

Dr inż. Janusz ZMYWACZYK  
Dr inż. Piotr KONIORCZYK  
Zakład Napędów Lotniczych i Termodynamiki  
Instytut Techniki Lotniczej  
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

## WYGŁADZANIE SYGNAŁÓW TERMIELEKTRYCZNYCH W OBLICZENIACH WYMIANY CIEPŁA – PORÓWNANIE WYBRANYCH METOD

*W pracy analizowano wpływ wygładzania sygnałów termoelektrycznych na dokładność wyznaczenia charakterystyk termicznych ciepła właściwego i przewodności cieplnej materiałów izolacyjnych metodą odwrotną. Do badań symulacyjnych wykorzystano filtr cyfrowy 7 punktowy, filtr cyfrowy 11 punktowy oraz procedurę znaną pod nazwą Cross-Validation Method (CSV). Stwierdzono, że metoda CSV wykazuje najbardziej korzystne pod względem numerycznym własności wygładzania zaburzonych danych pomiarowych. Przedstawiono również porównanie wyników badań eksperymentalnych ciepła właściwego dla Plexi metodą odwrotną i kalorymetrii DSC.*

## SMOOTHING OF THERMO-ELECTRIC SIGNALS IN HEAT TRANSFER CALCULATIONS – COMPARISON OF THE CHOSEN METHODS

*In this paper the influence of smoothing the thermo-electric signals on accuracy determination of temperature characteristic of the specific heat and the thermal conductivity using an inverse method was analysed. The 7<sup>th</sup> point digital filter, the 11<sup>th</sup> point digital filter and the Cross-Validation Method (CSV) were used to carry out the simulation studies. It has been stated that the CSV method is the most numerically convenient to do smoothing of disturbed data. A comparison of the experimental results of the specific heat of Plexi obtained by using the inverse method and the DSC calorimeter was also presented.*

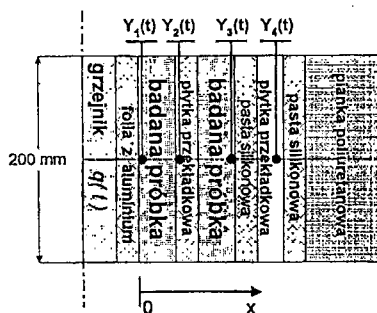
### 1. WSTĘP

Podczas trwania konferencji naukowo-technicznej ATOMATION'99, zorganizowanej w Warszawie w 1999 roku, został przedstawiony referat zatytułowany „Układ akwizycji i opracowania danych pomiarowych stanowiska do badań eksperymentalnych parametrów termofizycznych metodą odwrotną” [1]. Poruszona wówczas tematyka dotyczyła sterowania mocą wyjściową grzejników cienkowarstwowych wchodzących w skład stosu pomiarowego stanowiska eksperymentalnego do badań charakterystyk termicznych parametrów termofizycznych materiałów izolacyjnych metodą odwrotną opartą na rozwiązaniu Odwrotnego Zagadnienia Współczynnika Przewodnictwa Ciepłego (OZWPC) [2].

Danymi wejściowymi były rejestrowane doświadczalnie sygnały termoelektryczne pochodzące od termoelementów płaszczowych typu K, których gorące spoiny pomiarowe znajdowały się w kilku wybranych punktach stosu pomiarowego oraz rzeczywista gęstość strumienia ciepła dostarczana do zespołu badanych próbek z układu grzejników cienkowarstwowych o sterowanej mocy wyjściowej. W trakcie realizacji projektu naukowo-badawczego typu grant na temat „Eksperymentalno-numeryczne wyznaczenie parametrów termofizycznych wybranych tworzyw sztucznych metodą odwrotną, nr 8T10B04114, sponsorowanego przez KBN zostały sprawdzone w praktyce różne warianty stosu pomiarowego o symetrii osiowej, na przykład w konfiguracji:

