



## Badania dyfuzyjności cieplnej wody metodą wymuszenia okresowego

Robert SZCZEPANIAK<sup>1</sup>, Andrzej J. PANAS<sup>1, 2</sup>,  
Mirośław NOWAKOWSKI<sup>2</sup>, Jaromir PANAS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institut Techniki Lotniczej, Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,*

<sup>2</sup>*Institut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa,*

<sup>3</sup>*Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zastosowanie zmodyfikowanej metody wymuszeń okresowych do określenia dyfuzyjności cieplnej wody. Eksperyment objął przedział temperatury od  $-13,6^{\circ}\text{C}$  do  $+12,0^{\circ}\text{C}$ . Dyfuzyjność cieplną wyznaczono z danych zarówno amplitudowych, jak i fazowych. W odróżnieniu od klasycznego sposobu postępowania, w obliczeniach wykorzystano nieprzybliżone zależności modelu analitycznego generujące równania przestępne. Badania potwierdziły skuteczność zastosowanej metody badań, która może być wykorzystana do zweryfikowania dotychczas publikowanych danych.

**Słowa kluczowe:** mechanika, fizyczne właściwości materiałów, dyfuzyjność cieplna wody/lodu, metoda wymuszeń okresowych

### 1. WSTĘP

Bezpośrednią przyczyną podjęcia badań jest konieczność zweryfikowania danych literaturowych dotyczących dyfuzyjności cieplnej wody i określenie możliwości uzyskania danych dotyczących tego parametru w obszarze przemiany fazowej ciec-z ciało stałe w ramach jednego eksperymentu.

Potrzeba uzyskania tego typu informacji wynika z prowadzonych od wielu lat badań i analiz dotyczących zagadnienia oblodzenia statków powietrznych (por. np. [14, 25, 26]).

Rozbieżności danych literaturowych dotyczących dyfuzyjności cieplnej (lub zamiennie przewodności cieplnej) wody, mają charakter zarówno ilościowy, jak i jakościowy. Obszarem krytycznym w tym zakresie jest bliskie otoczenie punktu topnienia lodu – zamarzania wody, określanego standardowo, bez uwzględnienia zjawiska przechłodzenia cieczy, na 0°C dla ciśnienia normalnego. Do zilustrowania problemu można przywołać dane monografii [23] i [24] oraz prac [8] i [27]. W odniesieniu do lodu o różnych strukturach różnice w stosunku do publikowanych danych potwierdzono w badaniach własnych [14].

W niniejszym przypadku badania dyfuzyjności cieplnej wykonano zmodyfikowaną metodą Ångströma (por. [1÷4, 10, 13]). W celu zlikwidowania ograniczeń związanych z koniecznością odpowiedniego doboru częstotliwości oscylacji oraz uzyskania możliwości przeprowadzenia pomiaru w określonym przedziale temperatury do dotychczas stosowanych procedur wprowadzono dodatkowe zmiany. Pierwsza polega na rezygnacji ze stosowanych powszechnie przybliżeń (por. [3]) i wykorzystaniu do obliczeń wartości poszukiwanego parametru wzorów dokładnych, generujących problem rozwiązywania równań przestępnych [17]. Druga modyfikacja to zastosowanie liniowo zmiennej podstawy oscylacji (przemiatanie/skanowanie zakresu [15÷17]).

## 2. OPIS METODY I PROCEDURY BADAŃ

### 2.1. Model matematyczny

Podstawę teoretyczną do zastosowania metody pomiaru dyfuzyjności cieplnej z wykorzystaniem oscylacji temperatury z liniowo zmienną podstawą oscylacji stanowi superpozycja rozwiązań jednowymiarowego zagadnienia przewodzenia ciepła w płaskiej nieskończonej płycie dla dwóch przypadków uporządkowanej wymiany ciepła odpowiednio trzeciego i drugiego rodzaju [11], [12], [17], [20]. Zagadnienie opisane jest równaniem Fouriera [5, 11]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (1)$$

gdzie:  $\theta$  – jest nadwyżką temperatury  $T$ ,  $\tau$  – czasem,  $x \in [0, l]$  – zmienną przestrzenną,  $l$  – grubością płyty,  $a$  – dyfuzyjnością cieplną,  $\rho$  – gęstością,  $c_p$  – ciepłem właściwym przy stałym ciśnieniu z jednorodnym warunkiem początkowym:

$$\theta(x, 0) = T(x, 0) - T_0 = 0 \quad (2)$$

następującym warunkiem brzegowym adiabatyeczności na jednym brzegu:

$$\frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

oraz warunkami wymuszenia odpowiednio oscylacyjnego i liniowego na drugim brzegu:

$$\theta(l, \tau) = A_0 \sin(2\pi f \tau - \varepsilon) \quad \text{lub} \quad \theta(l, \tau) = T_0 + b \tau \quad (4a, b)$$

gdzie:  $A_0$  jest amplitudą,  $f$  – częstotliwością,  $\varepsilon$  – przesunięciem fazowym wymuszenia oscylacyjnego, natomiast  $T_0$  jest składową stałą, a  $b$  – szybkością zmian temperatury komponentu liniowo zmiennego.

W przybliżeniu długich czasów – dla spełnionych warunków uporządkowanej wymiany ciepła [11] – superpozycję rozwiązań problemów można przedstawić zależnościami:

$$\theta(x, \tau) \underset{\tau \rightarrow \infty}{=} A_0 \psi \sin(2\pi f \tau - \varphi - \varepsilon) + b \frac{x^2 - l^2}{2a} + b \tau \quad (5)$$

gdzie (por. rys. 1a):

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{\cosh 2kx + \cos 2kx}{\cosh 2kl + \cos 2kl}} \quad (6)$$

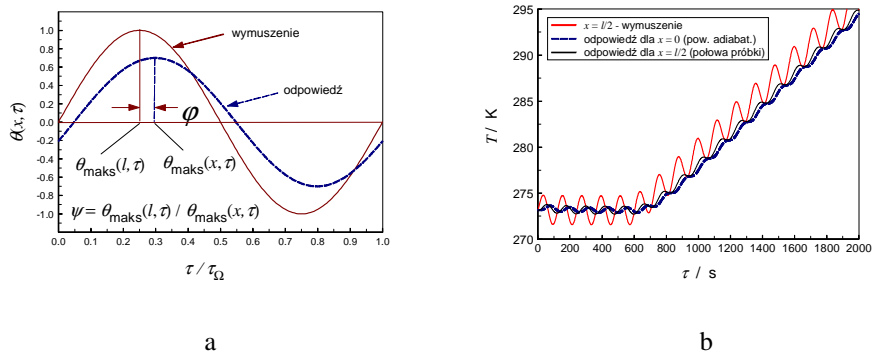
$$\varphi(x) = \arg \left[ \frac{\cosh kx(1+i)}{\cosh kl(1+i)} \right] \quad (7)$$

$$k = \sqrt{\frac{\pi f}{a}} = \sqrt{\frac{\pi}{a \tau_\Omega}} \quad (8)$$

Jak widać, dyfuzyjność cieplna jest „zaszyta” w zależnościach (6) i (7) poprzez parametr  $k$  definiowany równaniem (8). Analizując zatem tłumienie amplitudy  $\psi$  oraz opóźnienie fazowe  $\varphi$  sygnału odpowiedzi w punkcie  $x$  w stosunku do sygnału wymuszenia  $x = l$  i rozwiązując równania przestępne (6) oraz (7), można wyznaczyć stosowne dwie wartości dyfuzyjności: tzw. amplitudową i fazową [19]. Ze względu na uciążliwość procedur rozwiązywania równań przestępnych dotychczas zależności te były na ogół przekształcane do przybliżonych postaci podających jawne zależności na dyfuzyjność cieplną (por. [3]). Wiązało się to jednak z ograniczeniami dotyczącymi częstotliwości wymuszenia oscylacyjnego [16, 17]. W niniejszym przypadku do wyznaczenia  $a$  zastosowano bezpośrednio związki (6) i (7).

Uzupełniając powyższą analizę, należy dodać, że dyfuzyjność cieplna występuje również w drugim członie prawej strony rozwiązania równania (5).

Wykorzystanie przesunięcia wartości średniej temperatury oscylacji w cyklu liniowego grzania/chłodzenia (por. rys. 1b) do wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej odpowiada konstrukcji metody uporządkowanej wymiany ciepła II rodzaju (por. [11, 12, 13]).



