

# ZASTOSOWANIE TERMOWIZJI W PRZEMYSŁE CHEMICZNYM

Wspólną cechą wszystkich gałęzi przemysłu chemicznego jest zużywanie wielkich ilości energii pod przeróżnymi postaciami.

W warunkach wysokiego zużycia energii i wysokich temperatur występujących w procesach technologicznych nieocenionym narzędziem badawczym może i powinna być termowizja.

W zakładach azotowych jest zużywany gaz ziemny (metan) do produkcji nawozów i innych wyrobów oraz do podgrzewania w procesach technologicznych. Do podgrzewania używa się też przegrzanej pary dostarczonej przez własne elektrociepłownie (głównie węglowe).

W zakładach rafineryjnych i petrochemicznych podstawowym surowcem produkcyjnym jest ropa naftowa a dostarczycielem energii gaz ziemny, odpady surowcowe i węgiel.

W zakładach sodowych surowcem produkcyjnym jest sól kamienna i węgiel odsmołowany w postaci koksu a energetycznym – węgiel i coraz częściej gaz ziemny.

Produkcja cementu, zarówno metodą suchą jak i mokrą wymaga również wielkich ilości energii.

Wszystkie te procesy odbywają się w wysokich temperaturach i często przy wysokim ciśnieniu. W takich warunkach głównymi problemami są: izolacja cieplna, ale również kontrolowane rozpraszanie ciepła do otoczenia (chłodzenie) oraz wytrzymałość instalacji głównie związana z temperaturą i ciśnieniem.

## Co to jest termowizja?

Na to pytanie można odpowiedzieć krótko: jest to wizualizacja pola temperaturowego. Można też to określenie rozwinąć: obiekty, które oglądamy w świetle widzialnym, widzimy dzięki odbiciu światła słonecznego lub promieniowania innych źródeł światła, natomiast obiekty, które widzimy dzięki termowizji – świecą same; same są źródłem promieniowania wykorzystanego przez aparaturę termowizyjną. Dzieje się tak, ponieważ „każde ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnej wypromieniowuje energię w postaci promieniowania temperaturowego”. Związane jest to ze wzbudzeniem atomów spowodowanym przez ich ruch cieplny. „Świecenie” temperaturowe ciał

odbywa się w podczerwieni o tym krótszej długości fali im wyższa jest temperatura ciała, np.:

- dla ciał o temperaturze 20°C (ok. 300K) maksimum promieniowania przypada na ok. 10 μm;
- dla ciał o temperaturze 600°C (ok. 900K) – ok. 3 μm (część promieniowania odbywa się w czerwonym świetle widzialnym);
- dla ciał o temperaturze 6000K (słońce) maksimum promieniowania przypada na 0,5 μm (światło widzialne).

Obecnie zakres podczerwieni dzieli się umownie na cztery podzakresy: bliska, średnia, daleka, bardzo daleka. Kamery termowizyjne odbierają promieniowanie w średniej i dalekiej podczerwieni (3–5 μm i 7–15 μm) ze względu na własności transmisyjne powietrza i niektóre własności emisyjne ciał oraz odbicia słońca.

## Dlaczego termowizja?

Termowizja jako sposób badawczy pola temperaturowego łączy w sobie dwie podstawowe zalety: bezkontaktowy pomiar temperatury oraz możliwość obserwacji jej wartości równocześnie we wszystkich punktach badanego wycinka powierzchni. Zaletą pierwszą oznacza pomiar zdalny bez wpływu zastosowanego czujnika na wynik pomiaru – jak to się dzieje np. w przypadku termometrów stykowych oraz bez konieczności zbliżania się do obiektów niebezpiecznych (bardzo wysoka temperatura, napięcie itp.) bądź trudno dostępnych (instalacje, budynki wielokondygnacyjne, kominy). Jedynym warunkiem jest tu taki wybór stanowiska pomiarowego, który umożliwi obserwację wybranego fragmentu badanego obiektu oraz dobór optyki kamery termowizyjnej.

Dруга z zalet termowizji oznacza, że obraz rozkładu temperatury (pole temperaturowe) można zanalizować jednym spojrzeniem na ekran (wizjer) kamery ter-

mowizyjnej, bez potrzeby żmudnego zbierania informacji punkt po punkcie.

