

UDOSKONALONA METODA POMIARÓW PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ PŁYNÓW – STANOWISKO BADAWCZE MAŁYCH MOCY

Dariusz HEIM*, Andrzej MROWIEC**, Karol PRAŁAT**

* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź,
e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl

** Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu, Instytut Politechniczny
ul. Częstochowska 140, 62-800 Kalisz,
e-mails: a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl,
karol_pralat@poczta.fm

Streszczenie: W referacie opisano nowe stanowisko badawcze do pomiarów przewodności cieplnej płynów oraz założenia metody pomiarowej. Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dla trzech wybranych, czystych związków chemicznych o znanej wartości przewodności cieplnej. Badania wykonano metodą „gorącej nici” przy użyciu zmodernizowanego stanowiska pomiarowego małych mocy. Omówiono podstawowe założenia metody, oraz sposób przeprowadzenia pomiarów. Dla trzech wybranych materiałów: aniliny, gliceryny i metanolu przeprowadzono serię 7 lub 5 pomiarów. Wyniki opracowano statystycznie dla poszczególnych serii i na tej podstawie określono wartości współczynnika przewodzenia ciepła. Na koniec porównano otrzymane wyniki z wartościami literaturowymi.

Słowa kluczowe: współczynnik przewodzenia ciepła, pomiar niestacjonarny, metoda „gorącej nici”.

1. WPROWADZENIE

W przypadku tradycyjnych materiałów budowlanych, z uwagi na dokładność otrzymywanych wyników zaleca się stosowanie stacjonarnych metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła λ [1]. Istnieją jednak przypadki, w których metody stacjonarne nie mogą być stosowane i niezbędne jest skorzystanie z metod niestacjonarnych.

Najlepszym przykładem ograniczenia dla stosowania metod stacjonarnych są materiały w stanie płynnym. Należy do nich przede wszystkim woda, która w zależności od miejsca występowania charakteryzuje się różną pod względem ilościowym i jakościowym zawartością zanieczyszczeń. Może ona występować bezpośrednio w porach materiałów budowlanych jak i w bezpośrednim otoczeniu budynku, np. gruncie wpływając w dużej mierze na parametry samego,

zawilgoconego lub nasączonego wodą materiału. Innym przykładem zastosowania płynów w budownictwie są instalacje grzewcze, chłodnicze, a w szczególności zasobniki tych systemów. Z uwagi na zmienne parametry pracy układów pod obciążeniem termicznym stosowane płyny charakteryzują się nietypowymi właściwościami fizycznymi. Ostatnim, interesującym rozwiązaniem są materiały fazowo-zmienne, opisywane we wcześniejszych publikacjach autorów [2]. Charakteryzują się one dodatkowo zdolnością do przejść fazowych w zakresie temperatur wykorzystywanych przez tradycyjne urządzenia pomiarowe, takie jak np. aparaty płytowe. Tym samym istnieją istotne ograniczenia w zastosowaniu stacjonarnych metod pomiarowych.

Wszystkie z omawianych materiałów charakteryzują się dodatkowo wpływem konwekcji naturalnej na wymianę ciepła pomiędzy elementem grzejnym a materiałem. Zastosowanie metody niestacjonarnej daje możliwość uniknięcia wpływu konwekcji, a tym samym uzyskanie bardziej precyzyjnych wyników.

2. METODA POMIAROWA

Metoda „gorącej nici” należy do jednej z bardziej interesujących metod z powodu swojej uniwersalności, szerokiego spektrum zastosowania oraz wysokiej dokładności [3,4]. Ważną zaletą metody, podczas dokonywania pomiaru dla płynów, jest możliwość wyeliminowania wpływu konwekcji na ostateczny wynik pomiaru. Dzięki temu metoda „gorącej nici” może być z powodzeniem stosowana dla materiałów będących w różnych stanach skupienia, w tym materiałów płynnych lub sypkich. Metoda najlepiej sprawdza się

w badaniach materiałów o stosunkowo niewielkiej przewodności cieplnej, np. drewna, gruntu, produktów spożywczych, materiałów ogniotrwałych oraz cieczy. Istnieje także możliwość wykorzystania omawianej metody w badaniach terenowych.

