

WYZNACZENIE RZECZYWISTEJ TEMPERATURY POWIERZCHNI KOMINÓW STALOWYCH METODĄ TERMOGRAFIICZNĄ

DETERMINING REAL TEMPERATURE OF STEEL CHIMNEY SURFACE USING THERMOGRAPY METHOD

Alina Wróbel¹, Andrzej Wróbel²

¹ Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, AGH w Krakowie

² Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, AGH w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: termografia, kominy stalowe, temperatura, temperatura otoczenia, kontaktowy pomiar temperatury

STRESZCZENIE: Montaż kominów stalowych wymaga wyznaczenia kształtu ich osi. Pomiar geodezyjne powinny charakteryzować się dużą dokładnością i dotyczyć stanu spoczynkowego komina. W przypadku montażu komina wybór warunków obserwacji nie jest możliwy. Odchylenie osi komina od linii pionu wyznaczone w warunkach słonecznej pogody jest obciążone sprężystym ugięciem trzonu spowodowanym nierównomiernym rozkładem temperatury na powierzchni płaszcza komina.

Rozważanym problemem jest uzyskanie rzeczywistych wartości temperatury na powierzchni płaszcza komina w sposób możliwie szybki i dokładny. Technika termografii umożliwia pozyskanie informacji o powierzchniowym rozkładzie temperatury w sposób szybki. Na dokładność otrzymanej wartości temperatury mają wpływ: współczynnik emisyjności powierzchni, temperatura i wilgotność powietrza, temperatura otoczenia. Problemem jest wyznaczenie temperatury otoczenia w przypadku, gdy otoczenie stanowi kilka ciał o różnych temperaturach.

Ekwiwalentną temperaturę otoczenia wyznaczono w sposób doświadczalny z kontaktowych i termograficznych pomiarów temperatury specjalnie przygotowanej próbki. Próbka została wykonana z tego samego materiału, co płaszcz komina i ustawiona na czas obserwacji w pobliżu komina, a więc jej otoczenie było tożsame z otoczeniem komina.

Przeprowadzone doświadczenie pokazuje, że w słoneczny dzień nie można utożsamiać ekwiwalentnej temperatury otoczenia z temperaturą powietrza. Przy bezchmurnym nieboskłonie we wczesnych godzinach rannych i późnych popołudniowych temperatura otoczenia jest niższa od temperatury powietrza, a w środku dnia jest dużo od niej wyższa.

1. WPROWADZENIE

Współczesne kominy wymagają coraz bardziej precyzyjnego montażu i zaawansowanej diagnostyki stanu konstrukcji. Istotnym elementem brany pod uwagę przy montażu jak również w diagnostyce stanu konstrukcji komina jest kształt i wychylenie od pionu osi trzonu komina. Dopuszczalne odchyłki montażu zależą od rodzaju konstrukcji i dla komina stalowego wynoszą 0.0005 wysokości komina (Wróbel, Kędziński, 2012).

Odchylenia osi trzonu komina od linii pionu powinny być wyznaczone z dużą dokładnością. Średni błąd kwadratowy wyznaczenia wychylenia wierzchołka komina, będący miarą dokładności pomiarów powinien być kilkukrotnie mniejszy od takiej wartości wychylenia, którą można by uznać za istotną.

Współczesne metody pomiarowe oraz dostępność bardzo precyzyjnego sprzętu pozwalają na przeprowadzanie pomiarów z bardzo dużą dokładnością. Częstość wpływ czynników zewnętrznych (insolacja, zachmurzenie, wiatr, promieniowanie ciepłe urządzeń przemysłowych itp.) może być wielokrotnie większy niż dokładność przeprowadzanych pomiarów.