Wyklucza to sytuację, w której może umknąć uwadze jakakolwiek istotna informacja na skutek ograniczonego zagęszczenia siatki pomiarowej. Ważne też jest, że z wielu zalet (np. szybkość, obraz łatwy w interpretacji, rozległe pole badań, naturalny sposób lokalizacji wad, bezstykowość) najistotniejszą wydaje się, że doświadczony operator kamery, analizując otrzymane obrazy cieplne (termogramy) zaczyna rozumieć naturę pól temperaturowych, ich powiązania z konstrukcją i mechanizmy przepływu ciepła. Stany normalne, prawidłowe odróżnia od stanów anormalnych, które wymagają zwiększonej uwagi bądź interwencji. Zaczyna myśleć termalnie. Każdy, kto zetknął się z tą techniką, wie, że pola temperatury, do niedawna trudne do rozpoznania, są zbyt ważnym nośnikiem informacji o obiekcie żeby z nich nie skorzystać. A możliwości współczesnej termografii są ogromne.

Temperatura jest wszechobecnym parametrem naszej działalności. Każdy rodzaj energii ostatecznie zamienia się na ciepło – najczęściej rozpraszane do otoczenia. Zwykle jest to niezamierzone i stosuje się izolację cieplną aby zmniejszyć „straty” do minimum.

Niekiedy nadmierny wzrost temperatury sygnalizuje nieprawidłowość pracy. Rozpoznanie pola temperatury jest pierwszym i często podstawowym krokiem rozpoznania stanu technicznego obiektu.

## Możliwości współczesnej termowizji

Początki termowizji (THERMOVISION – nazwa zastrzeżona początkowo przez producenta urządzeń – szwedzką firmę AGA, później AGEMA obecnie FLIR SYSTEMS AB) służącej tylko dla celów wojskowych (obserwacja i wykrywanie), sięgają lat pięćdziesiątych. Termowizja cywilna, mająca cechy pomiarowe, rozwija się od końca lat sześćdziesiątych. Początkowo była to kamera z detektorem chłodzonym ciekłym azotem i blok wizyjny o łącznej wadze kilkudziesięciu kilogramów i poborze mocy kilkuset watów. Zdziwiająca była rozdzielczość temperaturowa sięgająca dziesiątych

części stopnia, zbliżona do osiągnięć współczesnych. Obraz cieplny w szeroko rozposzechnionym systemie AGA 680 składał się z 7 tysięcy pikseli (70 linii x 100 punktów w linii). Rejestracja obrazów cieplnych (termogramów) odbywała się na błonie fotograficznej. Było to jedyne, możliwe wtedy rozwiązanie, jednak nie najlepsze. Rejestracja foto nie poddaje się późniejszej obróbce; przekroczenie zakresu pomiarowego jest bezpowrotnym zgubieniem informacji.

Najnowsze, profesjonalne systemy termowizyjne przypominają kamery wideo lub aparaty foto. Początek nowej generacji kamer termowizyjnych z matrycą detektorów 320 x 240 pikseli dał system AGEMA 550 (detektor chłodzony – rok 1994). Jego rozwinięcia z niechłodzonym detektorem bolometrycznym począwszy od AGEMA 570 oraz FLIR 595 i 695 oraz rodzina kamer FLIR P i S (o numeracji 25, 45 i 65) uzyskiwały 25 lub 50 obrazów/sek. z rozdzielczością 320x240 pikseli i 14 bitów poziomów informacji dla każdego piksela. Obecnie rozdzielczości obrazowe są podniesione do 640x480 pikseli – jest to rodzina FLIR P oraz S o numerach 620, 640 i 660. Kamera waży ok. 1,7 kg a rejestracja termogramów odbywa się na kartach SD, mieszczących ponad tysiąc termogramów, z których każdy może zawierać dodatkowo 30 s. komentarz głosowy. Niektóre modele kamer umożliwiają rejestrację cyfrową do kilkudziesięciu minut filmu termicznego, w którym każda klatka jest aktywnym, normalnym termogramem. Wewnętrzne funkcje analityczne kamery umożliwiają natychmiastową analizę termogramu. Oprogramowanie komputerowe umożliwia również ich bogatą obróbkę (pomiar temperatury w punkcie, temperatura maksymalna, minimalna i średnia w obszarze, różne palety barw zobrazowania, profil temperatury wzdłuż dowolnej linii, histogram rozkładu temperatury z dowolnego obszaru itp.).

