

Viktor LOZBIN¹, Waldemar WÓJCIK², Gennadij ZHELAZKO³

¹ POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA AUTOMATYKI I METROLOGII

² POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA ELEKTRONIKI

³ CTS AUTOMATION, UKRAINA

Zmodyfikowana akustyczna metoda wyznaczania temperatury w kotłach przemysłowych

Prof. dr hab. inż. Viktor LOZBIN

Tytuł mgr inż. uzyskał w Instytucie Energetycznym w Moskwie w 1965r., doktorat obronił w 1975 w Instytucie Fizyki Technicznej w Suchumi, a stopień dr hab. uzyskał w 1991 r. w Instytucie Technologicznym w Moskwie. Od 2001 r. pracuje na stanowisku profesora w Katedrze Automatyki i Metrologii Politechniki Lubelskiej. Jego tematyka badawcza koncentruje się na bezpośrednim przetwarzaniu energii cieplnej w elektryczną i pomiarach wielkości cieplnych.



e-mail: v.lozbin@pollub.pl

Dr hab. inż. Waldemar WÓJCIK

Ukończył studia na Politechnice Wrocławskiej - Wydział Elektroniki (1975), doktorat obronił w Politechnice Lubelskiej (1985), a habilitację w Politechnice Lwowskiej (2001). W pracy badawczej zajmuje się optoelektroniką, automatyką, telekomunikacją i informatyką. W swoim dorobku ma 14 monografii, ponad 100 prac naukowych, 3 patenty. Obecnie pełni funkcję Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

Dr inż. Gennadij ZHELAZKO

Absolwent Uniwersytetu Technologicznego w Żytomierzu (2000r). Studia doktoranckie ukończył na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej w 2007 roku. Aktualnie zatrudniony jest w CTS Automation (Kijów, Ukraina). Zainteresowania naukowe dotyczą głównie oszczędnych energetycznie technologii oraz alternatywnych źródeł energii.



e-mail: z-gena@yahoo.com

Streszczenie

W pracy przedstawiono modyfikację akustycznej metody wyznaczania przestrzennego rozkładu temperatury w kotłach energetycznych. W metodzie tej uwzględniono został wpływ składu chemicznego spalin oraz parametru termodynamicznego κ na wynik odwzorowania rozkładu pola temperatury w kotle, co spowodowało zmniejszenie błędów w porównaniu z jej klasyczną wersją.

Słowa kluczowe: tomografia akustyczna, temperatura, kotły przemysłowe.

Modified acoustic method for determination of temperature in industrial boilers

Abstract

In the work a modification of acoustic method for determination of spatial temperature distribution in power boilers is presented. An influence of chemical composition of flue gasses as well as the thermodynamic κ factor on the result of imaging of temperature field distribution in a boiler was taken into account, what resulted in error decrease comparing to the classical method.

Keywords: acoustic tomography, temperature, industrial boilers.

1. Wstęp

Podstawowym parametrem charakteryzującym pracę kotła przemysłowego jest temperatura, a dokładniej jej rozkład przestrzenny. Jest to szczególnie ważne przy stosowaniu niskoemisyjnych technik spalania strefowego, które prowadzi z jednej strony do redukcji tlenków azotu, z drugiej zaś do wzrostu zagrożeń korozyjnych. Ze względu na bardzo trudne warunki panujące w komorach spalania kotłów przemysłowych (wysoka temperatura, wibracje, zapylenia, agresywne chemicznie środowisko) pomiary temperatury przy pomocy przyrządów kontaktowych nie są w zasadzie wykonywane. Uwzględniając dodatkowo znaczne rozmiary przestrzenne kotłów, do pomiaru w takich warunkach mogą być zastosowane metody optyczne (pirometria optyczna)

lub akustyczne (pirometria akustyczna). W niniejszej pracy omówiona zostanie akustyczna metoda pomiaru temperatury, której podstawy podane są w pracach [1, 2, 3], zmodyfikowanej w ten sposób, że uwzględniono w niej skład spalin oraz ich parametry termodynamiczne co pozwoliło na wzrost jej dokładności.