- 1) warstwa izolacji-kompensacyjny grzejnik cienkowarstwowy-próbka wzorcowa-zasadniczy grzejnik cienkowarstwowy-badana próbka-chłodnica-warstwa izolacji;
- 2) warstwa izolacji-badana próbka-grzejnik cienkowarstwowy-badana próbka-warstwa izolacji;
- 3) warstwa izolacji-badana próbka-badana próbka-grzejnik cienkowarstwowy-badana próbka-badana próbka-warstwa izolacji (rys.1)

a także różne postaci kształtów sygnałów napięciowych prądu stałego w funkcji czasu podawane na grzejnik cienkowarstwowy. W wyniku przeprowadzonych badań porównawczych ciepła właściwego metodą kalymetrii DSC za pomocą kalorymetru firmy Perkin Elmer typu Pyris 1 dla szkła organicznego (pleksi) oraz metodą odwrotną, wykorzystującą eksperymentalno-numeryczne rozwiązanie OZWPC stwierdzono, że najlepsze wyniki ilościowe zapewnia stos pomiarowy w układzie 3, w którym to na grzejnik cienkowarstwowy podawano napięcie sterujące typu narastające zbrocze połówki sinusoidy.



Rys. 1.

Schemat stosu pomiarowego w wersji symetrycznej z jednym grzejnikiem cienkowarstwowym i dwiema próbkami badanymi. Dużymi kropkami zaznaczono lokalizację gorących spoin termoelementów płaszczowych typu K.

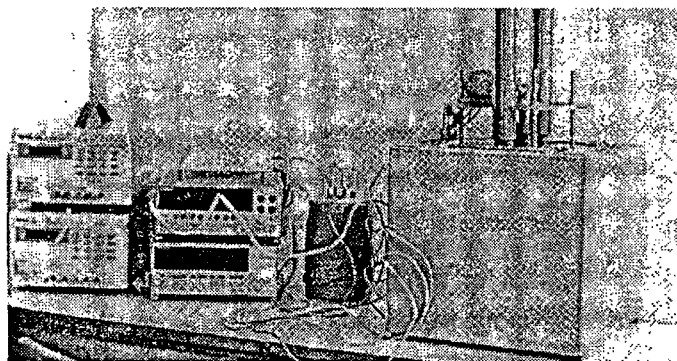
Odrzucenie stosu pomiarowego w konfiguracji 1 można wytłumaczyć opóźnieniem kompensacji zmian czasowych mocy prądu elektrycznego grzejnika cienkowarstwowego. W wyniku tego powstawały dodatkowe straty ciepła. Pewną poprawę zapewniał z kolei stos pomiarowy w konfiguracji wymienionej powyżej jako typ 2, ale w tym przypadku informacja wejściowa dla OZWPC dotyczyła tylko zmian czasowych mocy cieplnej dostarczanej do próbki i temperatury mierzonej na obu przeciwległych powierzchniach badanej próbki co powodowało, z numerycznego punktu widzenia, zbyt słabe uwarunkowanie zagadnienia odwrotnego. Istotną poprawę uwarunkowania zagadnienia odwrotnego można było osiągnąć wykorzystując dodatkową informację o zmianach czasowych temperatury wewnątrz próbki oraz temperatury mierzonej na styku powierzchni dwóch identycznych badanych próbek znajdujących się po obu stronach grzejnika cienkowarstwowego (temperatura  $Y_2(t)$ , rys.1), czyli dla stosu pomiarowego typu 3. Przyjęcie natomiast napięcia sterującego grzejnikiem cienkowarstwowym w postaci narastającego zbrocza połówki sinusoidy o

szerokości od 900 s do 1800 s pozwoliło na precyzyjny pomiar zmian czasowych temperatury na powierzchni czołowej próbki bezpośrednio przylegającej do grzejnika w kolejnych cyklach pomiarowych, dla których doświadczalnie dobrano czas odczytu wynoszący 3 sekundy na każdy punkt pomiarowy (5 odczytów napięcia termoelektrycznego dla każdego z 6 punktów pomiarowych). Tak więc w przypadku nałożenia na grzejnik sygnału napięciowego w postaci, na przykład funkcji skokowej o zadanej amplitudzie  $U_0$ , odczyt sygnału termoelektrycznego  $Y_1(t)$  następowałby w równych 18 sekundowych odstępach, co uniemożliwiłoby poznanie rzeczywistej odpowiedzi termicznej układu w warunkach, kiedy mamy do czynienia z nieuporządkowaną wymianą ciepła, a co za tym idzie błędne wyznaczenie charakterystyk termicznych ciepła właściwego i przewodności cieplnej badanego materiału.