Przedstawiona wyżej rodzina kamer termowizyjnych FLIR serii P i S (trzy cyfrowa o rozdzielczości 640x480 pikseli) została uzupełniona niedawno rodziną kamer serii „T” tańszą i lżejszą (0,88 kg), o rozdzielczości obrazowej 320x240 pikseli, uchylnym obiektywem i nieco mniejszych możliwościach.

Jeszcze tańsze i lżejsze kamery serii „i” o numerach 40, 50 i 60 mają niewymienną optykę i masę około 600 g.

Masa najlżejszej kamery na rynku, FLIR i5 wynosi zaledwie 330 g.

Doświadczenie w produkcji kamer termowizyjnych firmy FLIR, kontakt z użytkownikami i wrażliwość na sygnały zwrotne dotyczące uniwersalizmu użytkownika kamer powoduje, że seria „i”, mimo że najprostsza i najtańsza ma jednak bardzo duże możliwości badawcze, wystarczające w wielu przemysłowych zastosowaniach.

Wyżej przedstawiono kamery przenośne z własnym zasilaniem, których można używać w każdym miejscu instalacji.

FLIR SYSTEMS produkuje jednak również kamery stacjonarne pozwalające na regulację procesu produkcyjnego na podstawie obserwowanego obrazu termicznego. Są to kamery serii A.

Wypada jeszcze wspomnieć o specjalistycznych kamerach do wykrywania gazów, typu GAS FindIR, wykrywających wycieki przez nieszczelności większości gazów używanych w przemyśle.

Otrzymane obrazy cieplne i ich najdoskonalsza nawet analiza nie są jednak ostatecznym, pożądanym przez nas wynikiem, mimo że pozwalają na rozpoznanie stanu termicznego powierzchni. Informacja o polu temperaturowym jest mało użyteczna dopóki nie nałoży się na nią informacji o warunkach pracy i budowie badanego obiektu, czyli o uwarunkowaniach technicznych i środowiskowych.

W sprawozdaniach z badań termograficznych są wymieniane wszystkie uwarunkowania (zgodnie z PN-EN ISO/IEC 17025: Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących, – p. 5.10.3 Sprawozdania z badań), które wpływają na wynik badań, a ich znajomość pozwala na obiektywizację i weryfikację wyników.

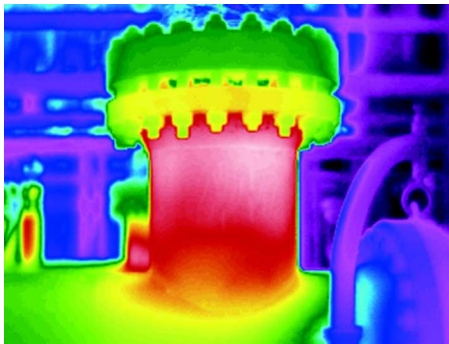
### Cechy instalacji ważne przy diagnostyce termowizyjnej

W dużych zakładach chemicznych mogą podlegać badaniom tysiące elementów instalacji o różnej wielkości, przeznaczeniu i budowie, zainstalowane na wielu kilometrach kwadratowych, często w gęstej zabudowie i na znacznej wysokości. Poniżej przedstawiono cechy instalacji ważne przy prowadzeniu badań termograficznych:

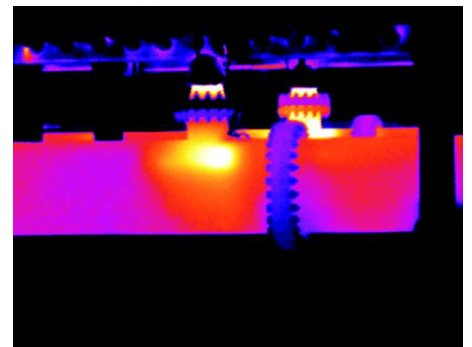
- „dostępność optyczna” elementu. Oznacza to, że element, aby mógł być zbadany nie może być niczym zasłonięty. Jeżeli dostępność jest zachowana to zwykle wystarcza dobór odpowiedniej optyki aparatury termowizyjnej (kąta widzenia obiektywu). Czasem problemem nie jest duża odległość i małe wymiary obiektu,