Niestacjonarne metody pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów polegają na określeniu zależności między gęstością strumienia ciepłego wydatkowanego ze stałego źródła ciepła a zmieniającą się temperaturą w czasie, w warunkach nieustalonego przepływu ciepła przez badany materiał [4,5]. Pomiar odbywa się, zatem w warunkach nagrzewania materiału pośrednio poprzez określenie tempa nagrzewania. W układzie $T - \ln t$ po tzw. okresie przejściowym zależność przyjmuje charakter liniowy.

3. STANOWISKO BADAWCZE MAŁYCH MOCY

Prezentowane rozwiązanie aparatu jest rozwinięciem tzw. liniowej sondy cieplnej o stałym wydatku. Idea przyrządu polega na umieszczeniu w materiale stałego źródła ciepła zasilanego stałym prądem elektrycznym w taki sposób, że wydzielający się w czasie strumień ciepła jest stały. W wyniku wydzielanego ciepła nagrzewa się ośrodek, w którym jest umieszczony liniowy element grzejny. Dla odpowiednio długich czasów oraz przy założeniu pomijalnie małej średnicy drutu grzejnego w stosunku do jego długości, współczynnik przewodzenia ciepła można opisać równaniem:

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

gdzie:

Q – ilość ciepła emitowana przez źródło ciepła [W],

L – długość elementu grzejnego [m],

t – czas [s],

T – temperatura elementu grzejnego [C].

Ilość ciepła Q emitowana przez element grzejny jest równa ilości ciepła przejętego przez badany materiał w jednostce czasu, przy założeniu braku strat i pominięciu akumulacji ciepła w elemencie grzejnym.

$$Q = U \cdot I \quad (2)$$

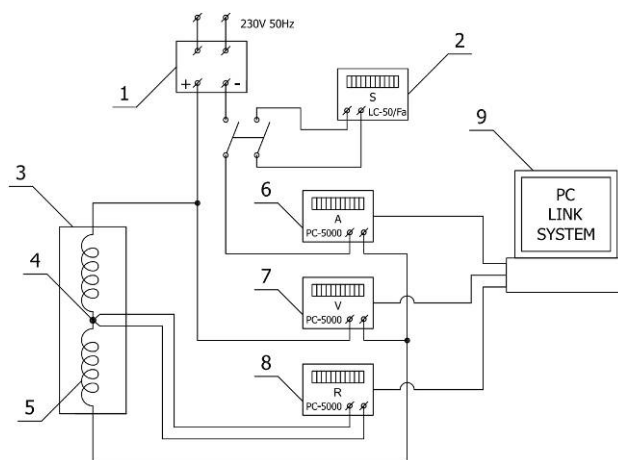
gdzie:

U – napięcie prądu [A],

I – natężenie prądu [V].

Najważniejszym elementem stanowiska pomiarowego jest pojemnik z materiałem, w którym dokonywany jest pomiar współczynnika przewodzenia ciepła wybranych cieczy. Pojemnik wykonano w formie „wanny” o przekroju kwadratowym oraz długości wynikającej z wymaganej długości

elementu grzejnego. W osi naczynia umieszczono prosty odcinek drutu oporowego o średnicy 0,2mm, wykonanego z konstantanu.



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego: 1 – źródło prądu stałego, 2 – stoper, 3 – próbka badanej cieczy, 4 – rezystancyjny czujnik temperatury Pt500, 5 – element grzejny, 6 – amperomierz, 7 – woltomierz, 8 – omomierz, 9 – komputer PC rejestrujący pomiary.

Fig. 1. The scheme of laboratory stand: 1 – the source of direct current, 2 – stopwatch, 3 – sample of analyzed liquid, 4 – resistance temperature sensor Pt500, 5 – heating element, 6 – ammeter, 7 – voltmeter, 8 – ohmmeter, 9 – computer.