W bieżącym artykule autorzy chcieli podzielić się doświadczeniem, jakie nabyli w trakcie rozwiązywania problematyki dotyczącej wpływu wygładzania danych pomiarowych wybranymi metodami numerycznymi na wyniki estymacji charakterystyk termicznych parametrów termofizycznych materiałów izolacyjnych metodą odwrotną.

## 2. KRÓTKI OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

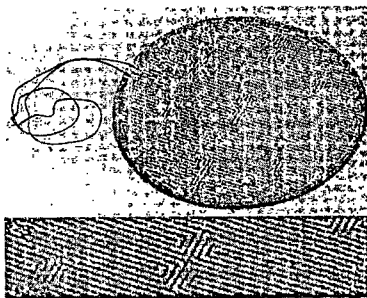
Stanowisko pomiarowe do badań wymiany ciepła w materiałach izolacyjnych w konfiguracji I stosu pomiarowego przedstawiono na fot. 1.



Fot. 1.

Stanowisko pomiarowe do badań parametrów termofizycznych metodą odwrotną. Wariant I stosu pomiarowego.

Na fot. 1 pokazano dwa zasilacze laboratoryjne prądu stałego o sterowanej mocy wyjściowej (maksymalnie 180 VA) firmy Meeter International Corp. serii PPS 2017 z wbudowanym interfejsem IEEE 488. Obok zasilaczy znajdowały się: skaner firmy Keithley (80 Ch. Switching System Mainframe, model 7001) z kartą termoparową firmy Keithley (Thermocouple Card, model 7014) i płytą umożliwiającą montaż karty termoparowej, (Screw Term Conn. Board F. 7014, model 7014-ST, KEITHLEY) do odczytu napięć z 40 termoelementów oraz multimetr cyfrowy tej samej firmy typu 2000. W termosie utrzymywano w stałej temperaturze wynoszącej  $0^{\circ}\text{C}$  „zimne” końce termoelementów płaszczykowych typu K o średnicy zewnętrznej płaszczka wynoszącej 0,5 mm. Właściwy stos pomiarowy umieszczony był w obudowie termostatu laboratoryjnego. Centralnym elementem stosu pomiarowego był grzejnik cienkowarstwowy firmy OMEGA o średnicy 198,8 mm i grubości 1 mm. Rezystancja grzejnika w temperaturze  $22^{\circ}\text{C}$  wynosi  $22,4 \Omega$ . Maksymalna temperatura jego pracy nie powinna przekraczać  $200^{\circ}\text{C}$ , ze względu na użyty Kapton jako podłoże dla naniesionej warstwy miedzi. Widok omawianego grzejnika przedstawiono na fot. 2.

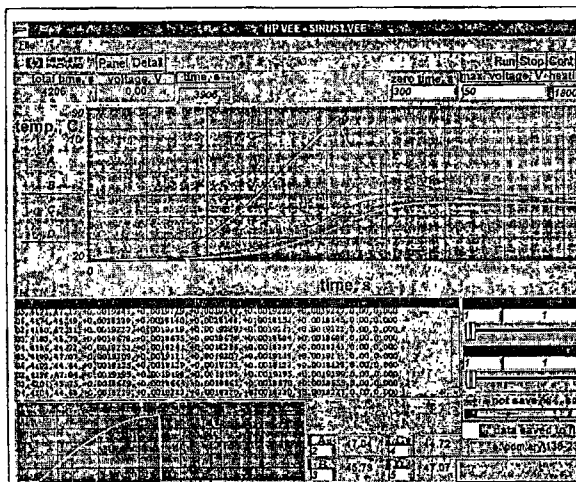


Fot. 2.

Grzejnik cienkowarstwowy KHR 8/10 firmy OMEGA i powiększony fragment jego spirali grzejnej.