Rys. 1. Porównanie zmian temperatury stanowiących sygnał wymuszenia i odpowiedzi (a) oraz ilustracja przebiegów temperatury przy stosowanych w badaniach dwóch podstawowych sposobach pomiaru: ustalonych oscylacji i oscylacji wokół liniowo zmiennej temperatury średniej (b) [17]

Fig. 1. Illustration of the sinusoidal thermal response attenuation and lagging (a) and illustration of the sinusoidal temperature oscillation over a stable and a linearly changed offset (b) [17]

## 2.2. Procedura badań

Ze względu na zastosowanie w modelu równania Fouriera (1), które zawiera w sobie założenie niezależności właściwości cieplno-fizycznych od temperatury, pomiary należy wykonywać przy jak najmniejszych amplitudach oscylacji i przy odpowiednio z nimi skorelowanych szybkościach zmian temperatury średniej. Odpowiada to dążeniu do uzyskania dużej rozdzielczości temperaturowej badań [18]. Zmniejszanie amplitudy oscylacji powoduje jednak wzrost błędu pomiaru temperatury, szczególnie w przypadku sygnału odpowiedzi. Istnieją również ograniczenia związane z wejściem w obszar dużej nieliniowości wyrażen (6) i (7) przy zbyt małych częstotliwościach oscylacji [20]. Nie są to ograniczenia tak restrykcyjne jak warunek:

$$k l > 1,5 \quad \Leftrightarrow \quad f > \frac{2,25}{\pi} \frac{a}{l^2} \quad (9)$$

stosowany przy wykorzystaniu dwóch wzorów przybliżonych w miejsce zależności (6) i (7) [3].

Nadal występujące ograniczenia mają jednak pewien wpływ na wybór parametrów wymuszenia oscylacyjnego. W niniejszym przypadku warunek (9) traktowany jest tylko jako kryterium wyboru wstępnego przy określaniu pomiarowej częstotliwości oscylacji. Sam program zmian temperatury (zmian temperatury podstawy oscylacji) jest budowany z odcinków odpowiednio ustalonej oraz liniowo zmiennej temperatury, jak przedstawiono to na rysunku 1b. Czas trwania dla każdego segmentu dobiera się tak, by przeważającej jego części odpowiadały warunki uporządkowanej wymiany ciepła. Zarejestrowane dane poddawane są aproksymacji w przedziałach odpowiadających jednemu okresowi funkcją postaci:

$$f(\tau) = A \sin(2\pi f \tau + B) + C + D \tau ; \quad n \tau_{\Omega} \leq \tau < (n+1)\tau_{\Omega}, \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (10)$$

gdzie:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – są szukanymi współczynnikami,  $n$  – indeksem okresu (przedziału) aproksymacji,  $N$  – liczbą analizowanych okresów. Wartości prawych stron równań (6) oraz (7) określa się jako:

$$\psi = \frac{A_{x=0,n}}{A_{x=l,n}}, \quad \varphi = B_{x=l,n} - B_{x=0,n} \quad (11)$$

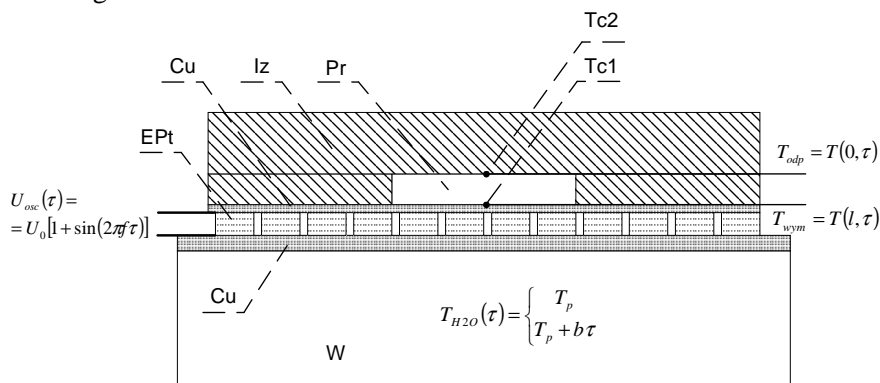
Dyfuzyjność cieplna jest wyznaczana przy zastosowaniu procedury numerycznej rozwiązywania problemów nieliniowych.