W przypadku oceny stanu konstrukcji komina istotne jest wyznaczenie wychylenia osi jego trzonu w stanie spoczynkowym, czyli między innymi nieobciążonym wpływem nasłonecznienia. Praktycznie bardzo rzadko jest możliwe prowadzenie prac montażowych połączonych z pionowaniem elementów konstrukcji komina w warunkach braku nasłonecznienia. Dlatego istotne jest oszacowanie wpływu insolacji, a co zatem idzie wyznaczenie rzeczywistej temperatury powierzchni komina. Pozyskanie informacji o powierzchniowym rozkładzie temperatury w sposób szybki umożliwia pomiar termograficzny. W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności należy uwzględnić między innymi wpływ promieniowania otoczenia.

Przyjęcie temperatury otoczenia jako równej temperaturze powietrza prowadzić może do błędnych wyników, natomiast analityczne wyznaczenie ekwiwalentnej temperatury otoczenia jest często niemożliwe.

Autorzy proponują wyznaczenie ekwiwalentnej temperatury otoczenia na drodze pomiarowej.

2. WYZNACZENIE RZECZYWISTEJ TEMPERATURY OBIEKTÓW

Temperatura jest skalarną wielkością fizyczną, jednym z parametrów określających stan układu termodynamicznego. Temperaturę termodynamiczną interpretuje się, jako miarę średniej energii kinetycznej ruchu cząstek. Pomiar temperatury należy do najtrudniejszych w technice cieplnej (Bakinowska *et al.* 1995). Zawsze jest pomiarem pośrednim. W pomiarze wykorzystuje się cechy ciał termometrycznych zależne bezpośrednio od temperatury. Są to najczęściej zmiany: objętości cieczy i gazów, długości ciał stałych, rezystancji, napięcia elektrycznego na styku dwóch metali, emitowanego promieniowania cieplnego. Termometr mierzy swoją własną temperaturę, a temperaturę mierzonego ciała osiąga w stanie równowagi termodynamicznej z mierzonym obiektem. Równowaga termodynamiczna osiągana jest poprzez wymianę ciepła między termometrem i danym ciałem. Ta wymiana ciepła zachodzi na drodze: przewodzenia, konwekcji i promieniowania. Jeżeli w procesie pomiaru temperatury wymiana ciepła między termometrem i danym ciałem zachodzi na drodze przewodzenia lub konwekcji, to wymagany jest kontakt termometru z danym ciałem i mamy do czynienia z kontaktową metodą pomiaru. Jeśli element termometryczny (czujnik) odbiera promieniowanie ciepłe, to pomiar jest bezkontaktowy.

2.1. Kontaktowy pomiar temperatury

Pomiar temperatury metodami kontaktowymi należy do najczęściej spotykanych w praktyce. Ma wiele zalet, z których najważniejsze to: duża różnorodność, prosta budowa i duża dokładność termometrów. Jednak kontaktowe metody pomiaru temperatury mają również sporo wad a mianowicie:

- zakłócanie pola temperatury mierzonego obiektu,
- konieczność kontaktu z mierzonym ciałem (niemożliwe dla obiektów pod napięciem elektrycznym, pozostających w ruchu, odległych),
- trudność wykonania pomiarów temperatury szybkozmiennnej z uwagi na stałe czasowe,
- konieczność ochrony termometru przed promieniowaniem otoczenia (nie będącego mierzonym ciałem),
- zapewnienie dobrego styku termometru z mierzonym ciałem.

Wymienione wady powodują powstanie mniejszych lub większych błędów pomiarowych lub wręcz uniemożliwiają wykonanie pomiaru. Błędy można ograniczyć przez stosowanie odpowiednich technik pomiaru np. stosowanie past dobrze przewodzących ciepło – zapewniających uzyskanie dobrego styku termometru z powierzchnią obiektu; stosowanie osłon przed niepożądanym promieniowaniem. Jednak pomimo przestrzegania procedur pomiarowych nie zawsze można jednoznacznie stwierdzić, co tak naprawdę mierzył termometr