W czasie pracy stanowiska pomiarowego na ekranie komputera widoczny był przedstawiony na rys. 2 panel sterowania utworzony przy pomocy środowiska HP VEE, czyli zespół wirtualnych przyrządów pomiarowych, mierzących np. numer cyklu pomiarowego, czas pomiaru, numer kanału pomiarowego, moc grzejników cienkowarstwowych realizujących zadany przez użytkownika program. Również na ekranie komputera śledzono zmiany mierzonych wielkości w funkcji czasu, np. temperatury w funkcji czasu w kilku punktach stosu pomiarowego, a także wpisywać w odpowiednie aktywne pola wartości parametrów sterujących programem. Przykładowy przebieg zmian czasowych temperatury w punktach pomiarowych oznaczonych na rys. 1 (stos pomiarowy w wersji 3) jako  $Y_1(t)$ ,  $Y_2(t)$ ,  $Y_3(t)$  oraz kształt napięcia sterującego grzejnikiem cienkowarstwowym przedstawia rys.2. Badanym materiałem było szkło organiczne (plexi), z którego wykonano cztery identyczne próbki, każda o średnicy 200 mm i grubości 12,4 mm. Doświadczalnie wyznaczona gęstość tego tworzywa w temperaturze 22 °C wynosiła  $\rho = 1118,87 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Przed włożeniem do stosu pomiarowego powierzchnie czołowe próbek zostały pokryte pastą silikonową dobrze przewodzącą ciepło firmy Dow Corning typu 340 w celu polepszenia kontaktu cieplnego. Program pomiarowy realizował 300 sekundową rejestrację wstępną sygnałów termoelektrycznych, zasilanie napięciem sterującym postaci (1) w czasie  $T=1800 \text{ s}$  i amplitudzie  $U_0 = 50 \text{ V}$  grzejnikiem cienkowarstwowym oraz dalszą rejestrację po wyłączeniu zasilania grzejnikiem.

$$U(t) = 50 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right), \quad 0 < t \leq 1800 \quad (1)$$



Rys. 2.

Panel wirtualnego rejestratora sygnałów pomiarowych stanowiska do badań parametrów termofizycznych ciał stałych metodą odwrotną.

Po każdym cyklu pomiarowym przechowywane w pamięci operacyjnej komputera mierzone wartości czasu, sygnałów termoelektrycznych i odpowiadające tym sygnałom temperatury oraz wartości napięcia i prądu zasilającego grzejnik były składowane w pamięci masowej (na twardym dysku) w postaci kolejnego zbioru danych.

### 3. WYGLĄDANIE SYGNAŁÓW

Temperatura dla konkretnego punktu pomiarowego była wyznaczana w ten sposób, że najpierw program obliczał wartość dla średniej arytmetycznej z pięciu kolejnych odczytów napięcia termoelektrycznego a następnie korzystał z charakterystyki termoelementu płaszczowego typu K firmy Herauss (dla zakresu temperatury od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+240^{\circ}\text{C}$ ) postaci

$$t(U) = \sum_{k=0}^7 a_k U^k, \quad U - [\text{mV}], \quad t - [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

gdzie współczynniki  $a_i$  wyrażają się przez

$$a_0=0,0024716252; \quad a_1=25,352346; \quad a_2=-0,41739666; \quad a_3=0,064817734; \\ a_4=-0,011922646; \quad a_5=0,0028802927; \quad a_6=-0,00031612711; \quad a_7=1,1714511\text{E-}05$$

W celu przygotowania danych wejściowych do rozwiązania OZWPC sprowadzono temperatury  $Y_i(t)$  ( $i=1,2,3$ ) oraz napięcie  $U(t)$  i prąd  $I(t)$  do jednakowych chwil czasu poprzez interpolację uzyskanych wyników pomiarów za pomocą funkcji sklepanych 3-go stopnia typu B [3], a następnie tak otrzymane punkty pomiarowe wygładzano stosując jedną z metod filtracji (filtr cyfrowy 7 punktowy, 11 punktowy) lub tak zwaną metodę cross-validation (CSV) zaczerpniętą z biblioteki IMSL kompilatora FORTRAN pod nazwą CSSCV. Do przeprowadzenia analizy wpływu proponowanych metod wygładzających na dokładność rozwiązania OZWPC zastosowano symulowane dane pomiarowe, które otrzymano w wyniku rozwiązania prostego zagadnienia niestabilnego przewodnictwa cieplnego, podstawiając do niego dane, które możliwe jak najwierniej przybliżyły eksperyment. W tym celu przyjęto: gęstość materiału  $\rho = 1118,87 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , stałą przewodności cieplną  $\lambda = 0,190 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  oraz ciepło właściwe  $c_p$  w postaci:

$$c_p(t) = 1340,97 + 2,3001381 \cdot t + 0,029042656 \cdot t^2, \quad \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad (3)$$