2. Pomiar rozkładu temperatury metodą akustyczną

Akustyczna metoda pomiaru jest metodą pośrednią, gdyż wielkością mierzoną jest czas propagacji impulsu akustycznego od nadajnika do odbiornika sygnału. W celu wyznaczenia temperatury potrzebna jest informacja o składzie chemicznym środowiska, tzn. o stężeniu składników w spalinach oraz ich rozkładzie przestrzennym w momencie dokonywania pomiaru. Nie jest to niestety możliwe. Dlatego w metodzie tej przyjmuje się następujące założenia upraszczające

- 1) skład spalin jest znany i stały
- 2) środowisko jest homogeniczne
- 3) trajektoria dźwięku jest prostoliniowa
- 4) parametry termodynamiczne spalin, tj. ciepłe pojemności właściwe są niezależne od temperatury, a ich wartość odpowiada średnim.

Przy tak przyjętych założeniach, nie dość, że wynikiem pomiarów jest charakterystyka energetyczna gazu (rozkład entalpii $c_p T$) związana bezpośrednio z jego temperaturą, a nie temperatura spalin, to jeszcze prowadzi do powstania dużych błędów.

Ze względu na niemożność uzyskania chwilowych informacji o składzie chemicznym spalin, wykorzystane zostały zależności stechiometryczne wiążące skład produktów spalania ze składem paliwa oraz dostarczonym powietrzem. Zastosowanie tych zależności daje możliwość analitycznego określania składu spalin, wyznaczenia stężeń poszczególnych składników oraz zakresu ich zmian (w skutek zmian składu chemicznego paliwa), wyznaczenia parametrów termodynamicznych spalin, ściśle związanych ze stężeniami poszczególnych składników spalin. Biorąc to pod uwagę, można stwierdzić, że istnieje możliwość wyznaczenia temperatury z parametru energetycznego $c_p T$. W oparciu o modelowanie matematyczne w pracy podjęto próbę wyznaczenia przestrzennego rozkładu temperatury z uwzględnieniem zależności cieplnej pojemności gazu od temperatury. Dla rozwiązania tak postawionego zadania wystąpiła potrzeba modyfikacji znanej z literatury metody akustycznej, wykorzystując zależność temperatury od pojemności cieplnej $c(T)$.

Podstawą metody akustycznej jest zjawisko termoakustyczne, polegające na zależności prędkości rozprzestrzeniania się fal akustycznych w środowisku gazowym od własności prężnych środowiska, które są zależne od temperatury. Wychodząc z zało-

zenia, że skład mieszaniny gazów i stężeń składników są znane i stałe. Zależność tą można przedstawić w postaci:

$$v(x, y) = \sqrt{R \frac{T(x, y) \sum_i (r_i c_{pi})}{\sum_i (r_i M_i) \sum_i (r_i c_{vi})}} = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M}} \quad (1)$$

gdzie:

$v(x, y)$ - prędkość dźwięku w środowisku [m/s],

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ - wykładnik adiabaty,

c_p - ciepła pojemność właściwa przy stałym ciśnieniu składnika,

c_v - ciepła pojemność właściwa przy stałej objętości składnika,

M - masa molowa mieszaniny, wyznaczona, odpowiednio do udziału składników,

R - uniwersalna stała gazowa,

T - temperatura gazu,

r_i - udział składnika w mieszaninie,

M_i - masa molowa składnika w mieszaninie.

Zależność (1) można również przedstawić w prostszej postaci tj.:

$$v(x, y) = K_g \sqrt{T(x, y)} \quad (2)$$

gdzie:

K_g - stała akustyczna gazu (wielkość charakterystyczna dla gazu o dokładnie znanym składzie chemicznym).

Ze względu na to, że bezpośredni pomiar prędkości chwilowych w każdym punkcie badanej przestrzeni nie jest możliwy, w praktyce stosuje się pomiar czasu rozprzestrzeniania się fali akustycznej (t_j) wzdłuż wybranego kierunku pomiaru j o długości kanału między nadajnikiem, a odbiornikiem wynoszącym l_j , który wynosi:

$$t_j = \int_{l_j} \frac{dl_j}{v(x, y)} = \int_{l_j} W(x, y) dl_j \quad (3)$$

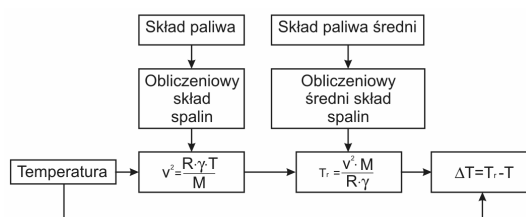
Analizując zależność (1) widać, że bezpośredni wpływ na prędkość sygnału akustycznego w środowisku gazowym ma skład chemiczny, przestrzenny rozkład koncentracji składników oraz zależność właściwości fizycznych środowiska od temperatury. Praktyczne zastosowanie istniejących metod eksperymentalnych wyznaczenia składu chemicznego gazu oraz udziałów poszczególnych składników nie jest możliwe biorąc pod uwagę czasochłonność pomiarów, cykliczny tryb pracy oraz zakłócenia aerodynamiczne powstające wskutek rozmieszczenia aparatury pomiarowej we wnętrzu kotła. Ze względu na to teoretyczny skład spalin określić można za pomocą metody analitycznej na podstawie dostępnej informacji o składzie paliwa [4, 5]. Jako paliwo eksperymentalne przykładowo wykorzystano węgiel kamienny o składzie chemicznym przedstawionym w tab. 1.

Tab. 1. Przykładowy skład chemiczny paliwa, w %
Tab. 1. Example chemical composition of fuel (%)

Składniki (w podaniu na wagę suchą palną)					Balast paliwa	
węgiel	wodór	siarka	azot	tlen	woda	popiół
C^p	H^p	S^p	N^p	O^p	W^p	A^p
84,0	5,2	1,0	0,8	9,0	1÷3	2÷20

3. Wpływ zawartości balastów w paliwie na błąd wyznaczania temperatury

W praktycznych warunkach spalania paliwa stalego występuje zmienność jego składu chemicznego. Jest to wywołane głównie zmianą balastu paliwa (tab. 1), wskutek czego zmienia się również skład spalin. Dla pierwotnego określenia wpływu zmiany składu paliwa na błąd wyznaczenia temperatury dokonamy następującego eksperymentu (rys. 1). Wprowadzimy w tym celu pojęcia *średni skład teoretyczny* oraz *skład rzeczywisty*. Za *średni skład teoretyczny* będziemy rozumieć skład gazu obliczony odpowiednio do średnich udziałów balastów w paliwie. Za *skład rzeczywisty* będziemy uważać skład gazu, który może występować w poszczególnych przypadkach zmian zawartości balastów.



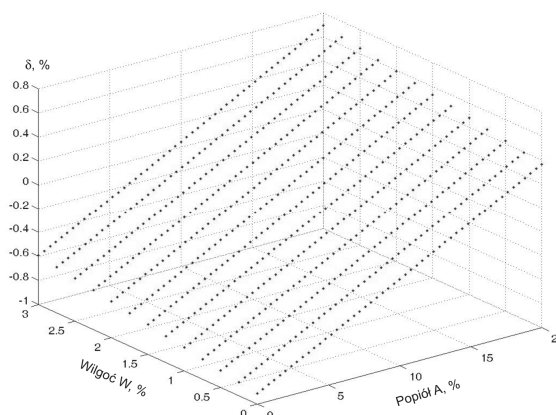
Rys. 1. Schemat eksperymentu określenia wpływu zmiany zawartości balastów w paliwie, na błąd obliczenia temperatury

Fig. 1. Diagram of experiment to determine an influence of fuel inert content variation on temperature calculation error

W celu wyeliminowania wpływu temperatury na parametry termodynamiczne gazu eksperyment wykonywany jest dla stałej zadanej temperatury ($T=1000K$). Eksperyment ten polega na wyznaczeniu składu spalin dla poszczególnych zmian balastów w zakresach podanych w tab. 1, a następnie wyznaczeniu na podstawie równania (1) wartości prędkości dźwięku w ośrodku (v^2). Dalej na podstawie tej wielkości oraz parametrów teoretycznego składu średniego wyznaczamy wartość poszukiwanej temperatury T_r . Rezultatem tego eksperymentu będzie błąd metody powstający wskutek niemożliwości ścisłego określenia składu spalin:

$$\delta = \frac{T_r - T}{T} 100\% \quad (4)$$

Na rys. 2 przedstawiono rezultaty eksperymentu tzn. zależność błędu określenia temperatury, przy założeniu w obliczeniach średnich parametrów charakterystycznych paliwa przykładowego, od zmiany zawartości balastów (wilgoci oraz popiołu).



Rys. 2. Wpływ zmiany zawartości balastów, na błąd obliczenia temperatury ($T=1000K$)

Fig. 2. Influence of fuel inert content variation on temperature calculation error ($T=1000K$)

Ze względu na to, że w praktyce rzadko występują wartości skrajne zawarcia balastu w paliwie (dotyczy części mineralnej) w oparciu o przeprowadzone obliczenia jest możliwe wysunąć wnioski, że stosowanie w obliczeniach temperatury wartości średnich balastu w paliwie doprowadza do powstania błędów w granicach $\delta = \pm 0,36\%$ (biorąc pod uwagę aspekt praktyczny zawartość balastu w postaci części mineralnej, ograniczyliśmy do zakresu 7-15%).