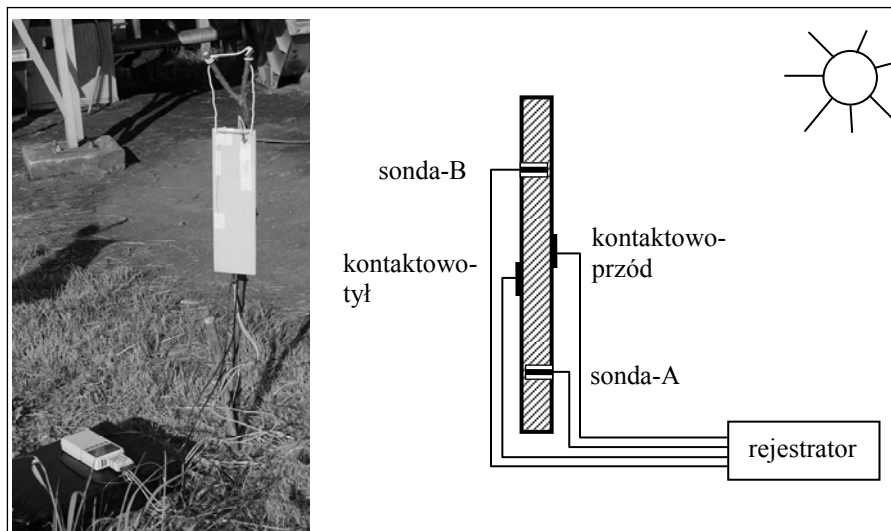
W celu zilustrowania problemów z kontaktowym pomiarem temperatury płaszczka kominu stalowego w czasie słonecznego dnia wykonano następujące doświadczenie. Na próbce blachy stalowej o grubości 5 mm (wykonanej z tego samego materiału i pomalowanej w ten sam sposób, co komin stalowy) zamontowano 4 termopary typu K (NiCr-Ni) firmy Ahlborn o dokładności odczytu 0.1°C , w sposób pokazany na rysunku 1. Dwie przyklejono do powierzchni po obu stronach blachy, a dwie umieszczono w otworach o głębokości 4 mm, przy wszystkich zastosowano pastę dobrze przewodzącą ciepło. Blacha była zawieszona pionowo, zewnętrzną stroną w kierunku SEE tak, aby słońce nie świeciło na wewnętrzną część blachy (gdy słońce osiągnęło kierunek SSW blacha znalazła się w cieniu). Czujnik temperatury (i wilgotności) powietrza był zawieszony na wysokości około 1.5 m nad powierzchnią terenu i był osłonięty walcem z białego papieru o średnicy około 12 cm; po godzinie 12:00 znalazł się w cieniu. Słońce świeciło cały dzień. Wyniki pomiaru temperatury powietrza i blachy rejestrowane w pamięci rejestratora, przedstawiono na rysunku 2.

Przed wschodem słońca (wschód słońca o godz. 5:02 a zachód o 20:10) temperatura blachy mierzona przez wszystkie termopary miała podobną wartość i była niższa około 1.5°C od temperatury powietrza, co związane jest z chłodzącym działaniem bezchmurnego nieboskłonu. Po wschodzie słońca temperatura blachy rosła znacznie szybciej niż temperatura powietrza, co jest zgodne ze zjawiskiem nagrzewania promieniowaniem słonecznym.

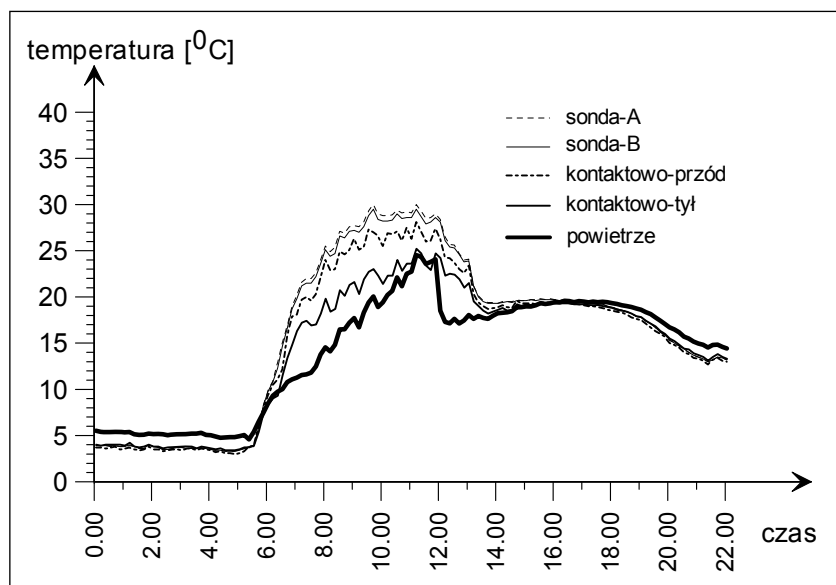
Wartość temperatury otrzymana z pomiaru termoparami umieszczonymi w otworach wykonanych w blasze jest zbliżona do siebie i w dalszym postępowaniu zostanie przyjęta jako rzeczywista temperatura blachy.