Założono, że w chwili początkowej występowała w całej próbce, traktowanej jako ośrodek 1-wymiarowy, jednorodny i izotropowy, o grubości  $b=24,8 \text{ mm}$  i średnicy  $d=200 \text{ mm}$  stała temperatura wynosząca  $+18,0^{\circ}\text{C}$ . Powierzchnię zewnętrzną próbki ( $x=24,8 \text{ mm}$ ) przyjęto jako adiabatyczną, natomiast na brzegu ( $x=0$ ) założono zmienną w czasie gęstość strumienia ciepła  $q(\tau)$  ( $U_0=50,0 \text{ V}$ ,  $I_0 = 1,987 \text{ A}$ ) postaci:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \frac{4 \cdot U_0 \cdot I_0}{\pi \cdot d^2} \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot \tau}{2 \cdot T} \right) \quad (4)$$

Uzyskane rozwiązanie problemu prostego w postaci zmian czasowych temperatury  $Y_i(\tau)$  w punktach odpowiadających położeniu termoelementów ( $x=0 \text{ mm}$ ,  $x=12,4 \text{ mm}$ ,  $x=24,8 \text{ mm}$ ) poddawano następnie zaburzeniu generatorem liczb pseudolosowych RND postaci:

$$\tilde{Y}_i(\tau) = Y_i(\tau) + 2 \cdot Z \cdot (\text{RND}(0) - 0,5) \quad (5)$$

gdzie  $Z$  – amplituda zaburzenia (niedokładność pomiaru temperatury) i służyły one następnie jako dane wejściowe do rozwiązania problemu odwrotnego, to znaczy wyznaczenia nieznanych charakterystyk termicznych  $\lambda(t)$  oraz  $c_p(t)$ .

Wygładzanie zaburzonych danych przy pomocy filtru cyfrowego 7-punktowego (FCYF7) polegało na cyklicznym przesuwaniu siedmiu punktów o jeden krok czasowy do przodu przy zastosowaniu do punktu środkowego  $u_3$  procedury wygładzającej [4]

$$u_3 = (-2u_{-3} + 3u_{-2} + 6u_{-1} + 7u_0 + 6u_1 + 3u_2 - 2u_3) / 21 \quad (6)$$

a w przypadku filtru cyfrowego 11 punktowego (FCYF11) dla punktu środkowego  $u_5$

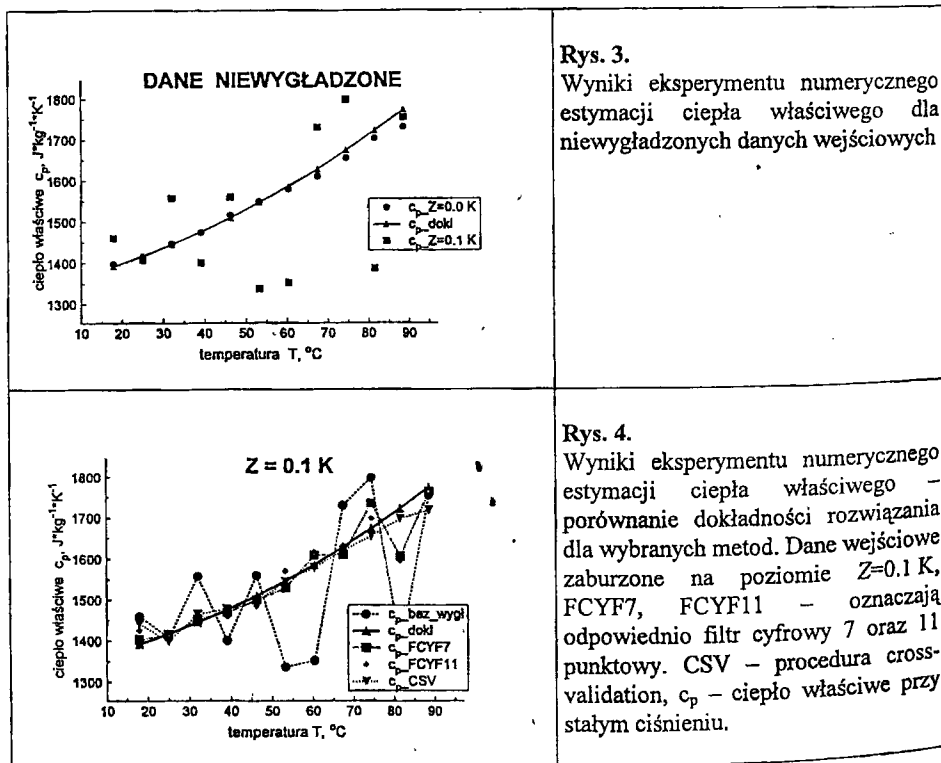
$$u_5 = (-36u_{-5} + 9u_{-4} + 44u_{-3} + 69u_{-2} + 84u_{-1} + 89u_0 + 84u_1 + 69u_2 + 44u_3 + 9u_4 - 36u_5) / 429 \quad (7)$$