a przeciwnie, mała odległość i duże wymiary np. widok reaktora o średnicy kilku metrów z galerii na nim zamocowanej. W takiej sytuacji jedną z głównych cech aparatury termowizyjnej staje się wymiennosc obiektywu. Popularne kamery termowizyjne FLIR z serii T oraz P zapewniają wymiennosc optyki w ciągu kilku sekund i automatyczne rozpoznanie obiektywu przez kamerę. Ogólnie dostępne w zastosowaniach przemysłowych obiektywy o kątach widzenia od 8° (w poziomie) do 60°, a nawet 80° dają gwarancję przebadania wszystkich widocznych elementów instalacji niezależnie od ich wielkości i odległości;

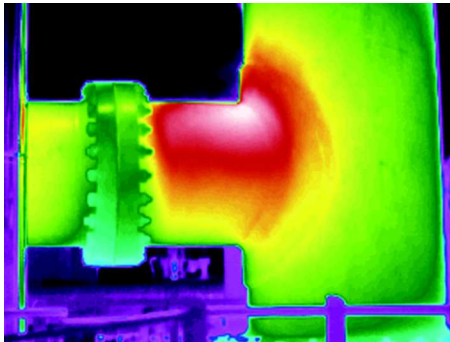
- rodzaj materiału powłokowego i stan powierzchni. Napotykamy tu olbrzymią różnorodność. Od silnie odbijających, jak blacha aluminiowa na rurociągach parowych, przez stale odporne chemicznie, nierdzewne, kwaso- i żaroodporne, przez zwykłą stal węglową bardziej lub mniej skorodowaną, powierzchnie zakurzone i zabrudzone oraz powierzchnie malowane. Farby powłokowe też są różne: zwykłe tj. chlorokauczukowe, ftalowe, akrylowe itp., przez „srebrzanki” do farb termoczułych. Ekipa termowizyjna działająca w danym zakładzie powinna, dla najczęściej spotykanych pokryć, mieć swój „bank współczynników emisyjności” wyznaczonych przy pomocy swojej aparatury. Skatalogowane dane są tylko pewnym przybliżeniem wartości odbieranych przez różne kamery, nawet produkowane przez jednego producenta, ze względu na różnice w konstrukcji detektorów i optyki. Większość produkowanych obecnie kamer to kamery „długofalowe”, to jest odbierające promieniowanie obiektu o długości fali 7 do 14 mikrometrów. Dla dużej liczby materiałów stosowanych w przemyśle chemicznym współczynnik emisyjności jest wyższy w tym zakresie długości fali niż w zakresie „krótkofalowym”. Wspomniane serie P, T oraz „i” kamer firmy FLIR posiadają optykę długofalową, co obok polepszenia emisyjności, a więc i wykrywalności różnic temperatury zapewnia również lepszą detekcję przy dużych, kilkusetmetrowych odległościach ze względu na lepszą transmisję atmosfery w paśmie długofalowym (ważne np. przy badaniu kominów);
- rodzaj izolacji. Główny podział ze względu na metodę badań termowizyjnych



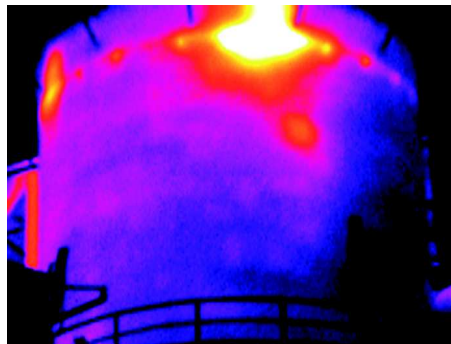
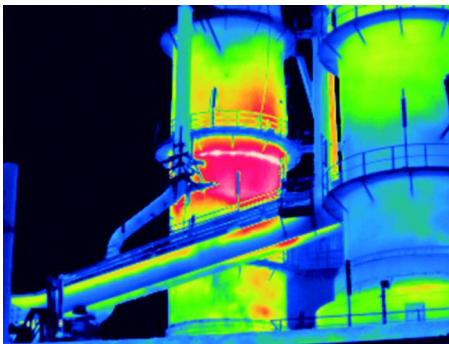
Oczekiwany, prawidłowy stan cieplny kolektora