Trudna do wytłumaczenia jest rozbieżność wartości temperatury blachy wskazywanej przez termopary przyklejone do powierzchni blachy. Rozbieżność wskazań tych

termometrów dochodziła do 4°C, a różnica ich wskazań w stosunku do termopar umieszczonych w otworach do 6.5°C. Należy nadmienić, że w czasie testów w pomieszczeniu o ustabilizowanej temperaturze różnica wskazań poszczególnych termopar wynosiła maksymalnie 0.2°C.



Rys. 1. Próbką stalowej blachy i schemat kontaktowego pomiaru jej temperatury



Rys. 2. Wartości temperatury powietrza i blachy stalowej z pomiaru kontaktowego

Na wynik kontaktowego pomiaru temperatury ma wyraźny wpływ temperatura powietrza w bliskim otoczeniu termopary. W czasie trwania pomiarów temperatura powietrza po obu stronach blachy była praktycznie taka sama. Różnica wartości temperatury po obu stronach blachy wynikająca z przepływu strumienia ciepła słonecznego o gęstości około 500 W/m^2 w czasie lokalnego południa (Chwieduk, 2006), dla stalowej blachy o grubości 5 mm i przewodności cieplnej 58 W/m^2 wynosi około 0.04°C .

2.2. Bezkontaktowy pomiar temperatury

Bezkontaktowy pomiar temperatury oparty jest na detekcji promieniowania podczerwonego. Zasada ta wykorzystywana jest w pirometrii i termografii. Najważniejszą zaletą termografii jest fakt, że umożliwia uzyskanie powierzchniowego rozkładu temperatury badanego obiektu w postaci obrazowej.

Urządzenie termograficzne dokonuje pomiaru promieniowania docierającego do jego detektora. W przypadku obiektów rzeczywistych (a nie ciała doskonale czarne) promieniowanie to jest sumą składowych (The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professional):

- promieniowania własnego obiektu,
- promieniowania otoczenia odbitego od obiektu,
- promieniowania atmosfery znajdującej się pomiędzy obiektem a obiektywem urządzenia rejestrującego promieniowanie,

które wyraża się zależnością:

$$W_t = \varepsilon\tau W_o + (1 - \varepsilon)\tau W_r + (1 - \tau)W_a \quad (1)$$

gdzie:

- W_t - moc sygnału odbieranego przez detektor,
- W_o - moc promieniowania odpowiadająca temperaturze obiektu T_o ,
- W_a - moc promieniowania odpowiadająca temperaturze atmosfery T_a ,
- W_r - moc promieniowania odpowiadająca temperaturze otoczenia T_r ,
- ε - współczynnik emisyjności obiektu,
- τ - współczynnik transmisji atmosfery.

Temperatura jest określona prawidłowo dla całej powierzchni termogramu pod warunkami:

- emisyjność obiektu w całym polu widzenia kamery jest znana i jednakowa,
- obiekt odbija promieniowanie w sposób całkowicie dyfuzyjny (lambertowski),
- otoczenie obserwowanego obiektu jest jednoelementowe, o znanej temperaturze i promieniuje jak ciało doskonale czarne,
- znana jest odległość pomiędzy obiektem i obiektywem kamery, i w przestrzeni tej panuje standardowa atmosfera o znanej temperaturze i wilgotności.