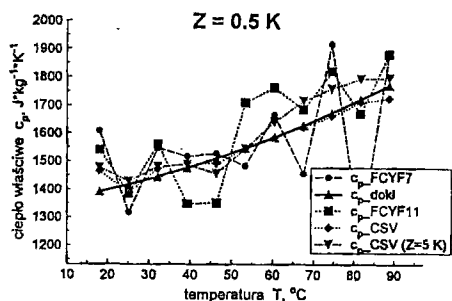
#### 4. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH SYMULACJI I WNIOSKI

Na sygnał pomiarowy z termoelementów nakładano zaburzenia (5) o amplitudzie  $Z=0.0$  K,  $Z=0.1$  K,  $Z=0.5$  K,  $Z=5$  K. Jako miarę jakości metody wygładzania przyjęto odchylenie standardowe  $S_n$  pomiędzy dokładną wartością parametru termofizycznego ( $\lambda$  lub  $c_p$ ) a wartością obliczoną w tym samym punkcie temperatury w postaci

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z_i - \bar{z}_i]^2}{n}} \quad (8)$$

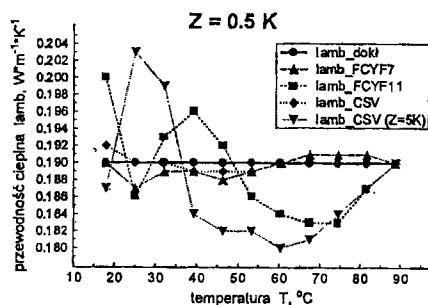
gdzie  $z_i$  – obliczona z rozwiązania OZWPC wartość ciepła właściwego bądź przewodności cieplnej dla temperatury  $t_i$ ,  $\bar{z}_i$  – wartość dokładna,  $n$  – ilość wartości temperatury  $t_i$ . Metodę obliczeń OZWPC przedstawiono w [5]. Uzyskane wyniki obliczeń zilustrowano na rysunkach (rys.3 – rys.6)





Rys. 5.

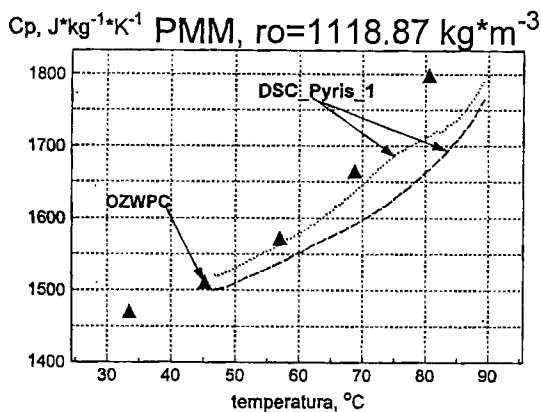
Wyniki eksperymentu numerycznego estymacji ciepła właściwego – porównanie dokładności rozwiązania dla wybranych metod. Dane wejściowe zaburzone na poziomie  $Z=0.5$  K. Dodatkowo dla metody CSV przyjęto zaburzenie  $Z=5$  K.