Do drutu przymocowano na stałe małowabarytowy, rezystancyjny czujnik temperatury Pt500. Czujnik pomiarowy w układzie mostkowym zasilany jest prądem stałym $I=0,8$ mA ze skompensowanego temperaturowo źródła prądowego LM 234, a powstałe na nim napięcie jest wzmacniane przez precyzyjny wzmacniacz operacyjny typu INA 122. Czujnik Pt 500 z układem pomiarowym tworzy dokładny analogowy przetwornik pomiarowy temperatury w zakresie $10 \div 30^\circ\text{C}$ z wyjściem napięciowym. Analogowy przetwornik temperatury podłączony jest do komputerowego stanowiska pomiarowego składającego się z wejściowego wielofunkcyjnego 14-bitowego przetwornika A/C typu NI USB-6009 firmy National Instruments i interaktywnego oprogramowania do rejestracji i pomiarów (komputer wyposażony jest w sterowniki NI-DAQmx i NI-LabVIEW). Pomiary, były odczytywane i rejestrowane przez system komputerowy co 0,2 sekundy.

4. WYNIKI POMIARÓW

Dla każdego z materiałów wykonano siedem pomiarów w serii przy zadanej mocy 0,4 W. Dodatkowo dla gliceryny przeprowadzono pomiary przy mniejszych i większych mocach, odpowiednio 0,2 W, 0,6 W, 0,8 W i 1,0 W. Badano substancje czyste chemicznie. Pływy każdorazowo, przed rozpoczęciem

badania doprowadzono do temperatury pokojowej. Wszystkie trzy badane substancje pochodziły od specjalistycznego dostawcy i były zakupione tuż przed dokonaniem badania.

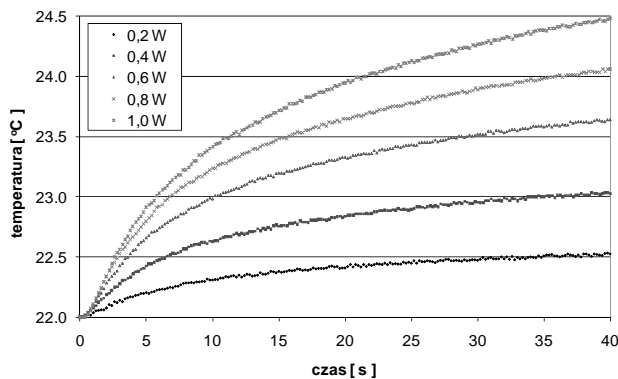
Tabela 1. Literaturowe wartości współczynników przewodzenia ciepła
Table 1. Literature values of the heat conduction coefficients

Substancja	[W/m·K]
Anilina	0,182
Gliceryna	0,278
Metanol	0,212

Wartości literaturowe [7] współczynników przewodzenia ciepła trzech wybranych materiałów zestawiono w tablicy 1.

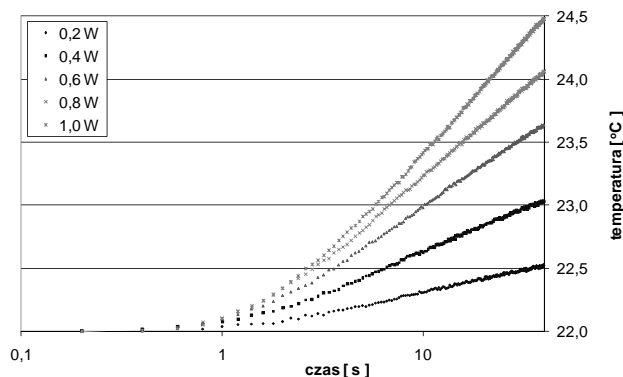
4.1. Porównanie różnych mocy ogrzewania

Na rysunkach 2 i 3 zamieszczono zestawione wyniki pomiarów dla gliceryny. Pomiary przeprowadzono przy zastosowaniu różnych mocy uzyskanych na drucie grzejnym.



Rys. 2. Wykres zależności $T=f(t)$ uzyskany dla gliceryny z różnymi mocami nagrzewania.

Fig. 2. Temperature vs. time for a glycerin with different heating power.



Rys. 3. Wykres zależności $T=f(\ln t)$ uzyskany dla gliceryny z różnymi mocami nagrzewania.

Fig. 3. Temperature vs. \ln of time for a glycerin with different heating power.

Na rysunku 2 przedstawiono historię zmian temperatury elementu grzejnego w czasie, dla pięciu mocy grzania. Przedstawiono pomiar w zakresie od 0 do 40 sekundy. Przy najniższej mocy grzania temperatura zmieniała się od 22 do 22,5°C.