Największy wpływ na dokładność wyznaczenia temperatury ma błąd wyznaczenia emisyjności powierzchni obiektu. Wartość współczynnika emisyjności można przyjąć na

podstawie tablic lub wyznaczyć z pomiarów prowadzonych według różnorodnych procedur (Więcek i De Mey, 2011; Wróbel, 2010).

Dużą trudność sprawia w praktyce wyznaczenie temperatury otoczenia. Przez otoczenie obiektu rozumie się półsferę rozciągającą się przed powierzchnią obiektu. Dla obliczenia wartości temperatury wyznaczonej metodą termograficzną przyjmuje się, że półsfera ta charakteryzuje się jednakową temperaturą na całej powierzchni i emituje promieniowanie tak, jak ciało doskonale czarne.

W praktyce ciała tworzące otoczenie mogą charakteryzować się różną temperaturą powierzchni i różnymi wartościami współczynników emisyjności. W przypadku otoczenia złożonego z ciał o różnych temperaturach powierzchni, należy wprowadzić pojęcie ekwiwalentnej temperatury otoczenia. Przez ekwiwalentną temperaturę otoczenia należy rozumieć taką temperaturę jednorodnej półsfery, od której do obserwowanego obiektu będzie docierało takie samo natężenie promieniowania, jak od otoczenia rzeczywistego. Ekwiwalentna temperatura otoczenia ma charakter lokalny, jej wartość zależy od miejsca położenia rozpatrywanego punktu na powierzchni obrazowanego obiektu (Kruczek, 2009).

Temperatury otoczenia nie należy utożsamiać z temperaturą powietrza i mierzyć termometrem na stanowisku kamery termowizyjnej, bo tylko wyjątkowo temperatura otoczenia może być równa temperaturze powietrza. Dla otoczenia utworzonego z układu kilku ciał o znanych temperaturach i prostych układach geometrycznych, współczynniki konfiguracji (Wiśniewski, 1994) i ekwiwalentną temperaturę otoczenia można wyznaczyć w sposób analityczny (Kruczek, 2009) przy założeniu, że badany obiekt odbija promieniowanie w sposób dyfuzyjny.

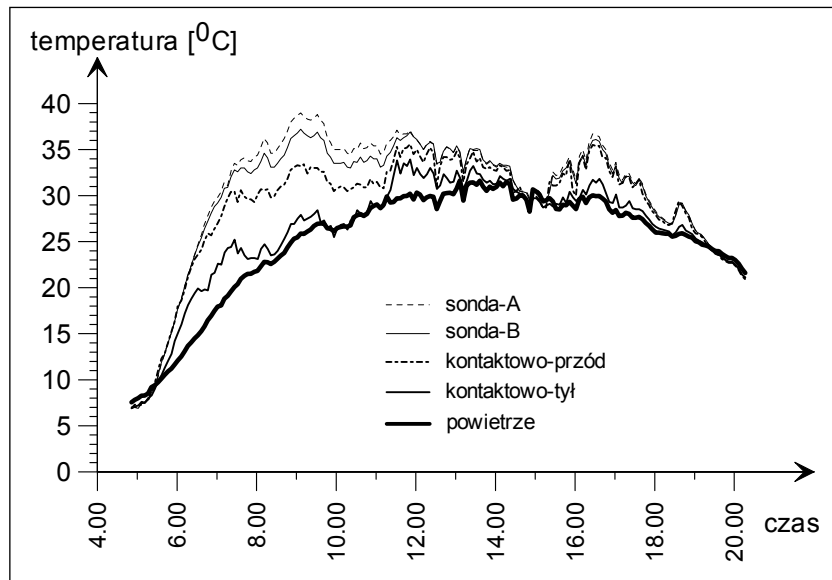
Trudne jest wyznaczenie temperatury otoczenia wówczas, gdy stanowi ono skomplikowaną konfigurację ciał o różnych temperaturach. Dla otoczenia rzeczywistego, złożonego z licznych obiektów o różnych temperaturach, oraz dla złożonych układów geometrycznych, wyznaczenie ekwiwalentnej temperatury otoczenia na drodze obliczeniowej może być bardzo pracochłonne i niedokładne. Wtedy należałoby wyznaczyć ekwiwalentną temperaturę otoczenia na drodze pomiarowej.

