

Precyzyjny układ pomiarowy do wzorcowania termometrów radiacyjnych

Superior measuring system for calibration of radiation thermometers

ROMAN WITKOWSKI, RAFAŁ MALINOWSKI, TOMASZ BAKOŃ

DOI 10.36119/15.2020.6.1

W artykule opisane zostały podstawy teoretyczne, konstrukcja i weryfikacja laboratoryjna prototypowego stanowiska umożliwiającego wzorcowanie termometrów radiacyjnych z dokładnością lepszą niż $0,5^{\circ}\text{C}$. Stanowisko zostało zaprojektowane i zbudowane w oparciu o ideę przyrządu wirtualnego. W zaprojektowanym przyrządzie cyfrowe przetwarzanie danych pomiarowych realizowane jest z wykorzystaniem platformy sprzętowej Arduino. Pozwoliło to na wzorcowanie termometrów radiacyjnych o dowolnym współczynniku emisyjności. Po zweryfikowaniu właściwości metrologicznych stanowiska określono składowe budżety niepewności, opracowano również metodykę w zakresie wzorcowania pirometrów i kamer termowizyjnych w zakresie pomiarowym od -20°C do $+80^{\circ}\text{C}$, czyli pozwalającą na wiarygodne przeniesienie spójności pomiarowej w zakresie najczęściej wykorzystywanym przez instalatorów.

Słowa kluczowe: termometria radiacyjna, pomiary temperatury, wzorcowanie

This article presents the theoretical foundations, construction and laboratory verification of a prototype test stand for calibration of radiation thermometers with an accuracy better than 0.5°C . The stand was designed and built based on the idea of a virtual instrument. In the designed prototype, the digital processing of measurement data is carried out using a platform with an Arduino hardware. This enabled calibration of radiation thermometers with any emissivity factor. After verifying the metrological properties of the test stand, the components of the uncertainty budget were determined, and a methodology for calibrating of radiation thermometers and thermal imaging cameras with the measurement range from -20°C to $+80^{\circ}\text{C}$ (in the range most often used by installers) was developed.

Keywords: radiation thermometry, temperature measurements, calibration

Wprowadzenie

Termometry radiacyjne są coraz częściej stosowane do pomiarów temperatury, pozwalają na szybki pomiar, jednocześnie umożliwiając jego dokonanie bez konieczności bezpośredniego kontaktu przyrządu pomiarowego z obiektem pomiarowym. Ich zastosowanie nie ogranicza się tylko do pomiarów wysokich temperatur, mogą być wykorzystywane także do monitorowania systemów klimatyzacji, lokalizacji wilgotności ścian i sufitów, itp.

Termometria radiacyjna opiera zasadę swojego działania na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego [7]. Każde ciało oprócz zdolności do emisji promieniowania może również absorbować, odbijać lub przepuszczać promieniowanie podczerwone w zależności od swojej temperatury. Emisja, absorpcja i transmisja są różne dla różnych materiałów i zależą od powierzchni materiału.

W celu opisanego zjawiska można posłużyć się teorią promieniowania ciała doskonale czarnego. Pojęcie ciała doskonale czarnego wprowadzono w celu uniezależnienia wyników pomiarów od rodzaju materiału oraz od jakości jego powierzchni dla określenia ciała pochłaniającego całkowicie padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od temperatury tego ciała, kąta padania i widma padającego promieniowania. Ogólne prawo promieniowania ciała doskonale czarnego zostało sformułowane przez Maxa Plancka. Współczynnik pochłaniania dla takiego ciała jest równy jedności dla dowolnej długości fali. Ciało doskonale czarne nie istnieje w rzeczywistości, ale dobrym jego modelem jest duża wnęka z niewielkim otworem, pokryta od wewnątrz czarną substancją (np. sadzą). Powierzchnia otworu zachowuje się niemal jak ciało doskonale czarne – promieniowanie wpadające do wnęki odbija się wielokrotnie od jej ścian i jest niemal całkowicie pochłaniane, natomiast

parametry promieniowania wychodzące z jej wnętrza zależą tylko od temperatury wewnątrz wnęki [5].

Ze względu na właściwości emisyjne ciało można je podzielić na dwie zasadnicze grupy: ciała szare - współczynnik emisyjności w interesującym przedziale długości fal jest stały, względny rozkład widmowy mocy promieniowania jest taki sam jak ciała doskonale czarnego w tej samej temperaturze oraz ciała promieniujące selektywnie, dla których współczynnik emisyjności zależy od długości fali, a rozkład widmowy mocy może odbiegać znacznie od promieniowania ciała doskonale czarnego.

W tabeli 1 przedstawiono wartość współczynnika emisyjności dla wybranych materiałów.

Przyjmując za kryterium zakres wykorzystywanego przez pirometr widma promieniowania można wyróżnić następujące typy pirometrów: pirometry całkowitego promieniowania (radiacyjne): detektor jest czuły na bardzo szeroki zakres promieniowania – reaguje na sygnał będący sumą

mgr inż. Roman Witkowski, <https://orcid.org/0000-0003-1457-1245>, inż. Rafał Malinowski, <https://orcid.org/0000-0002-9026-7993> - Instytut Energetyki, Instytut Badawczy, Laboratorium Aparatury Pomiarowej; dr inż. Tomasz Bakoń, <https://orcid.org/0000-0002-2028-6881> - Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Inżynierii Mechanicznej
Adres do korespondencji/Correspondence author: roman.witkowski@ien.com.pl, rafal.malinowski@ien.com.pl, tomasz_bakon@sggw.pl

Tabela 1. Wartość współczynnika emisyjności wybranych materiałów [11]
Table 1. Emissivity factor value of selected materials [11]