### 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

#### 3.1. Stanowisko badawcze

Badania dyfuzyjności cieplnej próbek płaskich są wykonywane z wykorzystaniem głowicy pomiarowej przedstawionej na rysunku 2. Elementy Peltiera służą do wygenerowania okresowych zmian temperatury górnej płyty miedzianej, do której przylega badana próbka. Elementy są zasilane ze sterowanego komputerowo poprzez magistralę GPIB zasilacza prądu stałego Amrel PPS 1322. Napięcie zasilania jest zmieniane z częstotliwością 1 Hz tak, by odtworzyć w dyskretnych wartościach odzerowotętniający sygnał sinusoidalny. Boczna i górna izolacja cieplna próbki ma na celu zapewnienie warunku adiabatyczności. Do pomiaru temperatury wykorzystuje się termoelementy typu K o średnicy drutów 0,1 mm i złącza przelotowym. Standardowo montowane są dwa termoelementy na przeciwległych powierzchniach próbki, ale wykonywane są również badania z termoelementami umieszczanymi w środku próbki. Do pomiaru sygnałów termoelektrycznych stosowana jest ośmiokanałowa 16-bitowa karta systemu National Instruments SCXI 1000. Stabilizację oraz możliwość programowanych zmian temperatury dolnej płyty miedzianej zapewnia ultratermostat Lauda RL6CP.

Czynności nadzoru systemu oraz gromadzenia i opracowania danych pomiarowych realizowane są za pomocą wirtualnych sterowników oraz przeliczników stanowiących oprogramowanie kontrolera systemu – komputera przenośnego.



Rys. 2. Schemat głowicy układu pomiarowego:

Pr – badana próbka, Iz – izolacja cieplna, Cu – płyta miedziana, EPt – elementy Peltiera, W – komora termostatu cieczowego, Tc1, Tc2 – termoelementy pomiarowe odpowiednio sygnału wymuszenia i odpowiedzi

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup for thermal diffusivity measurements by temperature oscillation in scanning mode: Pr – the investigated specimen, Iz – thermal insulation, Cu – copper plate, EPt – Peltier thermoelectric device, W – thermostatic block with thermostatic fluid flow, Tc1, Tc2 – thermocouples for measurements of the temperature excitation and response respectively

### 3.2. Charakterystyka badanej substancji i opis procedury pomiaru

Badania przeprowadzono dla wody destylowanej jednokrotnie. Do wykonania pomiarów przygotowano formy ze styropianu z kołowym wycięciem kształtującym dysk badanej cieczy. Formy przytwierdzono do górnej powierzchni płyty miedzianej stykającej się powierzchnią dolną z elementami Peltiera. Formy przed zalaniem wodą i przykryciem warstwą styropianu izolującego uszczelniono masą silikonową (por. rys. 2). Na tym etapie przygotowano również termoelementy pomiarowe. Były to termoelementy typu K w osłonie teflonowej o średnicy drutów 0,12 mm do wymuszenia – przelotowy, do odpowiedzi – ze złączem typu „V” z podwójnego drutu w zespolonej osłonie teflonowej. Dwa główne czujniki umiejscowiono odpowiednio: na dole na płycie miedzianej i w okolicy powierzchni zwierciadła wody. Górny termoelement pomiarowy został przytwierdzony od dołu do warstwy izolacji zamykającej przestrzeń próbki. Powstała po zalaniu wodą próbka miała średnicę ok. 33 mm i wysokość 10,5 mm.

Spoina pomiarowa górnego termoelementu znalazła się na głębokości 0,75 mm od lustra wody, czyli w odległości 9,75 mm od powierzchni podstawy próbki.

W badaniach zastosowano wymuszenie o okresie oscylacji 120 s i amplitudzie wynoszącej 0,5 K. Biegunowość zasilania elementów Peltiera dobrano tak, by dolna powierzchnia była chłodzona, co zapobiega swobodnej konwekcji badanej cieczy. Pomiar rozpoczęto od wartości  $+12^{\circ}\text{C}$ . Po około dwóch godzinach pomiaru rozpoczęto sukcesywne zmniejszanie temperatury podstawy oscylacji, osiągając ostatecznie wartość  $-14^{\circ}\text{C}$  (por. rys. 3.1a).