3. WYZNACZENIE TEMPERATURY OTOCZENIA

Otoczeniem komina jest przestrzeń nieboskłonu wraz z promieniującym Słońcem w ciągu dnia oraz powierzchnia terenu wraz z obiektami budowlanymi. Wartości temperatury poszczególnych elementów otoczenia są zróżnicowane i zmienne w ciągu doby. Zmienność ta wynika ze zmieniającego się promieniowania słonecznego, powodującego również zmiany wartości temperatury obiektów na powierzchni terenu oraz zmiennego zachmurzenia.

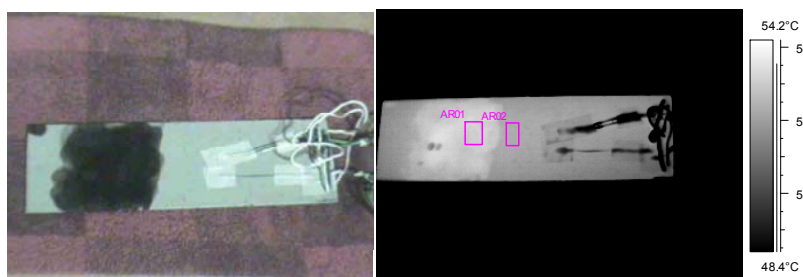
Ekwiwalentną temperaturę otoczenia komina stalowego wyznaczono z pomiarów termograficznych próbki blachy stalowej opisanej w podrozdziale 2.1. Próbka blachy, identyczna do tej, z której wykonano komin, została zawieszona pionowo nieopodal komina. Założono, że otoczenie próbki blachy jest identyczne z otoczeniem komina. Kontaktowo mierzono wartości temperatury powietrza w pobliżu próbki oraz temperaturę próbki w sposób opisany w podrozdziale 2.1. Podobnie jak w poprzednim eksperymencie (podrozdział 2.1) stwierdzono rozbieżność wartości temperatury blachy wskazywanej przez

termopary (rys. 3). Jedynie w okolicach godziny piętnastej, gdy płytka znalazła się w cieniu sąsiedniego budynku, wskazania wszystkich termopar były w miarę zgodne. Jako rzeczywistą wartość temperatury próbki blachy przyjęto wyniki z sondy B z przewodami wprowadzonymi po zacienionej stronie blachy (rys. 1).



Rys. 3. Wartości temperatury powietrza i blachy stalowej umieszczonej w sąsiedztwie kominia z pomiaru kontaktowego w dniu 21.05.2012

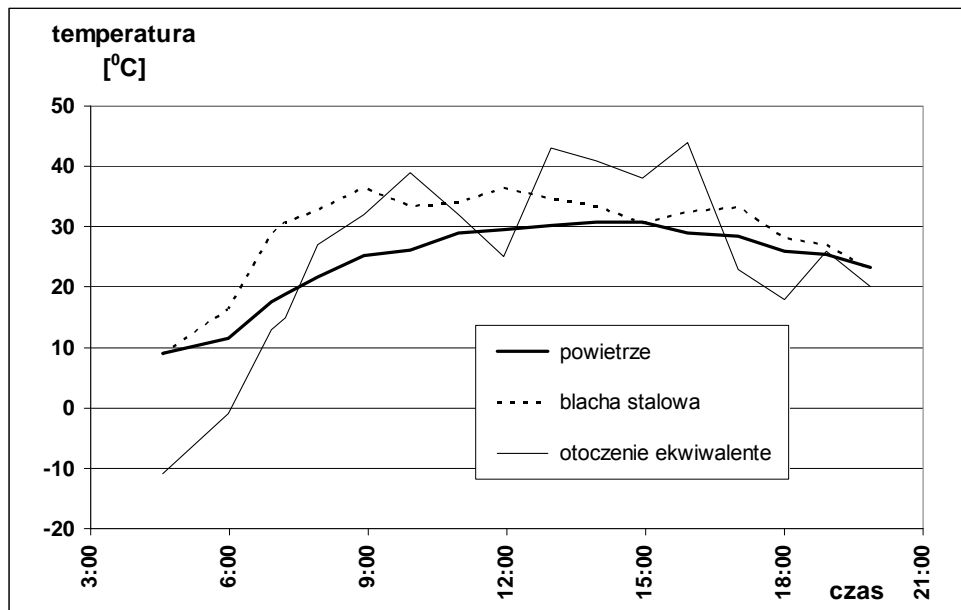
Wartość współczynnika emisyjności powierzchni blachy wyznaczono z laboratoryjnych pomiarów termograficznych (rys. 4) przy znajomości rzeczywistej temperatury próbki i dodatkowo emisyjności fragmentu powierzchni próbki pokrytej sadzą. Wyniosła ona 0.92.