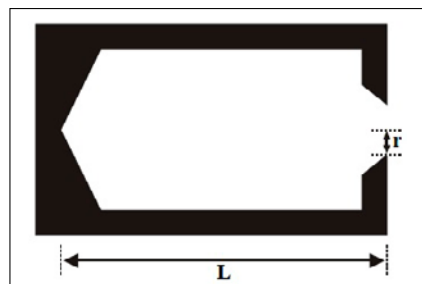
Materiał	Temperatura [°C]	Współczynnik emisyjności, ε
Aluminium z chropowatą powierzchnią	20 ÷ 50	0,06 ÷ 0,07
Aluminium silnie utlenione	50 ÷ 500	0,2 ÷ 0,3
Blacha stalowa walcowana	50	0,56
Brąz chropowaty	50 ÷ 150	0,55
Chrom polerowany	50	0,1
Lód kryształ	-10	0,98
Miedź utleniona	50	0,6 ÷ 0,7
Papier biały	20	0,7 ÷ 0,9
Sadza	20 ÷ 400	0,95 ÷ 0,97
Warstwa wody na powierzchni metalowej	20	0,98
Woda (warstwa o grubości większej niż 0.1 mm)	0 ÷ 100	0,95 ÷ 0,98
Skóra ludzka	30	0,98 ÷ 1,0

promieniowania o różnych długościach fal (teoretycznie od 0 do ∞); pirometry pasmowe: detektor reaguje na promieniowanie z wybranego zakresu (pasma): pirometry barwowe (chromatyczne), jednobarwowe (monochromatyczne), dwubarwowe (bichromatyczne), trójbarwowe (trichromatyczne) i wielobarwowe, w których detektor jest czuły na jedną (dwie lub trzy lub więcej), określoną długość fali. Szczegółowe charakterystyki poszczególnych typów pirometrów można znaleźć w literaturze, np. w [5].

Ważnym czynnikiem zapewniającym poprawność pomiarów jest zbudowanie układu pomiarowego tak, aby pole widzenia pirometru (powierzchnia, z której promieniowanie jest uwzględniane) było jednolite. Odpowiada wyznaczeniu właściwej odległości pirometru od mierzonej powierzchni i porównaniu jej wymiarów z polem widzenia pirometru [5]. Można ją określić poprzez kąt widzenia α lub współczynnik odległościowy d/D wyznaczający stosunek odległości d pirometru od obiektu do minimalnej, wymaganej jego średnicy D. Wartość współczynnika d/D w praktycznych konstrukcjach zawiera się najczęściej w przedziale 10 ÷ 300.

Model stanowiska pomiarowego

Zbudowanie stanowiska do wzorcowania termometrów radiacyjnych w zakresie temperatur środowiskowych wymaga konstrukcji ciała o emisyjności bliskiej jedności. Optymalnym rozwiązaniem spełniającym to wymaganie jest techniczne ciało czarne o budowie wnękowej (rys. 1.). Przybliżoną



Rys. 1.
Ciało czarne w formie wnęki
Fig. 1. Cavity Black-body

wartość współczynnika emisyjności takiego emitera ε_{CBB} można wyliczyć ze wzoru:

$$\epsilon_{CBB} = 1 - (1 - \epsilon_s) \left(\frac{r}{L} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie: wymiary geometryczne r i L są przedstawione na rys. 1, ε_s – współczynnik emisyjności powierzchni emitera.

Na współczynnik emisyjności ma wpływ również rozkład temperatury wewnątrz wnęki. Szczególnie istotny jest rozkład temperatury podstawy emitera (dna). Temperatura samej szczeliny nie ma dużego wpływu na wypadkową wartość emisyjności emitera.

W celu utrzymania stabilności temperatury ciała i minimalizacji gradientu temperatury emiter został zamknięty w płaszczu olejowym z termostyzowaną w układzie zewnętrznym i pompowaną do płaszczu cieczą (rys 2.).

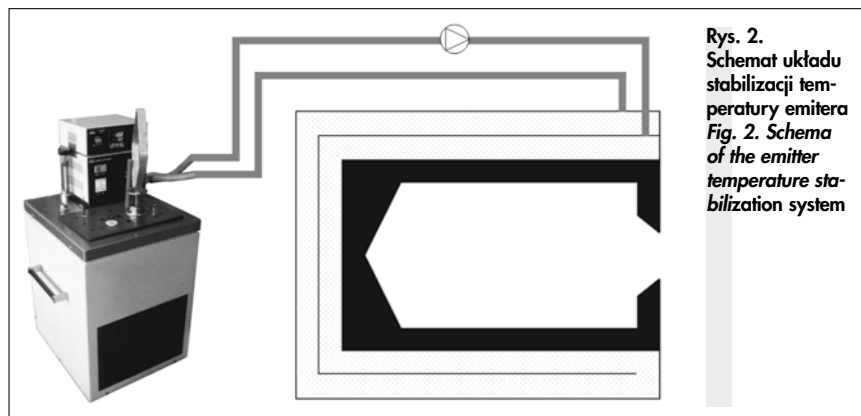
Oprócz minimalizacji gradientu temperatury należy pokryć wnętrze emitera farbą o dobrych właściwościach emisyjnych. Pokrycie powierzchni wpływa na równomierność współczynnika emisyjności w funkcji długości fali. Użyty materiał powinien również mieć dobre właściwości emisyjne ze względu na kąt padania promieniowania. Dla stali współczynnik emisyjności zależy w znacznym stopniu od tego kąta i może się zmieniać nawet do 90%. Dodatkowo same zjawisko odbicia ma różny charakter w zależności od materiału powierzchni. Dla metali odbicie ma

charakter geometryczny lustrzany, celowe jest wybranie materiału o współczynniku odbicia o charakterze rozproszonym.

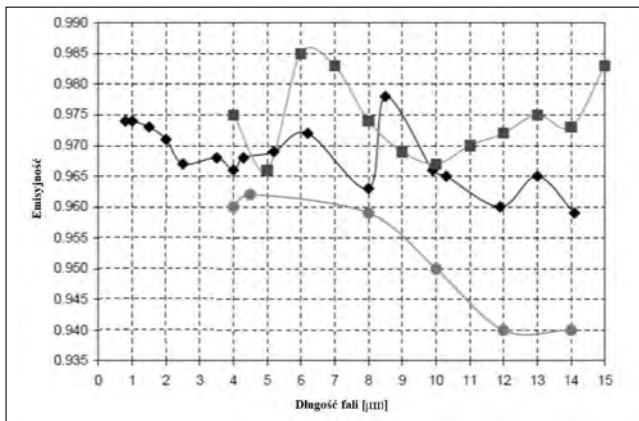
Ze względów konstrukcyjnych przyjęto długość ciała L = 250 mm i średnicę apertury 20 mm. Powierzchnię wewnętrzną pokrytą farbą o współczynniku emisyjności równym 0,97. Dla tak przyjętego modelu otrzymano emisyjność powyżej 0,9999. Współczynnik emisji emitera wykonanego z utlenionej stali nierdzewnej jest bliski 0,9. Wypadkowa wartość emisyjności wnęki – zgodnie ze wzorem (1) – wyniesie ok. 0,9998. Przewodność cieplna stali nierdzewnej wynosi 15 Wm⁻¹K⁻¹. Dla porównania dla miedzi współczynnik wynosi 393 Wm⁻¹K⁻¹ a dla brązu 130 Wm⁻¹K⁻¹. Dla zaproponowanego rozwiązania współczynnik stali nierdzewnej jest wystarczający. Jednorodność temperatury zapewnia przepływ cieczy w płaszczu emitera.