### 3.3. Wyniki badań

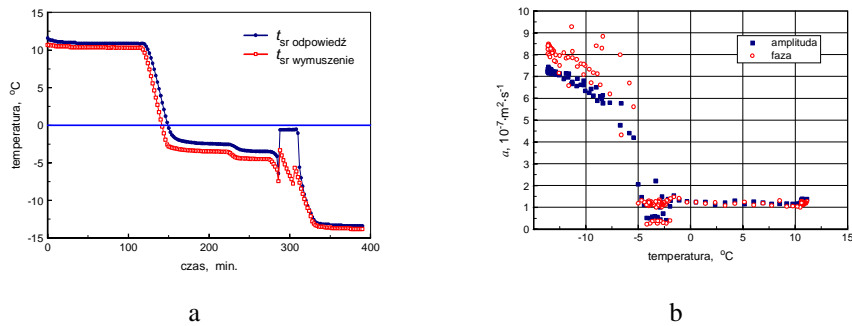
Uzyskane wyniki pomiaru dyfuzyjności cieplnej przedstawiono na rysunkach 3b oraz 4. Z prezentacji na rysunku 4 wyłączono jedynie niewielkie fragmenty danych odpowiadających wykroczeniu poza zastrzeżone założeniami modelu warunki uporządkowanej wymiany ciepła. Dotyczy to każdorazowego przejścia pomiędzy cyklami stabilizacji i liniowych zmian temperatury średniej oraz okresu bezpośrednio po rozpoczęciu procesu zamrażania przechłodzonej wody.

Analizując zbiorcze wyniki badań przedstawione na rysunku 3b, skomentować należy rozbieżności pomiędzy wynikami pomiaru amplitudowego oraz fazowego. Efekt ten jest spowodowany niedotrzymaniem warunków adiabatyczności powierzchni bocznej i powierzchni górnej próbki. W odniesieniu do strat bocznych efekt jest podobny do efektu obserwowanego w badaniach klasyczną metodą Ångströma (por. [5, 19]). W tym przypadku wyniki amplitudowe i fazowe stanowią odpowiednio dolne i górne ograniczenie dla rzeczywistych wartości dyfuzyjności cieplnej. Podobnie jest ze stratami z powierzchni poziomej do izolacji ze styropianu. Zaobserwowane różnice obliczeniowych wartości dyfuzyjności cieplnej są większe w obszarze niskiej temperatury ze względu na większe wartości przewodności cieplnej lodu od przewodności cieplnej cieczy. Pomimo różnic, zgodność wyników badań amplitudowych z fazowymi można uznać za więcej niż zadowalającą. W dostępnej literaturze autorzy ograniczają z reguły prezentację wyników do podawania jednej tylko charakterystyki (por. [3, 4, 7, 9]). Jest to uwarunkowane trudnościami metrologicznymi.

Podczas pomiaru uzyskano przechłodzenie próbki cieczy do  $-4,6^{\circ}\text{C}$ . Wartości dyfuzyjności cieplnej wody z obszaru przechłodzenia (rys. 4a – wyniki oznaczone symbolem A) są zgodne z wartościami dyfuzyjności cieplnej wody ciekłej. Jest to zgodne z oczekiwaniami. Ze względu na brak danych literaturowych dotyczących właściwości przechłodzonej wody nie można tego wyniku skonfrontować z innymi danymi eksperymentalnymi.

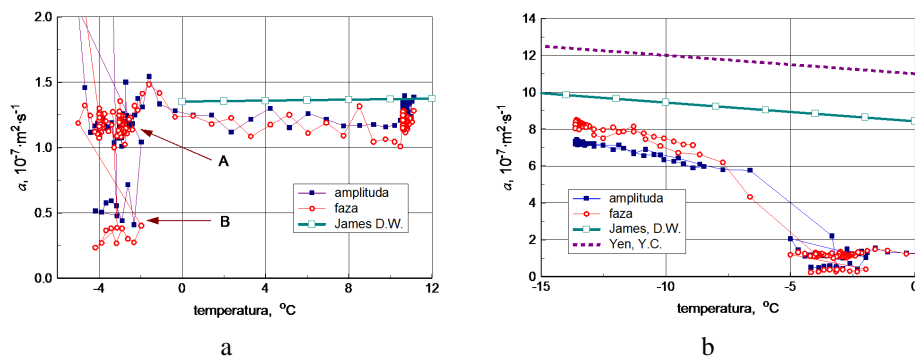
Na rysunku 4b zaznaczono symbolem B zbiór wartości obliczeniowych dyfuzyjności cieplnej odpowiadających procesowi zamrażania wody.