Rys. 4. Próbką blachy i jej termogram służące do wyznaczenia współczynnika emisyjności

W czasie pomiarów termograficznych kominia wykonywano również termogramy próbki blachy. Termogramy te posłużyły do wyznaczenia ekwiwalentnej temperatury otoczenia w następujący sposób. Znając wartość współczynnika emisyjności próbki

wartości temperatury rzeczywistej próbki i powietrza dobierano wartość temperatury otoczenia tak, by otrzymać temperaturę próbki z pomiaru termograficznego równą temperaturze rzeczywistej. Wartości wyznaczonej w ten sposób temperatury otoczenia przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Ekwiwalentna temperatura otoczenia komina w dniu 21.05.2012 wraz z temperaturą powietrza i rzeczywistą temperaturą próbki

Ekwiwalentna temperatura otoczenia wyznaczona w otwartej przestrzeni w pobliżu komina wykazuje dużą zmienność w ciągu doby. Przed wschodem słońca jest znacznie niższa od temperatury powietrza za przyczyną bezchmurnego nieboskłonu o niskiej temperaturze spektralnej. Po wschodzie słońca ekwiwalentna temperatura otoczenia wyraźnie wzrasta. W późnych godzinach popołudniowych spada za przyczyną chmur przesłaniających słońce, a wieczorem przy gęstniejących chmurach wysokich i zanikającym promieniowaniu słonecznym zbliża się do temperatury powietrza.

4. PODSUMOWANIE

W dobie rosnących dokładności pomiarów geodezyjnych i fotogrametrycznych coraz większego znaczenia nabiera znajomość temperatury obiektów pomiaru, narzędzi pomiarowych i środowiska pomiaru.

Kontaktowe metody pomiaru temperatury nie zawsze pozwalają na otrzymanie zadowalających dokładności a dużą ich wadą jest punktowy charakter pomiaru.

Technika termografii z uwagi na obrazowy charakter powierzchniowego rozkładu temperatury znajduje coraz szersze zastosowanie w różnych dziedzinach techniki. Jednak do otrzymania poprawnych wartości temperatury wymagana jest znajomość współczynnika

emisyjności, temperatury i wilgotności atmosfery, odległości obrazowania oraz temperatury otoczenia. Wyznaczenie temperatury otoczenia w przypadku, gdy utworzone jest ono z obiektów o różnych wartościach temperatury i złożonej konfiguracji nie jest zagadnieniem łatwym. Autorzy proponują wyznaczenie ekwiwalentnej temperatury otoczenia w sposób pomiarowy z wykorzystaniem próbki o znanej emisyjności i temperaturze rzeczywistej i ustawionej w terenie w taki sposób by otoczenie próbki można było uznać za równoważne otoczeniu obiektu.

W przypadku pomiaru temperatury powierzchni komina ważna jest dokładność wyznaczenia jej różnicy w naprzeciwległych punktach obwodu. Ponieważ naprzeciwległe punkty charakteryzuje inne otoczenie to ekwiwalentną temperaturę otoczenia należy wyznaczać dla każdej obrazowanej strony komina. Różnica ekwiwalentnej temperatury otoczenia obu stron badanej płyty stalowej dochodziła do 20°C.

