrektywa 2002/91/EC Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (Dyrektywa EPBD).
- [201] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (tzw. Recast Dyrektywy EPBD).

Rozporządzenia

- [202] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej (DzU Nr 201, poz. 1240).
- [203] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (DzU Nr 201, poz. 1238).
- [204] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego (DzU Nr 201, poz. 1239).

Normy

- [205] PN-EN ISO 9251:1998 Izolacja cieplna – Warunki wymiany ciepła i właściwości materiałów – Słownik.
- [206] PN-EN ISO 9288:1999 Izolacja cieplna – Wymiana ciepła przez promieniowanie – Wielkości fizyczne i definicje.
- [207] PN-EN 12524:2003 Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Tabelaryczne wartości obliczeniowe.
- [208] PN-EN ISO 13788:2003 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa – Metody obliczania.
- [209] PN-EN ISO 6946:2008 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania.
- [210] PN-EN ISO 10211:2008 Mostki cieplne w budynkach – Obliczanie strumieni ciepłych i temperatury powierzchni – Część 1: Metody ogólne.
- [211] PN-EN ISO 10211:2008 Mostki cieplne w budynkach – Obliczanie strumieni ciepłych i temperatury powierzchni – Część 2: Liniowe mostki cieplne.
- [212] PN-EN ISO 14683:2008 Mostki cieplne w budynkach – Liniowy współczynnik przenikania ciepła – Metody uproszczone i wartości orientacyjne.
- [213] PN-EN ISO 10456:2009 Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
- [214] prEN 12494: Building components and elements – In situ measurements of the surface-to-surface thermal resistance – project normy europejskiej.
- [215] PN-EN ISO 13370:2008 – Ciepłne właściwości użytkowe budynków - Przenoszenie ciepła przez grunt – Metody obliczania.
- [216] PN-EN ISO 13789:2008 – Ciepłne właściwości użytkowe budynków – Współczynniki przenoszenia ciepła przez przenikanie i wentylację – Metoda obliczania.

Normy związane z badaniami termowizyjnymi

- [217] PN-EN 13187:2001: Właściwości cieplne budynków – Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni.
- [218] ASTM C 1060-90 (2003): Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings.

- [219] ASTM E 1186-03: Standard Practices for Air Leakage Site Detection in Building Envelopes and Air Barrier Systems.
- [220] ISO 6781:1983 Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method.
- [221] Canadian General Standards Board, Document 149-GP-2MP, Manual for Thermographic Analysis of Building Enclosures.
- [222] British Standard: Thermal performance of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method. ISO6781:1983 modified. Canadian National Master Specifications (NMS), Section 02 27 13, Thermographic Assessment; Building Envelope.
- [223] CP 189:1989 Standard and Qualification and certification of NDT personnel. ASNT 1989,
- [224] ISO 9712:1992 Non destructive testing – qualification and certification of personnel.
- [225] EN 473:1993 Qualification and certification of NDT personnel – general principles.
- [226] ISO/IEC 17024:2003 Conformity assessment – General requirements for bodies operating certification of persons.
- [227] ISO 20473:2007 Optics and photonics. Spectral bands.
- [228] ISO 18436-1:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for training and certification of personnel. Requirements for certifying bodies and the certification process.
- [229] ISO 18436-3:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for training and certification of personnel. Requirements for training bodies and the training process.
- [230] ISO 18436-7:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for training and certification of personnel. Part 7: Thermography.
- [231] ISO/DIS 6781-3:2010 Performance of buildings – Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods – Part 3 – Qualifications of equipment operators, data analysts and report writers.

Application of infrared thermography in building

In Poland infrared thermography survey in building has a tradition of over 40 years and from the very beginning it has been applied in particular to testing buildings since it is an effective method for thermal diagnostics of buildings. The method is used primarily for qualitative assessment of building envelope with respect to correct selection (designing and performance) of thermal insulation in partitions, location of thermal bridges, and contamination of partitions by moisture, identification of places with excessive air infiltration through building partitions and to test failures of installations in buildings. Infrared camera inspection may also be applied to other structures like reservoirs, silos, installation networks and industrial chimneys, heating networks, bridges, road pavement on bridges, etc.

Thermography of buildings is now one of the most popular and acceptable applications of infrared inspections. However, it is not an easy inspection method since it relies on a relatively rarely applied quantitative assessment of building partitions with respect to their thermal properties. Furthermore, it is often very difficult to use in most often applied and seemingly routine qualitative inspection of partitions, even for experienced infrared camera operators. Thermograms are easy to make while they are difficult to interpret, even by experienced thermographers.

Infrared thermography is a very efficient and effective tool to locate hidden defects in building envelope by locating surface anomalies of temperature distribution on external surfaces of partitions. In each case, heat flow through parts of a defective partition results in temperature differences in external surfaces of partitions which is due to different heat conductivity of materials, their geometric layout and heat capacity of materials. Each anomaly in temperature distribution on partition surfaces identified with an infrared camera should be analysed precisely in reference with the structure of the partition, applied materials, conditions of temperature function and conditions of the inspection.