Wartości te są znacznie niższe od pozostałych ze względu na „obciążenie” procesu entalpią przemiany fazowej i nie mogą być interpretowane jako dyfuzyjność cieplna w rozumieniu definicji (1).



Rys. 3. Program temperaturowy w postaci zmian średniej temperatury oscylacji sygnału wymuszenia i odpowiedzi (a) oraz uzyskane wyniki (b) pomiaru dyfuzyjności cieplnej wody (z pomiaru amplitudowego i fazowego)

Fig. 3. Illustration of the temperature changes in the course of the measurements (a) expressed as the oscillation offset temperature for the temperature excitation (red points) and response (blue points) and the obtained results (b) of the thermal diffusivity measurements (calculated thermal diffusivity values from amplitude – red points – and phase – blue points – analyses)



Rys. 4. Porównanie uzyskanych wyników z wartościami literaturowymi: a) strefa wody, b) strefa lodu; kolejne punkty wyników badań własnych połączono liniami w celu zaznaczenia ich następstwa

Fig. 4. Comparison between the obtained results and the literature data on the thermal diffusivity of water and ice: a) the region of liquid water and b) the region of ice. Red points refer to “amplitude” results and blue points to “phase” results



W kategoriach ilościowych wyznaczone dla wody ciekłej wartości dyfuzyjności cieplnej są niższe od danych podanych przez Jamesa [8] o około 15%.

Charakter zależności badanego współczynnika od temperatury jest w obu przypadkach ten sam – wraz ze wzrostem temperatury występuje niewielki wzrost dyfuzyjności cieplnej.

Dużo większe różnice wartości liczbowych występują w obszarze niskiej temperatury odpowiadającej stałemu stanowi skupienia wody (rys. 4b). Ponieważ w innych eksperymentach uzyskano znacznie większe wartości dyfuzyjności cieplnej, wynoszące ok.  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  [14], wyniki te należy poddać dodatkowej weryfikacji ilościowej. Na podkreślenie jednak zasługuje zgodność jakościowa z danymi literaturowymi (por. [8, 23, 27]) – rezultaty obrazują zmniejszanie się dyfuzyjności cieplnej lodu w miarę zbliżania się do temperatury przemiany fazowej. Co więcej, możliwe wydaje się uzyskanie wiarygodnych ilościowo wyników badań o dużej rozdzielczości temperaturowej przy odpowiednim doborze parametrów eksperymentu. Najbardziej prawdopodobną przyczyną zaniżenia dyfuzyjności cieplnej jest nieuwzględnienie przyrostu objętości lodu w stosunku do wody ciekłej.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zainteresowanie metodą wymuszeń okresowych w badaniach dyfuzyjności cieplnej jest związane z jej dobrym uwarunkowaniem metrologicznym i możliwością łatwych adaptacji. Jej obecne zastosowania wykraczają poza ścisły obszar określony pierwotnym pomysłem Ångströma (por. [1, 6, 7, 9]). W niniejszym przypadku metodę w zmodyfikowanej wersji zastosowano do badania wody przy jej wychładzaniu od  $12^\circ\text{C}$  do  $-14^\circ\text{C}$ . Wprowadzenie dodatkowych zmian do sposobu pomiaru, polegających na zastosowaniu liniowo zmiennej podstawy oscylacji, umożliwiło określenie zależności badanego parametru od temperatury. Dzięki wykorzystaniu w obliczeniach dokładnych zależności modelu matematycznego, rozszerzono zakres możliwych do stosowania w badaniach częstotliwości wymuszenia oscylacyjnego. Tym samym uzyskano możliwość wykonania ciągłego pomiaru zmian dyfuzyjności cieplnej wody podczas przemiany fazowej ciec-ciało stałe.

Porównując otrzymane wyniki liczbowe dyfuzyjności cieplnej z wartościami podanymi w publikacji [8], można stwierdzić zadowalającą zgodność w odniesieniu do obszaru wody ciekłej. Obliczeniowe wartości dyfuzyjności cieplnej są o ok. 10÷15% mniejsze od danych literaturowych. Na podkreślenie zasługuje fakt uzyskania wyników badań z obszaru wody przechłodzonej. W dostępnej literaturze brak jest danych, do których można byłoby się odnieść. W przypadku lodu uzyskane wartości dyfuzyjności cieplnej są mniejsze od wartości literaturowych od 30 do nawet 50%. Wspomnieć jednak należy, że różnice w danych literaturowych przekraczają 25%.