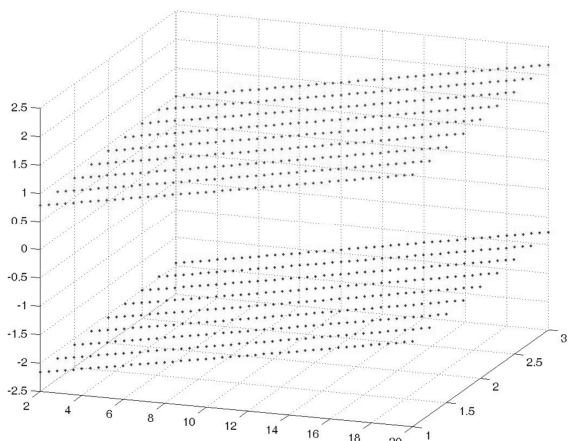
W związku z tym, że parametry termodynamiczne gazu są zależne od temperatury dokonamy eksperymentu wyznaczenia wpływu zmiany składu spalin oraz zależności temperaturowej parametrów termodynamicznych gazu na wynik wyznaczenia temperatury. W eksperymencie tym przyjmuje się, że pojemność cieplną gazów rzeczywistych, dla określonego zakresu temperatury, można z niewielkim błędem przedstawić w postaci wielomianu [6]:

$$c_p = 4,1868 \left(a + bT + \frac{c}{T^2} + dT^2 \right) \quad (5)$$

gdzie:

a, b, c, d - współczynniki wagi funkcji (wybierane z tabeli w pozycji [6]).

W celu dokonania eksperymentu przyjmujemy założenie, że dla teoretycznego składu spalin wielkość parametru κ_{sr} wyznaczamy dla określonego zakresu temperatury jako wartość średnią i przyjmujemy ją za stałą. Z reguły eksperyment jest analogiczny do eksperymentu przedstawionego wcześniej, lecz obliczenia wykonywane są dla wartości dolnej oraz górnej z zakresu temperatury $[T_d, T_g]$. Ze względu na to błąd metody również będzie się znajdował w zakresie $[\delta_d, \delta_g]$. Rezultaty obliczeń przedstawiono na rys. 3.

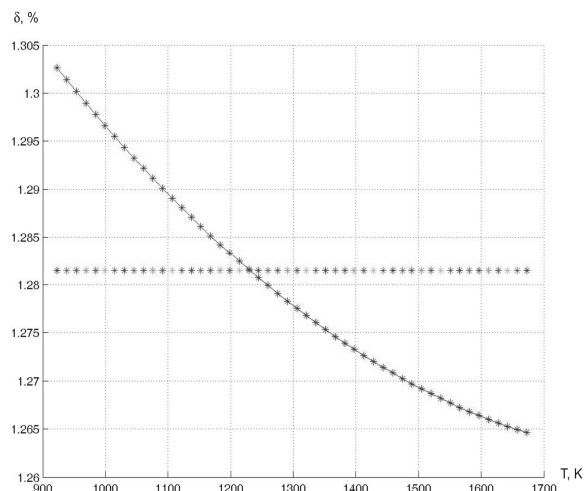


Rys. 3. Wpływ zmiany zawartości balastów oraz temperaturowej zależności parametru κ na błąd obliczania temperatury (dla zakresu temperatury $923 \pm 1673\text{K}$)

Fig. 3. Influence of fuel inert content variation and thermal dependence of κ parameter on temperature calculation error (for temperature range $923 \pm 1673\text{K}$)

Na rys. 4 przedstawiony jest wykres zależności temperaturowej stosunku pojemności cieplnych gazów (dla paliwa przykładowego o wilgotności $W=1\%$ oraz udziałem popiołu $A=7\%$) oraz wartość średnia parametru κ_{sr} (dla paliwa o średnim składzie balastów).

Na podstawie obliczeń ustalono, że dla przykładowego paliwa błąd określenia temperatury, przy nieuwzględnieniu wpływu temperatury na wartość pojemności cieplnej gazu, będzie wynosił $\delta \approx \pm 1,85\%$.