Ekwiwalentna temperatura otoczenia na otwartej przestrzeni zależy od warunków pogodowych i zmienia się wraz z nimi w ciągu doby i tylko w niektórych przypadkach równa jest temperaturze powietrza.

5. LITERATURA

- Bakinowska K. i inni, 1995: *Pomiary cieplne*, wyd. II, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Chwieduk D., 2006: Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku, *prace IPPT PAN nr11*.
- Kruczek T., 2009: Wyznaczanie radiacyjnej temperatury otoczenia przy pomiarach termowizyjnych w otwartej przestrzeni, *Pomiary Automatyka Kontrola nr11*.
- The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professional, Published by FLIR S IR Systems Incorporated, www.infraredresearchcameras.com, 1 800 464 6372.
- Więcek B., De Mey G., 2011: *Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania*, Wydawnictwo PAK, ISBN 978-83-926319-7-2.
- Wiśniewski S., Wiśniewski T., 1994, *Wymiana ciepła*, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, ISBN 83-204-1810-0.
- Wróbel A., 2010: *Termografia w pomiarach inwentaryzacyjnych obiektów budowlanych*, Kraków Wydawnictwa AGH, Rozprawy Monografie, ISSN 0867-6631, ISBN 978-83-7464-309-2.
- Wróbel A., Wróbel A., Kędziński M. Termografia a w pomiarach inwentaryzacyjnych kominów przemysłowych –cz. I i II, *Inżynier budownictwa nr 02 i 03 /2012*.

DETERMINING REAL TEMPERATURE OF STEEL CHIMNEY SURFACE USING THERMOGRAPY METHOD

KEY WORDS: thermography, steel chimneys, temperature, background temperature, contact temperature measurement

Summary

Assembly and technical evaluation of a steel chimney both require determining shape of its axis. Because permissible deflection of the top of a steel chimney shaft relative to the base according to the PN-B-06200 norm is: 30 mm when height < 50 m and $0.0006 \cdot \text{height}$ when height > 50 m, geodetic measurements should be performed with high accuracy. Additionally, the measurements should be performed when deflection of the chimney is not influenced by sun and wind. Deflection measured in a sunny weather is influenced by elastic deflection caused by uneven temperature distribution in the chimney shaft. In practice, the measurements should be done before the sunrise or on a cloudy day. However, during chimney assembly it is often not possible to choose conditions of measurement.

For steel chimneys of cylindrical shape without thermal insulation inside, the direction of elastic deflection is not very different from the direction of sun's rays, and its value can be calculated from dimensions of the chimney and temperature differences on its circumference.

The problem discussed in this article is measuring the real temperature of the outer surface of a chimney in a possibly fast and accurate way. Thermography allows acquiring the surface temperature distribution quickly (in a few minutes). The accuracy of the measured values is influenced by: emissivity coefficient of the chimney surface, air temperature and humidity and background temperature. The biggest problem is determining background temperature if the surroundings consist of a few objects with different temperatures.

The equivalent background temperature was determined from thermographic and contact temperature measurements of a specially prepared sample. The sample was produced from the same material as the steel chimney, covered with the same paint and the measurements were performed near the chimney, so the surroundings were similar to the surroundings of the chimney.

Conducted experiment shows that on a sunny day the background temperature cannot be assumed equal to the air temperature. In cloudless conditions in the early morning or the late afternoon the background temperature is lower than the air temperature, and around the noon it is much higher. Only in the low overcast conditions the background temperature becomes close to the air temperature.

Dane autorów:

Dr hab. inż. Alina Wróbel
e-mail: alibel@agh.edu.pl
telefon: +48 12 617 22 69
fax: +48 12 617 50 76

Dr inż. Andrzej Wróbel
e-mail: awrobel@agh.edu.pl
telefon: +48 12 617 38 26
fax: +48 12 617 50 76