Powierzchnia emitera została pokryta farbą Nextel 811-21. Farba zawiera ok. 20% węgla i ok. 80% dwutlenku krzemu. Farba jest powszechnie używana w metrologii radiacyjnej. Na rys. 3 przedstawiona jest emisyjność farby Nextel w funkcji długości fali. Farba Nextel rombami. Jak wynika z rysunku widoczna jest niewielka zależność emisyjności od długości fali. Dla przedziału od 1 μm do 14 μm emisyjność farby jest nie mniejsza niż 0,955. Na rys. 4 przedstawiona jest zależność emisyjności farby Nextel od kąta obserwacji. W budowanym prototypie ciała kąt stożka na dnie emitera wynosi 75°, zgodnie z rys. 4 farba pokrywająca emiter ma maksymalny kąt promieniowania nie większy niż 50° i dla stosowanych w pomiarach długości fal emisyjność farby zmienia się nie więcej niż 0,01. Zgodnie z [3] współczynnik rozproszenia D dla farby Nextel 811-21 wynosi 0,9; a przewodność cieplna 1 Wm⁻¹K⁻¹.

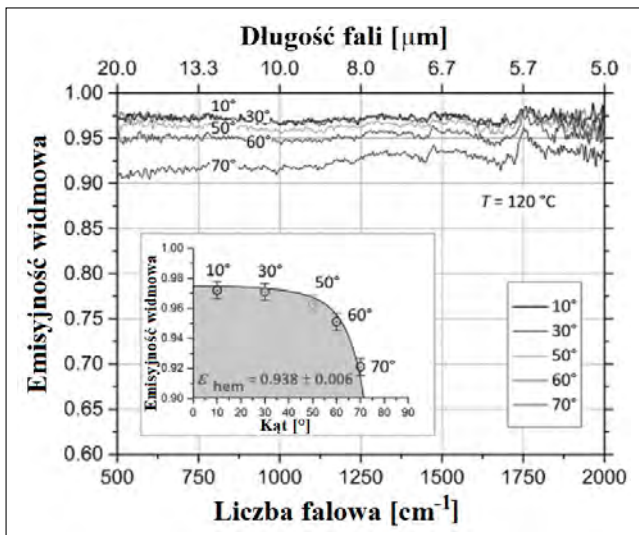
Projekt zakłada pracę wnęki ciała czarnego w zakresie od -20°C do +80°C. W tabeli 2 przedstawiono zależność emisyjności farby od temperatury. Jak wynika z tabeli zmiana nie przekracza 0,005.



Rys. 2.
Schemat układu stabilizacji temperatury emitera
Fig. 2. Schema of the emitter temperature stabilization system



Rys. 3. Widmowa emisyjność farby Nextel (wybrana farba romby) [2]
Fig. 3. Spectral emissivity of Nextel paint (selected paint with diamonds) [2]

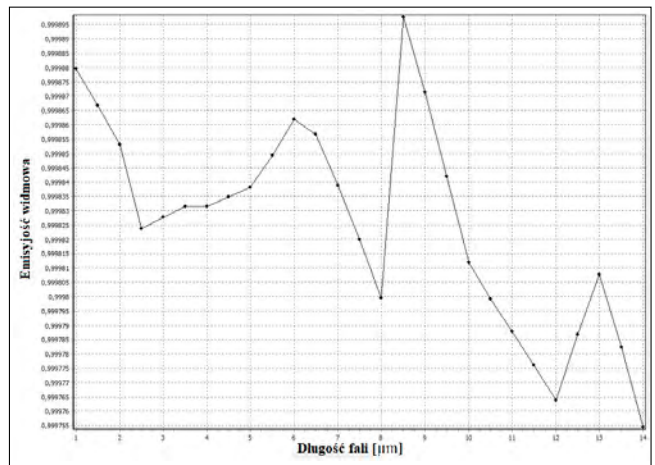


Rys. 4. Emisyjność farby Nextel 811-21 w funkcji kąta [1]
Fig. 4. Nextel 811-21 paint emissivity as an angle function [1]

Tabela 2. Emisyjność farby Nextel 811-21 [9]
Table 2. The emissivity of Nextel 811-21 paint [9]

Temperatura [°C]	-36	-18	0,5	35	64	82
Emisyjność	0,974	0,975	0,973	0,975	0,970	0,973
Niepewność	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004

Właściwości emisyjne zaprojektowanego emitera zasymulowano za pomocą oprogramowania STEEP321 firmy Virial [12]. Wersja bezpłatna oprogramowania umożliwia obliczenia z zastosowaniem do 1000 promieni. W oprogramowaniu do modelowania wykorzystano metodę Algorytmów Monte Carlo. Obliczenia oparte są na zasadzie wzajemności optycznej i technice śledzenia promieni wstecznych. Analizowana jest trajektoria promieniowania padającego do wnętrza emitera aż do momentu opuszczenia emitera. Analizowane są odbicia od ścian wnętrza. Wyznaczana jest droga promieniowania, aż do momentu, gdy energia stanie się mniejsza od przyjętego progu. Do obliczeń wykorzystywane są bezpośrednio zależności całkowite opisujące prawo Plancka [10]. Na podstawie analizy wyznaczone są podstawowe charakterystyki emitera m.in. emisyjność. Dokładność obliczeń Monte Carlo jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z ilości promieni. Ponieważ oprogramowanie w wersji demo pozwala na przeprowadzenie obliczeń dla 1000 promieni, stosując je, wyznaczono emisyjność z dokładnością 0,001. Wyniki symulacji pokazują, że spektralny współczyn-

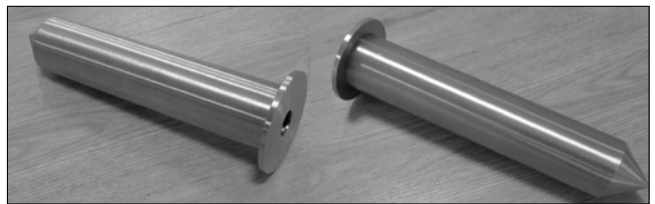


Rys. 5. Emisyjność widmowa modelu emitera uzyskana w symulacji przeprowadzonej w STEEP321
Fig. 5. The spectral emissivity of the emitter model obtained in the simulation using STEEP321 software

nik emisyjności emitera jest większy niż 0,999 (rys. 5.), co należy uznać za bardzo dobry wynik.