Rys. 4. Temperaturowa zależność parametru termodynamicznego κ spalin
Fig. 4. Thermal dependence of flue gas thermodynamic κ parameter

4. Wpływ składu chemicznego spalin oraz parametru termodynamicznego na wynik odwzorowania rozkładu pola temperatury

W celu sprawdzenia możliwości wykorzystania teoretycznego składu dynamicznego spalin do zbadania wpływu tych zmian składu oraz parametru termodynamicznego na wynik odwzorowania rozkładu pola temperatury wykonano eksperyment obliczeniowy według następującego schematu (rys. 5). Pole temperatur, analogicznie do [2], opisane jest typową zależnością:

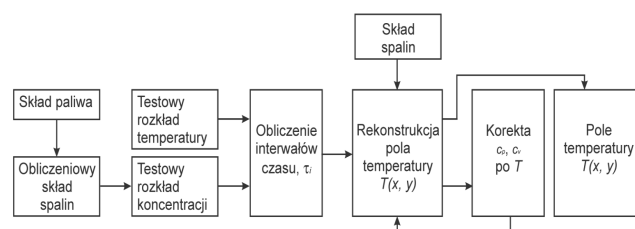
$$T_m(x, y) = a + b \cos\left(\frac{px}{L}\right) \cos\left(\frac{py}{L}\right) \quad (6)$$

gdzie:

L - liniowe rozmiary badanej przestrzeni (w metrach),
 $a=923$,
 $b=750$,

$$|x| \leq \frac{L}{2},$$

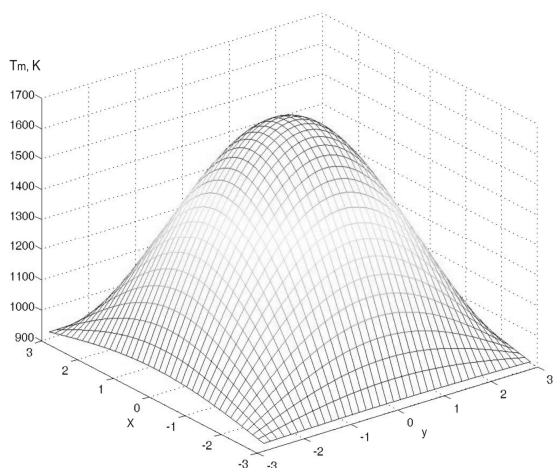
$$|y| \leq \frac{L}{2}.$$



Rys. 5. Schemat eksperymentu symulacyjnego
Fig. 5. Simulation experiment scheme

W celu konkretyzacji obliczeń, założymy, że spalaniu podlega paliwo o składzie chemicznym określonym w tab. 1. Rzeczywisty obliczeniowy skład spalin oraz koncentrację składników wyznacza się metodą analityczną na podstawie składu paliwa.

Skład paliwa jest zadawany z uwzględnieniem udziałów balastów wygenerowanych losowo z rozkładem normalnym w zakresach wartości podanych w tabeli 1. Na podstawie równań (1, 3, 5) oraz składu spalin, udziałów składników dla testowego rozkładu temperatury (rys. 6), za pomocą metody całkowania numerycznego zostają obliczone interwały czasu w zadanych kierunkach pomiarowych. Kierunki te wyznaczane na podstawie wartości współrzędnych nadajnika oraz odbiornika sygnału akustycznego. Dalej, zgodnie z metodami opisanymi dokładnie w pracach [2, 3], na podstawie obliczonych interwałów czasowych t_j , wyznacza się współczynniki wielomianu rekonstrukcyjnego. Wszystkie obliczenia dokonywane są przy założeniu, że skład spalin podczas jednego cyklu pomiaru jest stały a gaz jest homogeniczny, jednak jego właściwości termodynamiczne podporządkowane zależności funkcyjnej (5). W takiej sytuacji układ równań algebraicznych dla wyznaczenia współczynników wagowych wielomianu rekonstrukcyjnego staje się nieliniowy. W związku z tym zastosowano metodę iteracji. Na początku rekonstrukcja odbywa się przy stałych wartościach pojemności cieplnych c_p , c_v obliczonych dla wcześniej zadanej temperatury. Następnie dla temperatury rekonstruowanej odbywa się dopasowanie wartości, $c_v(x, y, T(x, y))$ i wyznacza się temperaturę. Proces ten jest szybko zbieżny (rys. 5). Teoretyczny skład spalin dla obliczenia temperatury rekonstruowanej wyznaczany jest dla paliwa o średnich zawartościach balastów.