Rys. 6.

Wyniki eksperymentu numerycznego estymacji przewodności cieplnej – porównanie dokładności rozwiązania dla wybranych metod. Dane wejściowe zaburzone na poziomie  $Z=0.5$  K. Dodatkowo dla metody CSV przyjęto zaburzenie  $Z=5$  K.

Na rys.7 przedstawiono porównanie wyników estymacji charakterystyki termicznej ciepła właściwego metodą odwrotną oraz metodą kalorymetrii DSC.



Rys. 7.

Zestawienie obliczonych metodą odwrotną (OZWPC) oraz zmierzonych na kalorymetrze skaningowym DSC wartości liczbowych ciepła właściwego w funkcji temperatury dla szkła organicznego (plexi) o gęstości  $\rho = 1118,87 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

W tablicy 1 zestawiono wartości odchylenia standardowego  $S_n$  dla ciepła właściwego i przewodności cieplnej. Kreskami zaznaczono utratę stabilności rozwiązania OZWPC.

Tablica 1. Wartości odchylenia standardowego  $S_n$  dla  $c_p$  i  $\lambda$ .

Z [K]	Bez wygładzania		FCYF7		FCYF11		CSV	
	$S_n(\lambda)$	$S_n(c_p)$	$S_n(\lambda)$	$S_n(c_p)$	$S_n(\lambda)$	$S_n(c_p)$	$S_n(\lambda)$	$S_n(c_p)$
0,0	0,0009	17,27	0,0010	19,93	0,0011	23,08	0,0009	17,27
0,1	0,0059	162,23	0,0005	43,42	0,0012	45,80	0,0010	27,60
0,5	---	---	0,0012	203,94	0,0057	132,45	0,0007	32,01
5,0	---	---	---	---	---	---	0,0080	59,62

Przedstawione na rysunkach (rys.3-rys.6) wyniki przeprowadzonego eksperymentu numerycznego oraz zamieszczone w tablicy 1 wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych metod pozwalają wyciągnąć następujące wnioski:

- wygładzanie danych pomiarowych do rozwiązania OZWPC jest celowe ze względu na stabilność jego rozwiązania. W przypadku niewygładzonych danych pomiarowych utrata stabilności nastąpiła już na poziomie zaburzenia  $Z=0,5$  K;
- zastosowanie filtru cyfrowego 11 punktowego zapewnia lepsze rezultaty dla ciepła właściwego w przypadku większych zaburzeń niż dla filtru cyfrowego 7 punktowego. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku przewodności cieplnej;
- najbardziej skuteczną metodą okazała się metoda cross-validation (CSV), która zapewniła najmniejsze błędy średniokwadratowe, a także, jako jedyna z rozpatrywanych metod, dostarczyła stabilnego rozwiązania przy zaburzeniu danych wejściowych na poziomie  $Z=5$  K;
- porównanie wyników obliczeń ciepła właściwego metodą OZWPC oraz wyników pomiarów metodą kalorymetrii DSC (rys. 7) dla plexi świadczy o ich dobrej zgodności. Błąd względny nie przekracza 10 %.

#### LITERATURA

- [1] J. Zmywaczyk, P. Koniorczyk, J. Józwiak: *Układ akwizycji i opracowania danych pomiarowych stanowiska do badań eksperymentalnych parametrów termofizycznych metodą odwrotną*. Materiały konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej n.t. Automatyzacja – Nowości i Perspektywy, AUTOMATION'99, Warszawa, 24-26 marca 1999, str.444-451.
- [2] O.M. Alifanov, E.A. Artyukhin, S.V. Rumyantsev: *Extreme Methods for Solving Ill-Posed Problems with Applications to Inverse Heat Transfer Problems*. Begell House, N.Y., 1995.
- [3] Z. Kosma: *Wstęp do metod funkcji sklepanych*, WSI Radom, 1986.
- [4] J. Taler: *Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła*, Ossolineum, 1995
- [5] J. Zmywaczyk, P. Koniorczyk: *Estimation of the temperature-dependent thermal conductivity and specific heat for selected plastics*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Delft, Holland, 1-3 June 1999, pp. 499-504