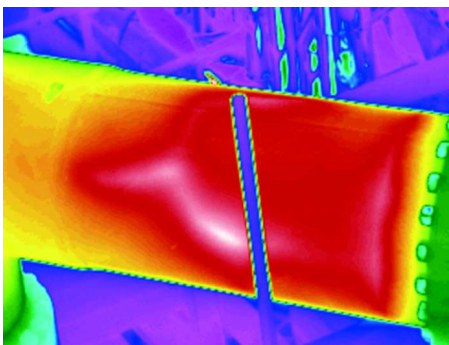
Kolektory amoniaku.  
Erozja wymurówki przy króćcu



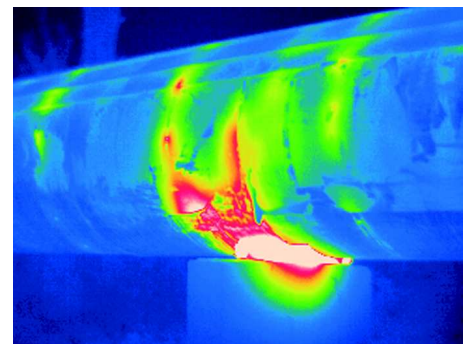
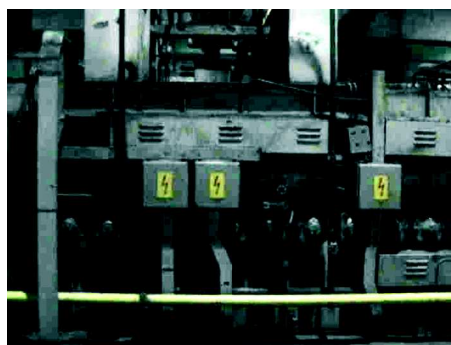
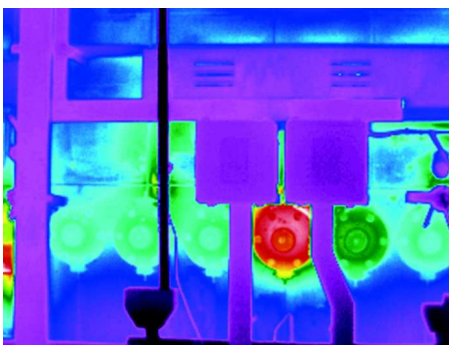
Uszkodzenia górnej części wymurówki



Rozwój wady wymurówki pieca w okresie 3 lat  
od 80°C do ponad 150°C



Kolektor poziomy z wadami wykonawczymi.  
Termogram wykonany kilka miesięcy po remoncie



Plamy ciepłe na powierzchni rurociągu  
związane z konwekcją od podpory

Łożyska pieca do odpuszczenia detali stalowych po hartowaniu

i pełnią funkcję to położenie względem instalacji wewnątrz lub na zewnątrz. Izolacja wewnętrzna jest stosowana w celu oddzielenia gorącego medium od płaszcza i obniżenia jego temperatury do wartości poniżej temperatury destrukcji, która jest różna przy różnych ciśnieniach i rodzajach zastosowanej stali. Uszkodzenia wewnętrznej wymurówki są bardzo groźne w skutkach. Izolacja zewnętrzna jest stosowana w celu zmniejszenia strat ciepła do otoczenia a jej uszkodzenie może co najwyżej zakłócić proces produkcji i pogorszyć sprawność instalacji, a tylko w skrajnych przypadkach uniemożliwić produkcję;

- stabilność parametrów termicznych w funkcji czasu. Instalacje chemiczne pracują bez przerwy, całymi latami lub z krótkimi przerwami raz do roku, w zbliżonych parametrach technologicznych. Powierzchnie instalacji charakteryzują się względną stałością temperatury zależną tylko od warunków zewnętrznych. Ta cecha pozwala prowadzić termowizyjny monitoring elementu lub anomalii na powierzchni będącej odbiciem wady wewnętrznej. Dla bardzo ważnych elementów instalacji, sprawdzanych cyklicznie monitoring pola temperatury może być prowadzony za pomocą specjalnego oprogramowania wprowadzonego przez firmę FLIR dla obiektów kontrolowanych przy pomocy kamer termowizyjnych tej firmy.