Przy pięć razy wyższej mocy wynoszącej 1,0W temperatura rosła do 24,5°C. Różnica temperatur po 40 sekundach jest prawie proporcjonalna do mocy grzania. Jedyny wyjątek stanowi pomiar przy mocy 0,6W. Przy tak przyjętych właściwościach drutu oraz mocy grzania należy stwierdzić, że zmiana temperatury ośrodka jest niewielka.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność logarymiczną $T=f(\ln t)$. Zaobserwowano podobne proporcje przyrostu temperatury wraz ze zmieniającą się mocą grzewczą urządzenia. Dodatkowo wyraźnie widać okres czasu, po którym funkcja przyjmuje charakter liniowy. Bez względu na moc grzania następuje to po około 5 sekundach.

Prawidłowe określenie przedziału dla jakiego przyjmowana będzie funkcja jest niezbędne do właściwego oszacowania współczynnika przewodzenia ciepła. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń badawczych [2,6] oraz serii pomiarów dla gliceryny stwierdzono, że wrażliwość metody na sposób przyjęcia zakresu temperatur jest zależna od mocy grzewczej urządzenia.

Tabela 2. Wyniki obliczeń dla gliceryny przy mocy ogrzewania 0,4W
Table 2. Calculated values for glycerin at 0.4 W of heating power

Nr pomiaru	Wartość współczynnika λ [W/m·K]	
	obliczona	aproxymowana
1	0,271	0,279
2	0,270	0,270
3	0,278	0,276
4	0,270	0,276
5	0,278	0,281
6	0,270	0,284
7	0,271	0,275
średnia	0,273	0,277
różnica	0,005	0,001

Tabela 3. Wyniki obliczeń dla gliceryny przy mocy ogrzewania 0,6W
Table 3. Calculated values for glycerin at 0.6 W of heating power

Nr pomiaru	Wartość współczynnika λ [W/m·K]	
	obliczona	aproxymowana
1	0,291	0,292
2	0,298	0,295
3	0,287	0,294
4	0,284	0,288
5	0,282	0,272
6	0,281	0,275
7	0,281	0,281
średnia	0,286	0,285
różnica	0,008	0,007

Tabela 4. Wyniki obliczeń dla gliceryny przy mocy ogrzewania 0,8W
Table 4. Calculated values for glycerin at 0.8 W of heating power

Nr pomiaru	Wartość współczynnika λ [W/m·K]	
	obliczona	aproksymowana
1	0,284	0,292
2	0,276	0,295
3	0,277	0,294
4	0,282	0,288
5	0,292	0,272
6	0,318	0,275
7	0,338	0,281
średnia	0,295	0,285
różnica	0,017	0,007

W tabelach 2÷4 zamieszczono wyniki dla siedmiu serii pomiarów wraz z obliczeniem wartości średniej oraz różnicy pomiędzy wartością średnią a literaturową.

Wartość współczynnika λ określano dwoma sposobami: poprzez obliczenia bezpośrednie oraz znajdując funkcję $T=a \cdot \ln t + b$ w danym zakresie temperatur. W pierwszym przypadku o współczynniku kierunkowym prostej decydują dwa skrajne punkty, zaś w drugim wszystkie punkty należące do danego zakresu. Dzięki temu druga metoda pozwala na ograniczenie wpływu przyjętego zakresu na ostateczny wynik pomiaru.

Największe dokładności w wynikach uzyskanych danym zestawem badawczym zaobserwowano dla niskich mocy, do 0,4W, stosując metodę aproksymacji funkcją liniową otrzymanych wyników. Wraz ze wzrostem mocy cieplnej elementu grzejnego zwiększa się różnica pomiędzy wartościami otrzymanymi a literaturowymi. Dlatego w dalszej części eksperyment przeprowadzono jedynie dla mocy grzejnej urządzenia 0,4 W.

4.2. Porównanie różnych materiałów

W dalszej części dokonano pomiarów dla dwóch pozostałych związków chemicznych: aniliny i metanolu.