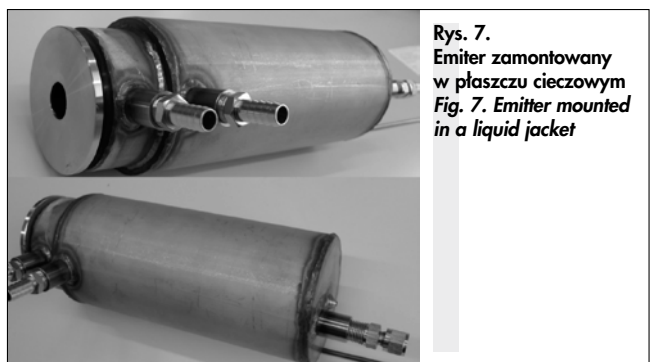
Budowa stanowiska

Głównym elementem prototypowego stanowiska jest emiter wykonany zgodnie z opisanym projektem, jego wykonanie przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Prototypowe emitory wykonane zgodnie z projektem
Fig. 6. Prototype emitters made according to the design

W następnym etapie wykonano płaszcz pozwalający na przepływ cieczy wokół emitera. Gotowy element widoczny jest na rys. 7. W górnej części zdjęcia widoczne są króćce doprowadzające ciecz do płaszcza, w części tylnej widoczna jest dławica na czujnik pomiarowy Pt-100.



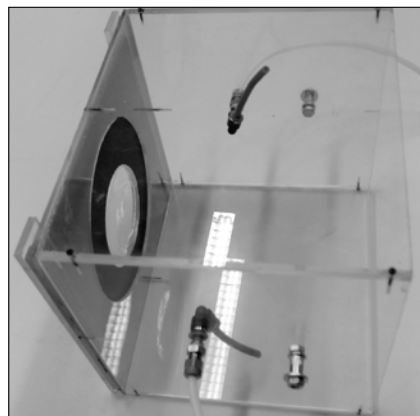
Rys. 7. Emiter zamontowany w płaszczu cieczowym
Fig. 7. Emitter mounted in a liquid jacket

Dla zapewnienia jak najlepszych warunków izolacji cieplnej, gotowy element umieszczono w obudowie i zaizolowano wełną ceramiczną (rys. 8). Dodatkowo - dla temperatur pracy poniżej temperatury punktu rosy - izolację zabezpieczono przed zawilgoceniem, doprowadzając perforowaną rurką suchy gaz (azot techniczny o przepływie 2 l/min) w pobliżu chłodnych elementów (rurka na rys 8).



Rys. 8. Emiter wraz z płaszczem w obudowie termoizolacyjnej
Fig. 8. Emitter with a jacket in a thermal insulation housing

Całość zamknięto w obudowie, wypełniając izolacją termiczną w postaci wełny ceramicznej. W celu zabezpieczenia wnętrza ciała czarnego przed wpływem wilgoci z otoczenia zaprojektowano specjalną osłonę z pleksiglasu (rys. 9), w której wymuszono przepływ azotu. Osłona montowana jest do czoła ciała czarnego,



Rys. 9. Komora doprowadzająca suchy gaz w pobliżu aparatury emitera
Fig. 9. Supply chamber delivering dry gas near the emitter apparatus



Rys. 10. Prototyp urządzenia podłączony do zewnętrznego urządzenia termostaticznego
Fig. 10. Prototype connected to an external thermostatic device

nadciśnienie powstałe na skutek dopływu gazu suchego nie pozwala na przenikanie pary wodnej do wnętrza emitera.

Rys. 10. przedstawia zrealizowane urządzenie pracujące z pośrednim układem wymiany ciepła.

Układ regulacji temperatury. Sterowanie temperatury technicznego ciała czarnego oparto na układzie pośrednim z czynnikiem roboczym w postaci oleju. Ciecz termostatyzowana jest w układzie zewnętrznym i pompowana do płaszcza, w którym jest zamknięty emiter. W celu wyeliminowania wpływu temperatury otoczenia na ciało doskonale czarne układ regulacji zaprojektowano jako kaskadowy układ regulacji oparty o dwie pętle PID (rys. 11).

Obiektem sterowania jest temperatura wnętrza technicznego ciała czarnego. Wnętkę umieszczono w płaszczu olejowym, który jest termostatyzowany w zewnętrznym zbiorniku. Układ regulacji można podzielić na dwie części - szybką i wolną. Część szybką stanowi termostat cieczowy. Temperatura wnętrza technicznego ciała czarnego jest częścią wolną (duża stała czasowa). Zakłóceniem w systemie jest temperatura otoczenia, która może ulegać zmianom na skutek działania klimatyzacji. Dzięki rozdzieleniu układu sterowania na dwie części i posłużeniu się dwoma pętlami PID możliwe jest reagowanie z wyprzedzeniem na zakłócenie.

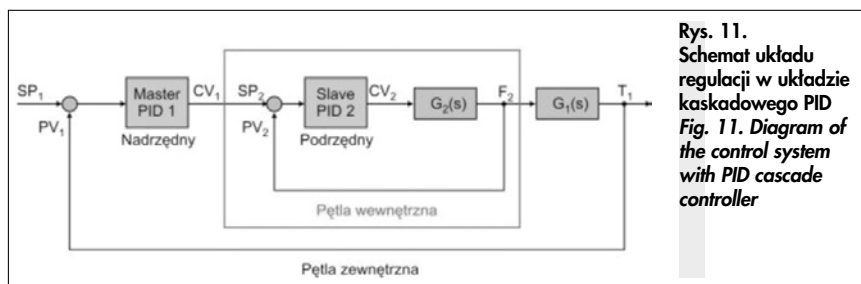
Istotą regulacji kaskadowej jest podział odpowiedzi układu na dwie części - „szybką” $G_2(s)$ i „wolną” $G_1(s)$ oraz wyodrębnienie wielkości pomocniczej, która w tym przypadku jest temperaturą cieczy, a nie temperaturą wnętrza ciała czarnego T_1 . Regulator PID2 służy do regulacji temperatury oleju w termostacie. Dysponu-

jąc pomiarem temperatury oleju można odpowiednio szybko reagować na zmianę temperatury otoczenia, zapewniając tym samym dobrą kompensację zakłóceń. Rolą PID1 jest właściwa regulacja temperatury T_1 - podaje on do regulatora PID2 wartość temperatury oleju. W strukturze kaskadowej PID1 jest określany jako regulator główny, natomiast PID2 jako pomocniczy. W prototypie zastosowano gotowy blok realizujący układ „kaskady PID” firmy Eurotherm z regulatorem Eurotherm 3508, jako regulatorem zewnętrznej pętli sterowania, i regulatorem 3216 jako regulatorem pętli wewnętrznej.