### Metodyka badań

O rzetelności przeprowadzonych badań, a więc o trafności późniejszej diagnozy decydują następujące etapy metody i prowadzenia badań:

- ustalenie, sprecyzowanie celu badań;
- rozpoznanie obiektu badań;
- rozpoznanie warunków środowiskowych i technicznych pracy obiektu;
- ustalenie warunków technicznych wykonania zadania;
- wykonanie badań;
- wykonanie sprawozdania;
- odbiór pracy przez zleceniodawcę.

### Ustalenie celu badań

Każde badanie ma określony cel. W praktyce termograficznej nie powinno być pojęcia „zbadań” obiektu. Zawsze jest to podporządkowane jakiemuś celowi. Przez rozpoznanie stanu termicznego instalacji (elektrycznej, ciepłowniczej, chemicznej...), budynku, komina, kotła lub tym podobnych. następuje, przykładowo:

- podjęcie decyzji o kolejności i zakresie remontu lub dalszej pracy bez konieczności remontu;
- wytypowanie obiektu do wymiany;
- znalezienie przyczyny wadliwej pracy obiektu;
- sprawdzenie poprawności rozkładu temperatury obiektu nowego lub po wykonanych pracach remontowych.

Najogólniej chodzi o zachowanie sprawności i wydajności instalacji z uwzględnieniem bezpieczeństwa pracy ludzi.

Ustalenie celu badań powinno nastąpić w drodze uzgodnień ze Zleceniodawcą i mieć formę pisaną. (np. „Protokół uzgodnień wstępnych” ).

### Rozpoznanie obiektu badań

Dzięki jasno postawionemu celowi przez zleceniodawcę (wewnętrznego lub zewnętrznego) rozpoznanie obiektu badań odbywa się w sposób świadomy.

Poszukujemy istotnych cech obiektu, które mogą wpływać na uzyskany obraz cieplny oraz cech, które wpływają na interpretację uzyskanych termogramów.

Pierwsze z nich to przykładowo stan i emisyjność powierzchni. Drugie to znajomość konstrukcji podpowierzchniowej, grubości, współczynnika przewodnictwa cieplnego i ciepła właściwego, istnienie warstw, przekładek itd.

Nie każda „plama cieplna” jest wadą! Niektóre istnieją w sposób organiczny, są związane z konstrukcją. Wykonawca badań rejestruje obraz cieplny świadomie a nie wszystko co zobaczy.

Późniejsza interpretacja uzyskanych obrazów cieplnych jest oparta o znajomość konstrukcji obiektu, materiałów i ich podstawowych parametrów fizykochemicznych.

Dlatego też jest pożądane aby zarówno w czasie badań, jak i w procesie interpretacji wyników uczestniczył przedstawiciel zleceniodawcy, znający konstrukcję i materiał obiektu badań.

### Rozpoznanie warunków środowiskowych i technicznych obiektu

Prawidłowo dokonany pomiar rozkładu temperatury opiera się na znajomości współczynnika emisyjności obiektu i temperatury otoczenia oraz innych czynników środowiskowych, których wartości, zgodnie z procedurą pomiarową są wprowadzane do kamery przed wykonaniem obserwacji i rejestracji.

Pewne wątpliwości dotyczące wartości tych parametrów są rozwiązywane zgod-

nie” ze zdrowym rozsądkiem”. Jak np. zdefiniować temperaturę otoczenia dla obiektu i kamery gdy obiektem jest korona komina w EC? Jaką w tej sytuacji przyjąć prędkość wiatru? Jak zdefiniować temperaturę w pomieszczeniu dla obiektów pod sufitem i przy podłodze, gdy istnieje między tymi wartościami duża różnica?

Trzeba również pamiętać o stabilności parametrów środowiskowych i to w o tyle dłuższym okresie, im większy, o większej bezwładności cieplnej jest obiekt.

Warunki techniczne dotyczą przede wszystkim stabilności głównych parametrów pracy (obciążenia) obiektu gdyż wpływa to na temperaturę powierzchni, a nawet na jej rozkład. Dotyczą również stabilności pracy wszystkich urządzeń towarzyszących, które mogą mieć wpływ konwekcyjny lub promienisty na obiekt badań.