Ze względu na wysoce prawdopodobne efekty zwiększenia bazy pomiarowej w wyniku zwiększania objętości wody przy jej zamarzaniu, wyniki pomiarów z tego obszaru powinny jednak zostać poddane dodatkowej weryfikacji.

W przyszłych badaniach należy również zwrócić uwagę na straty ciepła, przyczyniające się do powstania różnic pomiędzy danymi amplitudowymi i fazowymi. Jak wykazują wyniki symulacji numerycznych (por. [16]), w każdym modelowym przypadku wyniki fazowe stanowią ograniczenie górne, a wyniki amplitudowe – ograniczenie dolne dla identyfikowanej wartości dyfuzyjności cieplnej. Dzięki temu występująca różnica stanowi oszacowanie błędu maksymalnego pomiaru.

Otrzymane rezultaty badań, pomimo obserwowanej różnicy danych z opracowania sygnału amplitudowego i fazowego, stanowią potwierdzenie skuteczności zastosowanej metody i poprawności opracowanej metodyki badań. Metoda może być wykorzystana do przeprowadzenia systematycznych pomiarów dyfuzyjności cieplnej wody i lodu z dużą rozdzielczością termiczną. Z punktu widzenia analizy zjawisk oblodzeniowych szczególnie istotna jest możliwość uzyskania wyników pomiaru dyfuzyjności cieplnej lodu o różnej strukturze. Badania takie znajdują się w planie zamierzeń zespołu badawczego.

## LITERATURA

- [1] Ångström A.J., Neue Methode, das Wärmeleitungsvermögen der Körper zu Bestimmen, *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 114, pp. 513-530, 1861.
- [2] Belling J.M., Unsworth J., Modified Ångström's method for measurement of thermal diffusivity of materials with low conductivity, *Rev. Sci. Instr.*, vol. 58, pp. 997-1002, 1987.
- [3] Bodzenta J., Buraka B., Nowak M., Pyka M., Szałajko M., Tanasiewicz M., Measurement of the thermal diffusivity of dental filling materials using modified Angstrom's method, *Dental Materials*, vol. 22, pp. 617-621, 2006.
- [4] Bodzenta J., Thermal wave methods in investigation of thermal properties of solids, *Eur. Phys. J. Special Topics*, 154, pp. 305-311, 2008.
- [5] Carslaw H.S., Jaeger J.C., *Conduction of Heat in Solids*, 2<sup>nd</sup> Edition, London, Oxford – Clarendon Press, pp. 102-105, 105-112, 2003.
- [6] de Coninck R., Peletsky V.E., Electron Bombardment Modulated Heat Input in: Maglič K.D., Cezairliyan A. and Peletsky V.E., eds.: *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, New York, Plenum Press, pp. 367-428, 1984.

- [7] Friis-Pedersen H.H., Pedersen J.H., Haussler L., Storm B.K., Online measurement of thermal diffusivity during cure of an epoxy composite, *Polymer testing*, vol. 25, pp. 1059-1068, 2006.
- [8] James D.W., *The thermal diffusivity of ice and water between -40 and +60 °C*, Westinghouse Research and Development Center, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Received 10 April 1968, *Journal of Materials Science*, 3, pp. 540-543, 1968.
- [9] Kapischke J., Hapke J., Measurement of the effective thermal conductivity of a Mg-MgH<sub>2</sub> packed bed with oscillating heating, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 17, pp. 347-355, 1998.
- [10] Kosky P.G., Maylotte D.H., Gallo J.P., Ångström's method applied to simultaneous measurements of thermal diffusivity and heat transfer coefficients: Part 1, Theory, *Int. Com. Heat Mass Trans*, 26(8), pp. 1051-9, 1999.
- [11] Lykov A.V., *Tieoriatieplovodnosti*, Moskva, VyshaiaSchola, pp. 274-321, 1967.
- [12] Maglič K.D., Cezairliyan A. and Peletsky V.E., eds., *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, New York, Plenum Press, 1984.
- [13] Maylotte D.H., Kosky P.G., Gallo J.P., Ångström's method applied to simultaneous measurements of thermal diffusivity and heat transfer coefficients: Part 2, *Experimental. Int. Com. Heat Mass Trans*, 26 (8), pp. 1061-1068, 1999.
- [14] Panas A.J., Waślicki P., Transient Temperature Measurements During Wind Tunnel Investigations of Icing Phenomena, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, Cavtat – Dubrovnik 2004, vol. 2, (Zvizdić D., Bermanec L.G., Stašić T., Veliki T. Eds.) LPM/FSB, pp. 1261-1266, Zagreb, 2005.
- [15] Panas A.J., Nowakowski M., Pomiar dyfuzyjności cieplnej struktury osadu lodowego metodą wymuszeń okresowych z numeryczną walidacją procedury badań, *XLVIII Sympozjon „Modelowanie w mechanice”*, 25-29 lutego, s. 135, Wiśła, 2009.
- [16] Panas A.J., Tkaczyk P., *Budowa stanowiska do badania dynamicznych właściwości cieplnych elementów cienkościennych struktur kompozytowych*, Sprawozdanie PBW 992/WAT/2008, Warszawa, WAT, 2009.
- [17] Panas A.J., Nowakowski M., Numerical validation of the scanning mode procedure of thermal diffusivity investigation applying temperature oscillation, *Proceedings of Thermophysics 2009*, Brno, University of Technology, Faculty of Chemistry, pp. 252-259, 2009.