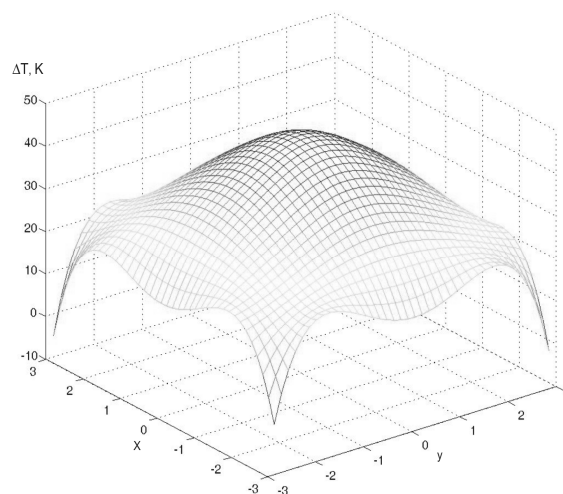


Rys. 6. Testowy rozkład temperatury
Fig. 6. Test distribution of temperature

Rozkład rekonstruowanego pola temperatury jest podobny do rozkładu testowego, dlatego rezultaty przedstawimy w formie $\Delta T = T_{rec} - T_m$ (rys. 7). Wielkość błędu odwzorowania pola temperatury jest obliczona dla wielomianu algebraicznego, w związku, z czym rezultat ostateczny zawiera w sobie średni błąd metody $\delta_{met} = 1,65\%$, który jak stwierdzono w [2], może być zmniejszony do wartości $0,1 \pm 0,2\%$ przez dobór właściwego wielomianu rekonstrukcyjnego oraz jego stopnia.

Na próbie eksperymentalnej, która wynosi 500 okresów symulacji pomiarowej, wyznaczono, że błąd obliczenia temperatury znajduje się w granicach $-2,74\% < \delta < -2,73\%$ ($T_m = 1671,9K, 1625,9K < T_r < 1626,2K$).

W sposób analogiczny został zbadany wpływ błędu pomiaru czasów propagacji impulsów akustycznych. Wartość losowa błędu zawiera się w granicach $\delta_{pom} = 0 \div 0,1\%$ przy rozkładzie równomiernym. Błąd wyznaczenia temperatury w tym eksperymencie wynosi $-2,855\% < \delta < -2,836\%$ ($T_m = 1671,9K, 1624,1K < T_r < 1624,4K$).



Rys. 7. Rezultat rekonstrukcji testowego pola temperatury
Fig. 7. Result of reconstruction of test temperature distribution

5. Wnioski

Biorąc pod uwagę rezultaty dokonanych eksperymentów istnieje możliwość stwierdzić, że zastosowanie analitycznej metody uzyskania składu chemicznego spalin pozwala na dokonanie eksperymentów symulacyjnych wpływu parametrów gazu na rezultat odwzorowania rozkładu temperatury w komorze paleniskowej. Ze względu na rezultaty poprzedniego określenia wpływu składu spalin oraz parametrów termodynamicznych gazu stwierdzono, że istotniejszy wpływ na rezultat odwzorowania temperatury ma temperaturowa zależność parametrów termodynamicznych gazu. W związku, z czym zastosowano metodę dokonania korekty rezultatów, na podstawie wcześniej obliczonej temperatury. Takie podejście daje możliwość zmniejszenia wpływu parametrów termodynamicznych na rezultat odzyskania temperatury. Jednak należy zauważyć, że zmniejszeniem tej wartości składowej błędu nie jest możliwe osiągnięcie wartości błędu rekonstrukcji. Ponieważ temperatura rekonstruowana, według której dokonuje się korekty rezultatów, zawsze będzie zniekształcona błędem rekonstrukcji.

6. Literatura

- [1] Manfred Deuster Applications of acoustic gas temperature measuring systems in waste to energy plants. Bonnenberg+Drescher, Aldenhoven 2000.
- [2] М. Дорожовець: Реконструкція температурного поля в топках котлоагрегатів. Вісник Національного університету „Львівська політехніка”, №404, Львів 2000.
- [3] М. Dorozhovets, А. Kouzii, В. Stadnyk: The measurement of temperature field by Ultrasonic Computer Tomography Methods. IMEKO TC-4: International Symposium. Brussels 1993.
- [4] А.В. Чечеткин, Н.Я. Занемонец: Теплотехника. М. Высш. шк. 1986.
- [5] J. Szargut: Termodynamika. Warszawa 2000.
- [6] J. Szarawara: Termodynamika chemiczna. Warszawa 1963.