### Ustalenie warunków technicznych wykonania zadania

Wyróżniamy następujące warunki techniczne wykonania zadania obciążające zleceniodawcę:

- musi być zapewniony dostęp optyczny do powierzchni podlegających badaniu pod odpowiednim kątem i z odpowiedniej odległości;
- w momencie pomiaru i wcześniej obiekt musi być odpowiednio obciążony;
- obiekt musi być „podstawiony” do badań we właściwym czasie, miejscu i bez zbędnych obciążeń biurokratyczno-formalnych. (Często zdarza się, że na słowo „kamera” ochrona reaguje: „nie!” );
- jest niezbędna asysta przedstawiciela zleceniodawcy znającego obiekt, jego historię, uwarunkowania techniczno-regulacyjno-eksploatacyjne itp.

Po stronie wykonawcy leży rozpoznanie możliwości wykonania zadania pod względem merytorycznym, tj. czy istnieją warunki wystąpienia pola temperatury na możliwej do obserwacji powierzchni obiektu i czy istnieje korelacja pola temperatury ze stanem wewnętrznym.

### Wykonanie badań

Wykonanie badań powinno być zgodne z zasadami badań termograficznych.

Oznacza to, że:

- wykonawcą badań powinien być pracownik o odpowiednim przygotowaniu ogólnym, odpowiednim przeszkoleniu i doświadczeniu oraz wiedzy o obiekcie;
- badanie powinno odbyć się przy pomocy odpowiedniego sprzętu;

- obiekt badań powinien być odpowiednio przygotowany i obciążony;
- badania powinny odbywać się wyłącznie w odpowiednich warunkach środowiskowych (zaniechać badań przy ekstremalnych temperaturach, wietrze, promieniowaniu, mgle lub mżawce, obiekcie zbyt małym w stosunku do odległości i używanej optyki itp.);
- operator wykonujący badanie powinien natychmiast reagować na stwierdzone znaczne anomalie w rozkładzie i wartości temperatury powiadamiając o tym użytkownika obiektu.

### Wyniki badań

Wyniki badań termograficznych powinny zawierać:

- listę zbadanych elementów, ich umiejscowienie i stan pracy;
- listę wszystkich nie zbadanych elementów i przyczyny np. niedostępność, zasłonięcie, brak obciążenia itp.;
- termogramy miejsc potencjalnego zagrożenia (ekstremalne temperatury, nietypowe rozkłady i wartości pól temperaturowych);

- wydzieloną listę elementów wadliwych wraz z warunkami ich pracy (obciążenia, otoczenia) i klasyfikacją.

### Wykonanie sprawozdania

Wspomniana norma PN-EN ISO/IEC 17025 „Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących” w punkcie 5.10.3 „Sprawozdania z badań” nakłada na wykonawcę badań obowiązek umieszczenia w sprawozdaniu szeregu danych formalnych i merytorycznych (wykonawca, obiekt, metoda, warunki, czas, miejsce, wyniki itp.) umożliwiając późniejsze odtworzenie wszystkich istotnych parametrów badawczych.

Sprawozdanie z badań termograficznych zawsze zawiera termogramy. Na ogół są zamieszczone w formie „raportów” na wydzielonych stronach raportowych. Oprogramowanie pozwala na dowolną konstrukcję strony, gdzie obok danych uzyskanych w badaniu jest możliwe przedstawienie wymaganych danych formalnych a także własnych sugestii i wniosków.

Wykonawca pracy nie powinien jednak nadużywać tych możliwości, gdyż nikt lepiej jak zleceniodawca (właściciel obiektu badań) nie zna uwarunkowań determinujących dalsze postępowanie. Wykonawca powinien raczej przedstawić wyniki badań w formie umożliwiającej podjęcie decyzji, niż decydować za zleceniodawcę.

### Odbiór pracy

Odbiór pracy odbywa się w siedzibie zleceniodawcy blisko obiektu badań, aby możliwe było wyjaśnienie wszystkich wątpliwości na miejscu.

Odbiór powinien być zakończony protokołem w jednoznaczny sposób stwierdzającym wykonanie zadania.

**Włodzimierz Adamczewski**  
TERMO-POMIAR, autoryzowany Dystrybutor kamer termowizyjnych  
FLIR SYSTEMS AB