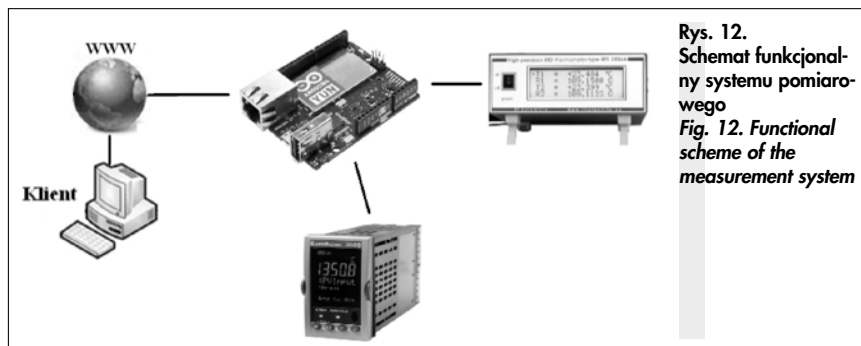
Układ sterowania i pomiaru

Aby zapewnić łatwość obsługi stanowiska, wykorzystano platformę sprzętową ARDUINO, dzięki której można zaimplementować obsługę sieci ethernet (pozwala na zdalny odczyt temperatury oraz ustawienie temperatury za pomocą przeglądarki www), portu szeregowego USB i karty SD oraz precyzyjny termometr wielokanałowy model RFS2408A przeznaczony do pracy z dwoma czujnikami typu Pt-100. Miernik RFS2408A pozwala na pomiar temperatury z dokładnością lepszą niż $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Schemat funkcjonalny zbudowanego układu sterowania przedstawiono na rys. 12. Do komunikacji z użytkownikiem wykorzystano interfejs sieciowy. Zrezygnowano z wyświetlacza alfanumerycznego. Aktualne nastawy i temperatury odczytywane są z wykorzystaniem przeglądarki internetowej.

Stanowisko pomiarowe jest przykładem przyrządu wirtualnego. Komputer zarządza zbudowanym wnękowym ciałem czarnym CBB, przesyła dane pomiarowe do elektronicznej karty pomiarowej,



Rys. 11. Schemat układu regulacji w układzie kaskadowego PID
Fig. 11. Diagram of the control system with PID cascade controller



Rys. 12. Schemat funkcjonalny systemu pomiarowego
Fig. 12. Functional scheme of the measurement system

wyznacza błąd pomiaru i szacuje niepewność pomiaru, na podstawie zebranych danych generuje świadectwo wzorcowania. Część programowa wirtualnego stanowiska pomiarowego została zrealizowana w oparciu o platformę VBA.

Weryfikacja laboratoryjna

W celu wyznaczenia podstawowych właściwości metrologicznych zbudowanego prototypu wnękowego technicznego ciała czarnego zbadano czas grzania, chłodzenia, stabilność temperatury w czasie oraz osiowy gradient temperatury.

Czas grzania i chłodzenia to ważne z ekonomicznego punktu widzenia parametry decydujące o kosztach wzorcowania. Czas potrzebny do nagrzania z temperatury otoczenia do temperatury 80°C wyniósł 38 min. Prędkość grzania była w przybliżeniu stała i wyniosła ok. 1,5°C/min. Natomiast czas potrzebny do wychłodzenia z temperatury otoczenia do temperatury -20°C wyniósł ok. 70 min z prędkością ok. 0,6°C/min.

Stabilność temperatury w czasie

Wahania temperatury dla ustalonego stanu pracy dla temperatury maksymalnej 80°C i minimalnej -20°C przedstawiono odpowiednio na rys. 13 i rys. 14. Odchylenia standardowe temperatury wyniosły odpowiednio 47 mK i 19 mK, co przy przyjęciu stabilności temperatury na poziomie podwójnej wartości odchylenia standardowego pozwoliło wyznaczyć ją jako 93 mK i 38 mK.

Dystrybucja temperatury i emisyjność widmowa

Jak wspomniano na wstępie na emisyjność emitera ma wpływ również rozkład temperatury.

Całkowita długość emitera to $Z = 255$ mm, w tabelach 3 i 4

punkt początkowy odpowiada wewnętrznej części stożka, punkt jeden to koniec tulei początek przesłony apertury. Badanie przeprowadzono dla temperatury otoczenia równej 25°C. Jako temperaturę odniesienia przyjęto temperaturę dna stożka.

Dla temperatury 80°C zgodnie z danymi w tabeli 3 najchłodniejszym obszarem emitera jest pobliże apertury. Spadek temperatury jest większy niż 5°C. Sama temperatura apertury nie ma dużego wpływu na emisyjność emitera. Najważniejszym elementem jest dno emitera. Jak widać temperatura w podstawie stożka jest jednorodna, jej rozkład jest lepszy niż 0,1°C.

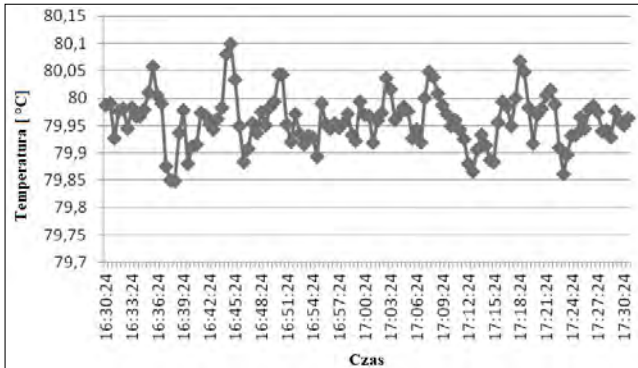
Zgodnie z danymi w tabeli 4 dla temperatury -20°C najcieplejszym obszarem emitera jest pobliże apertury. Wzrost temperatury jest większy niż 6°C. Sama temperatura apertury nie ma dużego wpływu na emisyjność emitera. Najważniejszym elementem jest dno emitera. Jak pokazują dane z tabeli temperatura w podstawie stożka jest jednorodna, a jej rozkład jest lepszy niż 0,3°C.