Infrared measurements of a building include non-destructive assessment and control of thermal condition of the surface. This is a testing method which on the basis of temperature distribution on the surface of the inspected element provides for anticipating or identifying thermal damage to the elements without contact, destruction or invasion. With that measuring method it is also possible to identify contamination of partitions by moisture (including condensation contamination), excessive air infiltration through leaks in partitions and failures of water supply or heating installations. All stages of inspection are important in the infrared testing of buildings and other structures – from identifying the object of the inspection, through preparatory work, performance of the tests, computer analysis of thermograms, interpretation of thermograms until drafting of reports from the inspection. The most important problem in infrared inspections in building (and in other testing areas) is correct interpretation of thermograms, assuming all required conditions for the inspection have been satisfied. Operators of infrared cameras may not be restricted solely to handling the camera and making thermograms – the key task is a comprehensive analysis and in-depth interpretation of thermograms and subsequently formulating the conclusions and recommendations for the principal. This is one of the most difficult and responsible stages in infrared

survey. Infrared camera operators should be well prepared technically to perform inspections in building, have the required know-how in general construction industry, building materials, building physics and the principles applying to making and interpreting thermograms. Also much experience in making the measurements is important.

The Author with over 30 years of experience in such inspections, has made an attempt at arranging and presenting the know-how required for correct performance of infrared camera inspections in building, primarily to inspect buildings – from the moment preparations to work are made through correct performance until correct interpretation of thermograms and developing a final report. The book also tries to provide comprehensive explanation on the impact of long-wave radiation of the external environment on the building and their mutual thermal radiation interaction the results of which are recorded and visualised with infrared cameras. The work places special attention on clarification of physical phenomena occurring during heat exchange by thermal radiation (also called long-wave, infrared or temperature radiation) and by convection between the building envelope and the thermal environment as well as on problems related to correct interpretation of thermograms.

The book presents theoretical background of performing infrared inspections in building – a presentation is made of heat exchange through building envelope, problems related to occurrence of thermal bridges in buildings and their impact on temperature distribution in external surfaces of building partitions, heat exchange by radiation as well as radiation and convection heat exchange between the building and the thermal environment. Additionally, problems are presented related to application of infrared surveys in building – the essence of infrared inspection, the procedure and rules applicable to inspections, infrared quantitative tests, factors affecting precision of measurements, issued related to interpretation of thermograms, examples of application in construction (scope of tests, inspection of various buildings, identification of thermal bridges, inspections of balconies, roofs, heated floors, inspections of historical buildings, inspections of windows and glazed façades, inspections of bridges, including road pavements on bridges, air thermography and other specific applications) and the proposed content of the inspection report.

This work is a summary of many years of Author's experience in thermal diagnostics of various buildings and infrared inspections of buildings and other structures. The Author trusts that this book will be a handy tool for persons starting infrared inspections in building and for those who are advanced in such inspections. On the other hand, the Author realises that despite having tried to discuss in detail the issues related to heat exchange through building partitions, radiation impact of the external environment on buildings, performing infrared inspections in construction and interpretation of thermograms this book does not exhaust all the topics.



Dr hab. inż. Henryk Nowak, prof. PWr. jest kierownikiem Zakładu Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1983 w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, a doktora habilitowanego w roku 1999 na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego tej samej uczelni. Od 1993 roku jest członkiem Sekcji Fizyki Budowli KILiW PAN. Jest również członkiem Komitetu Technicznego KT nr 179 ds. Ochrony Ciepłej Budynków oraz KT nr 307 ds. Zrównoważonego Budownictwa Polskiego Komitetu Normalizacyjnego, członkiem Komisji Budownictwa i Mechaniki Oddziału Wrocławskiego PAN oraz członkiem IBPSA Poland (ang. *International Building Performance Simulation Association*). Posiada uprawnienia budowlane, jest rzeczoznawcą budowlanym w zakresie projektowania i wykonywania izolacji cieplnych, rzeczoznawcą mykologiczno-budowlanym oraz audytorem i certyfikatorem energetycznym.

Autor ma ponad 33-letnie doświadczenie w wykonywaniu badań termowizyjnych w budownictwie, a swoją karierę pomiarowo-badawczą w tym zakresie rozpoczął w roku 1978 z kamerą AGA Thermovision 680. Jest wykładowcą na kursach i szkoleniach w zakresie diagnostyki energetycznej budynków, termomodernizacji i certyfikacji energetycznej budynków oraz zastosowania badań termowizyjnych w budownictwie.

Książka jest przeznaczona dla inżynierów i techników, którzy używają kamer termowizyjnych w swojej pracy w diagnostyce termicznej budynków i innych obiektów budowlanych, dla studentów wyższych uczelni na kierunkach: budownictwo, architektura i inżynieria środowiska wyższych uczelni technicznych, dla inżynierów tych specjalności oraz dla wszystkich zainteresowanych tą techniką pomiarową.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w księgarni „Tech”
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-676-7