- [18] Panas A.J., Nowakowski M., Analysis of Metrological Conditioning of Thermal Diffusivity Measurements Applying Modified Ångström's Method at Scanning Mode Operation, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 18, no 2, pp. 331-338, 2011.
- [19] Panas A.J., Comparative-Complementary Investigations of Thermophysical Properties – High Thermal Resolution Procedures In Practice, *Proceedings of Thermophysics 2010*, pp. 218-235, Brno University of Technology, Faculty of Chemistry.
- [20] Panas A.J., Nowakowski M., Jakielaszek Z., Tkaczyk P., Badania dyfuzyjności cieplnej past termoprzewodzących metodą wymuszenia okresowego, *Modelowanie inżynierskie*, nr 41, s. 315-322, 2011.
- [21] Panas A.J., Nowakowski M., Panas J.J., Rećko K., *Effect of Approximation on the Results of Modified Ångström's Procedure for the Thermal Diffusivity Measurement*.
- [22] Phylippov L.P., Temperature Wave Techniques in: Maglić K.D., Cezairliyan A. and Peletsky V.E., eds., *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, New York, Plenum Press, pp. 337-365, 1984.
- [23] Ražnjević K., *Tablice cieplne z wykresami*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1966.
- [24] Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I., *Handbook of heat transfer*
- [25] Szczepaniak R., *Badania możliwości określenia dyfuzyjności cieplnej struktur osadu oblodzeniowego metodą wymuszenia okresowego*, praca dyplomowa, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2009.
- [26] Terpiłowski J., Panas A.J., Sobieraj W., Jakielaszek Z., Investigations of an Airfoil Surface Temperature Changes of a Jet Plane on Flight in Changing Atmospheric Conditions, *Proceedings of the 8th Int. Symp. TEMPMEKO 2001*, Berlin, PTB – VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, pp. 1059-1064, 2002.
- [27] Yen Y.C., *Review of thermal properties of snow, ice and sea ice*, CRREL Report 81-10, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA na podstawie: Yila Bai, Zhijun Li, Ming Han, Peng Lu: Approaches to Revise Ice Thermal Diffusivity from Measured Time Series of Temperature in a River.

## **Investigation of the Thermal Diffusivity of Water Applying Temperature Oscillation**

Robert SZCZEPANIAK, Andrzej J. PANAS,  
Mirosław NOWAKOWSKI, Jaromir PANAS

**Abstract.** The modified periodic temperature oscillation i.e. Ångström technique at scanning mode operation has been applied to perform continuous measurements of the thermal diffusivity of water. The investigations has been done at cooling from 12,0°C to -13,6°C. The thermal diffusivity has been calculated independently from two transcendental relations based on the measured amplitude attenuation and the measured phase shift of the temperature oscillation respectively. The experiments have proved performance of the applied method for systematic studies of thermophysical properties of ice accretions. Unique results of the thermal diffusivity of water supercooled to about -5°C have been obtained also.

**Keywords:** applied mechanics, thermophysical properties of materials, thermal diffusivity of ice/water, temperature oscillation technique