Tabela 3. Rozkład temperatury wzdłuż emitera dla temperatury 80°C
Table 3. Temperature distribution along the emitter for temperature 80°C

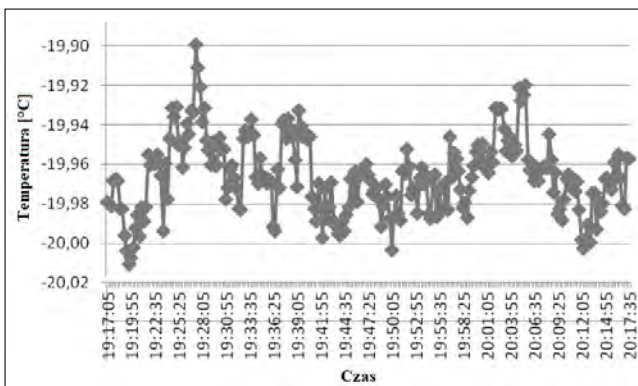
	Rozkład temperatury wzdłuż emitera							
t [°C]	79,9	79,94	79,98	80	80,01	79,54	78,7	74,7
T [K]	353,05	353,09	353,13	353,15	353,16	352,69	351,85	347,85
Z _i [mm]	0	30	80	130	180	230	250	255
X _i = Z _i /Z [%]	0	11,76	31,37	50,98	70,59	90,20	96,08	100,00

Tabela 4. Rozkład temperatury wzdłuż emitera dla temperatury -20°C
Table 4. Temperature distribution along the emitter for temperature -20°C

	Rozkład temperatury w osi emitera							
t [°C]	-20	-20,3	-20,32	-20,31	-20,21	-20,21	-19,20	-13,8
T [K]	253,15	252,85	252,83	252,84	252,94	252,94	253,95	259,35
Z _i [mm]	0	30	80	130	180	230	250	255
X _i = Z _i /Z [%]	0	11,76	31,37	50,98	70,59	90,20	96,08	100,00

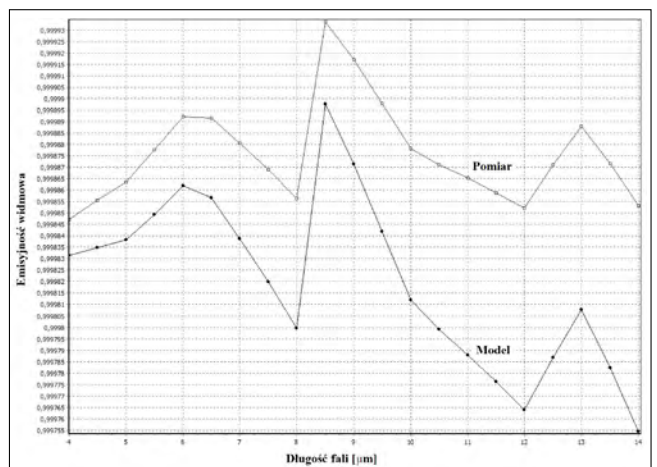


Rys. 13.
Stabilizacja temperatury w czasie dla 80°C.
Fig. 13. Temperature stabilization in time for 80°C.

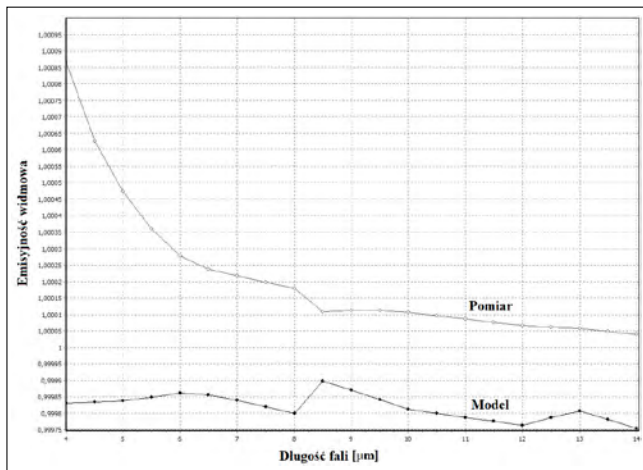


Rys. 14.
Stabilizacja temperatury w czasie dla -20°C.
Fig. 14. Temperature stabilization in time for -20°C.

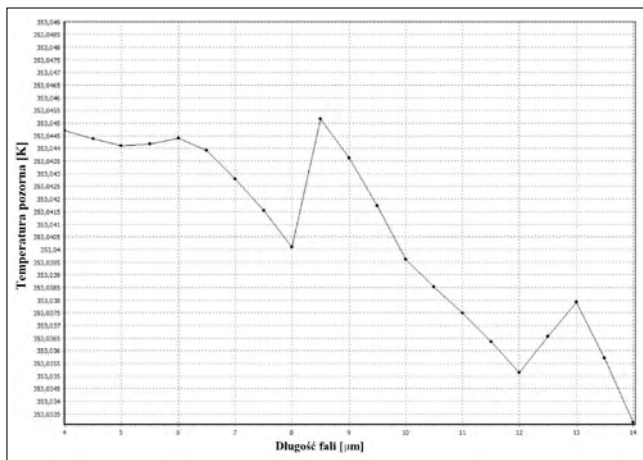
Na rys. 15. przedstawiono widmową emisyjność dla zmierzonego rozkładu temperatury na tle rozkładu dla przypadku izotermicznego dla temperatury 80°C. Jak wynika z rysunku widmowa emisyjność jest w całym zakresie wyższa od 0,999. Jest także wyższa od obliczonego przypadku izotermicznego, przyczyną jest rozkład temperatury w emiterze. W obszarze dna stożka wierzchołek emitera jest punktem o najniższej temperaturze, następnie temperatura rośnie w zakresie 0,1°C do ok. 0,7 części długości emitera, by opaść w obszarze apertury. Rozkład temperatury jest przyczyną wyrównania emisyjności widmowej w badanym zakresie długości fali i podniesienia w porównaniu



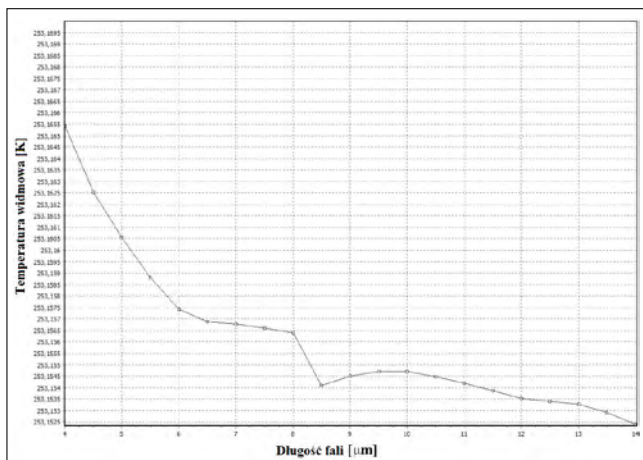
Rys. 15.
Emisyjność widmowa dla zmierzonego rozkładu temperatury dla 80°C porównana z wynikiem dla modelu izotermicznego
Fig. 15. Spectral emissivity for the measured temperature distribution at 80°C compared with the result for the isothermal model



Rys. 16. Emisyjność widmowa dla zmierzonego rozkładu temperatury dla -20°C porównana z wynikiem dla modelu izotermicznego
Fig. 16. Spectral emissivity for the measured temperature distribution at -20°C compared with the result for the isothermal model



Rys. 17. Widmowy rozkład temperatury pozornej dla wyników uzyskanych dla 80°C
Fig. 17. Spectral distribution of apparent temperature for the results obtained for 80°C



Rys. 18. Widmowy rozkład temperatury pozornej dla wyników uzyskanych dla -20°C
Fig. 18. Spectral distribution of apparent temperature for the results obtained for -20°C

do przypadku izotermicznego. Na rys. 16. przedstawiono widmową emisyjność dla zmierzonego rozkładu temperatury dla -20°C na tle rozkładu dla przypadku izotermicznego. Jak wynika z rysunku widmowa emisyjność jest w całym zakresie nie-

znacznie wyższa od jedności, przyczynia się do tego to, że wierzchołek stożka jest cieplejszy od bazy tulei. Podwyższona temperatura apertury nie wpływa znacząco na wartość emisyjności.

Na rys. 17. przedstawiono widmowy rozkład temperatury pozornej dla temperatury 80°C, a na rys. 18 dla -20°C. Jak wynika z rysunków zmienność temperatury w obu przypadkach jest mniejsza niż 20 mK. Na podstawie wyliczonej emisyjności wyznaczono temperaturę pozorną.

Wyznaczenie składowych budżetu niepewności pomiaru mających wpływ na emisyjność emitera oraz spadek temperatury emitera na skutek jego promieniowania

Składowa związana z emisyjnością powierzchni wnęki

Powierzchnia emitera pokryta została farbą Nextel. Zgodnie z danymi przytoczonymi w pracy zmiana współczynnika emisyjności na skutek wpływu temperatury, kąta padania promieniowania i zależności od długości fali mieści się w zakresie 0,95-0,98.

$$\partial \varepsilon_w \approx (1 - \varepsilon_{cbb}) \Delta \varepsilon / (1 - \varepsilon) \quad (2)$$

gdzie: $\varepsilon = 0,97$ – współczynnik dla farby Nextel, $\Delta \varepsilon = 0,03$ – zmiana współczynnika farby Nextel.

Składowa związana z gradientem temperatury

Przód wnęki emitera na skutek wymiany ciepła z otoczeniem ma temperaturę różną od dna emitera. Zaburzenie temperatury występuje na ok. 5% długości wnęki. Dla tak przyjętego modelu składową można wyznaczyć za pomocą zależności:

$$\partial \varepsilon_T = c_2 / (\lambda T^2) (1 - \varepsilon) \Delta T \quad (3)$$

Składowa związana z dokładnością wyznaczenia wymiarów emitera

Przyjmijmy jako dokładność $\Delta L = 1\text{mm}$, $\Delta d = 0,5\text{ mm}$, i $\Delta \theta = 2,5^\circ$.

$$\partial \varepsilon_l = (1 - \varepsilon_{bb}) 2 \Delta L / L \quad (4)$$

$$\partial \varepsilon_d = (1 - \varepsilon_{bb}) 2 \Delta d / d \quad (5)$$

$$\partial \varepsilon_\theta = (1 - \varepsilon_{bb}) \text{ctg} \theta \Delta \theta \quad (6)$$

Składowa związana z dokładnością obróbki CNC

Na skutek skończonej dokładności obróbki CNC, wewnętrzna część wierzchołka stożka jest zaokrąglona, co powoduje lokalne zmniejszenie emisyjności. Termometr radiacyjny zbiera promieniowanie z tego zaburzonego fragmentu, do obliczeń przyjmijmy obszar $r=2\text{ mm}$ i promień noża $\Delta r=0,25\text{ mm}$.

$$\partial \varepsilon_{obr\ bki} = (1 - \varepsilon_{bb}) (\text{csc} \theta - 1) (\Delta t / t)^2 \quad (7)$$

Składowa związana ze spadkiem temperatury na skutek wypromieniowania energii

Na skutek wypromieniowania energii przez aperturę dochodzi do spadku temperatury wierzchołka stożka emitera. Zgodnie z podaną zależnością w [4] wartość spadku temperatury można wyznaczyć na podstawie zależności.

$$\Delta_b(T) = \varepsilon_{tot} \sigma T^4 (d / \kappa) (r / L)^2 \quad (8)$$

gdzie: $\Delta_b(T)$ – spadek temperatury, ε_{tot} – emisyjność całkowita grafitu, σ – stała Stefana-Boltzmannna, T – temperatura w Kelwi-

nach, d – grubość dna wężki, K – przewodność cieplna grafitu, r – promień wężki, L – długość wężki.

Jak pokazują wyniki obliczeniowe tej składowej, jej wartość jest nie większa niż kilka mK, wartość ta pozwala na pominięcie tej składowej w odliczaniu niepewności pomiaru.

Wzorcowanie pirometrów

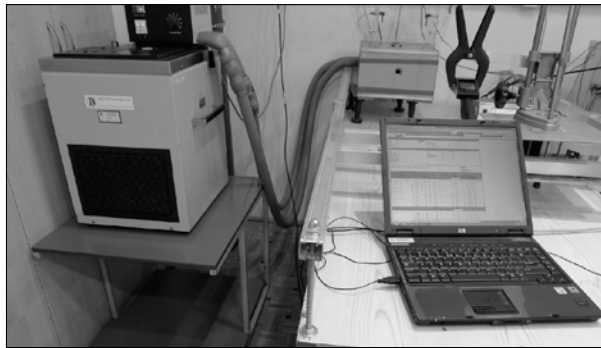
Stanowisko pomiarowe podczas wzorcowania przedstawiono na rys. 19 – widoczne są: termostat cieczerw, wężkowe ciało czarne CBB, komputer wraz z autorskim oprogramowaniem oraz statywy do pozycjonowania położenia wzorcowanego pirometru. Pozycjonowanie położenia odbywa się na prowadnicach aluminiowych, możliwe jest ustalanie położenia w trzech osiach.

W celu weryfikacji dokładności zbudowanego stanowiska przeprowadzono porównanie zbudowanego ciała do wzorca odniesienia jakim w naszym przypadku jest pirometr KT19.82 firmy HEITRONIC pozwalający na pomiar z dokładnością rzędu $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porównanie przeprowadzono pośrednio z wykorzystaniem kalibratora 4180, będącego na wyposażeniu Laboratorium. Wzorcowania dokonano zgodnie z [8]. Kalibrator 4180 został wyzorcowany w zakresie widmowym $(8 \div 14)\text{ }\mu\text{m}$ z dokładnością $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, miesiąc przed przeprowadzonymi badaniami, założono stabilność krótkoterminową kalibratora 4180 dla okresu 1 miesiąca ok. $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. W takich warunkach możliwe było porównanie prototypowego ciała czarnego z termometrem KT19.82 z dokładnością nie gorszą niż $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. W tabeli 5 zestawiono wartości współczynnika $|E_n|$ obliczone na podstawie wzoru:

$$|E_n| = \left| \frac{p_{lab1} - p_{lab2}}{\sqrt{U_{lab1}^2 + U_{lab2}^2}} \right| \quad (9)$$

gdzie: p_{lab1} , p_{lab2} – błędy pomiaru uzyskane w obu laboratoriach, U_{lab1} , U_{lab2} – odpowiadające im niepewności pomiaru.

Dla wszystkich punktów wzorcowania otrzymano współczynnik $|E_n| < 1$. Uzyskany wynik pozwala stwierdzić odtwa-



Rys. 19. Wzorcowanie pirometru na zbudowanym stanowisku
Fig. 19. Calibration of the pyrometer on the constructed test stand

rzalność temperatury ciała czarnego za pomocą prototypowego stanowiska.

Tabela 5. Zestawienie współczynników E_n
Table 5. Statement of E_n coefficients

Temperatura odniesienia [$^{\circ}\text{C}$]	Współczynnik $ E_n $
-15,0	0,7
36,5	0,2
80,0	0,5

Podsumowanie

Zbudowane stanowisko pomiarowe - wężkowe techniczne ciało czarne CBB, pracuje w zakresie temperatur środowiskowych $(-20 \div 80)\text{ }^{\circ}\text{C}$. W trakcie przeprowadzonych symulacji zrealizowanego modelu w programie STEEP 3 wykazano, że emisyjność ciała jest większa niż 0,999.

Do termostatyzowania urządzenia wykorzystano układ pośredni z termostatem zewnętrznym. Dzięki tej metodzie uzyskano wysoką stabilność temperatury i źródła promieniowania. Uzyskano w przybliżeniu techniczne ciało doskonale czarne o emisyjności 0,999. Zrealizowane urządzenie pozwala na wzorcowanie pirometrów oraz systemów obrazujących (kamery termowizyjne) z dokładnością na poziomie $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. System może być sterowany zdalnie z komputera. Istnieje możliwość pracy urządzenia jako samodzielnej jednostki lub części większego systemu. Dotychczasowy proces akredytacji laboratoriów wzorcujących w dziedzinie pirometrii, w Polsce zatrzymał się na dokładności nie lepszej niż $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Opracowane stanowisko daje podstawy do podjęcia próby zmniejszenia tej wartości. Wykorzystując doświadczenie w trakcie realizacji pracy opracowano metodę pomiarową i budżet niepewności pomiaru w zakresie wzorcowania pirometrów.

Podziękowanie

Przedstawione wyniki badań zostały uzyskane w wyniku pracy badawczej nr MAP/STAT/01/2017 finansowanej ze środków Instytutu Energetyki – Instytutu Badawczego [6].

LITERATURA

- [1] Adibekyan A., Kononogoca E., Monte C., Holland J., High Accuracy Emmissivity Data on the Coating Nextel 811-21, TEMPEKO, 2016
- [2] Batuello M., Clausen S., Hameury J., Bloembergen P., The Spectral Emissivity of Surface Layers, Currently Applied in Blackbody Radiators, Covering the Spectral Range from 0.9 to 20 μm . An International Comparison TEMPMEKO'99 Proceeding 601-606, 1999
- [3] Betts D. B., Clarke F. J., Cox L. J., Larkin J. A., Infrared Reflection Properties of Five Types of Black Coating for Radiometric Detectors J. Phys. E: Sci. Instrum. 18 689-696, 1985
- [4] CCT-WG5 on radiation thermometry, Uncertainty budget for realization of scales by radiation thermometry, CCT-03-03, 2003
- [5] Eckersdorf K., Michalski L., Pomiary temperatury, WNT, 1986
- [6] Malinowski R., Witkowski R., Opracowanie metody oraz stanowiska do wzorcowania termometrów radiacyjnych w zakresie temperatur środowiskowych, Instytut Energetyki – IB, MAP/STAT/01/2017, Warszawa, 2017
- [7] Minkina W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, ISBN 83-7193-237-5, Częstochowa, 2004
- [8] Malinowski R., Witkowski R., Procedura Pomiarowa LAP IEn T/1 20/MAP „Wzorcowanie termometrów radiacyjnych i kamer termowizyjnych za pomocą wężkowego ciała czarnego”, procedura wewnętrzna IEn, wydanie 1, Warszawa, 2017
- [9] Tank Kwor E., Matter S., Emmissivity measurement for Nextel Velvet Coating 811-21, 2001
- [10] Wolfe W. E., Zissis G. Z., The Infrared Handbook, General Dynamics, 1985
- [11] Żurawski J., Termowizja jako weryfikacja jakości prac izolacyjnych, Izolacje 11/12, 2008
- [12] <https://www.virial.com/steep321.html>, dostęp w dniu 28.05.2020

■



Projektowanie instalacji ciepłej wody w budynkach mieszkalnych

Autor: prof. dr hab. inż. Władysław Szafflik

Książka jest poświęcona instalacjom ciepłej wody i układom jej przygotowywania. Liczy 294 stron tekstu, bogato ilustrowanego rysunkami, schematami oraz tabelami i stanowi pewne podsumowanie

wieloletnich prac prowadzonych w Katedrze Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ciepłownictwa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (do 2008 roku Politechniki Szczecińskiej).

Cena 1 egz.: 60 zł + 8% VAT.

Zamówienia przyjmuje: Ośrodek Informacji "Technika instalacyjna w budownictwie"

02- 674 Warszawa, ul. Marynarska 14, tel./fax 22-843 77 71; e-mail: wydawnictwo@informacjainstal.com.pl