Tabela 5. Wyniki obliczeń dla aniliny przy mocy ogrzewania 0,4W
Table 5. Calculated values for aniline at 0.4 W of heating power

Nr pomiaru	Wartość współczynnika λ [W/m·K]	
	obliczona	aproksymowana
1	0,196	0,189
2	0,180	0,186
3	0,195	0,206
4	0,210	0,206
5	0,187	0,215
6	0,170	0,184
7	0,195	0,206
średnia	0,190	0,199
różnica	0,030	0,061

Tabela 6. Wyniki obliczeń dla metanolu przy mocy ogrzewania 0,4W
Table 6. Calculated values for methanol at 0.4 W of heating power

Nr pomiaru	Wartość współczynnika λ [W/m·K]	
	obliczona	aproksymowana
1	0,232	0,211
2	0,220	0,210
3	0,221	0,236
4	0,220	0,211
5	0,216	0,254
średnia	0,222	0,224
różnica	0,035	0,045

Porównując wyniki zestawione w tablicach 2, 5 i 6 dla mocy grzania 0,4W zauważono różny wpływ przyjętego sposobu obliczeń. W przypadku gliceryny wielkości bardziej zbliżone do literaturowych dawała metoda polegająca na aproksymacji funkcji liniowej (tabela 2). Jednak w przypadku dwóch pozostałych cieczy, aniliny i metanolu (tabele 5 i 6) lepsze wyniki daje metoda polegająca na znalezieniu charakterystycznej prostej pomiędzy dwoma punktami i wyznaczeniu wartości współczynnika. Należy przy tym zaznaczyć, iż sposób przyjęcia początku i końca przedziału czasowego dla jakiego wyznaczana jest λ jest sprawą umowną. W praktyce urządzenie pomiarowe rejestruje w ciągu 1 sekundy 5 wartości temperatury. Oznacza to, że dla przedziału od 0 do 10 sekund istnieje ponad 1000 możliwych kombinacji. Ostateczny wynik jest efektem przyjęcia jednej z nich jako właściwej. Dodatkowo należy podkreślić, iż istnieje zależność pomiędzy charakterystycznym przedziałem czasu a parametrami fizycznymi materiału, w tym jego współczynnikiem przewodzenia ciepła. Wobec tego niezbędnym staje się zastosowanie w przyszłości narzędzia obliczeniowego pozwalającego metodą iteracyjną uzyskać najbardziej zbieżny wynik. Opracowanie właściwego algorytmu wymaga jednak dokonania wielu prób i analiz.

Dodatkowo dla wszystkich wyników uzyskanych przy mocy 0,4W obliczono odchylenie standardowe (tabela 7). W przeciwieństwie do wniosków sformułowanych na podstawie wyników z tabel 2, 5 i 6 zauważyć należy inną prawidłowość. Odchylenia standardowe wyliczone dla wartości aproksymowanych są znacznie, wielokrotnie mniejsze od tych, uzyskanych dla wartości obliczonych w sposób bezpośredni.

Tabela 7. Odchylenie standardowe dla poszczególnych pomiarów przy mocy 0,4W

Table 7. The standard deviation of measurements at 0.4 W of heating power

Materiał	Odchylenie standardowe dla wartości	
	obliczonej	aproksymowanej
Anilina	0,075	0,012
Gliceryna	0,045	0,005
Metanol	0,073	0,020

Świadczy to o mniejszych rozbieżnościach w ramach danego zbioru co jednak nie oznacza, że tak określone wartości są bliższe rzeczywistości.

5. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania i analiza ich wyników potwierdza dużą wrażliwość metody zarówno na sposób przeprowadzenia doświadczenia (przyjętą moc grzejną) oraz analizę wyników (określanie zakresu temperatur).

Ostateczne wyniki współczynników przewodzenia ciepła otrzymano dwiema metodami: tradycyjną poprzez znalezienie charakterystycznego przedziału temperatur oraz poprzez aproksymację liniową funkcji w danym przedziale ΔT . Jak należało przypuszczać mniejsze wartości odchylenia standardowego uzyskano dla metody aproksymacyjnej. Natomiast dobrą zgodność z wartościami literaturowymi przy użyciu metody aproksymacyjnej otrzymano jedynie dla gliceryny. W przypadku aniliny i metanolu bardziej zbliżone wartości otrzymano metodą obliczeń bezpośrednich dla danego przedziału czasowego.

Na podstawie aktualnych oraz wcześniejszych doświadczeń autorów z wykorzystaniem metody „gorącej nici” należy zauważyć mniejszy rozrzut wyników poszczególnych pomiarów w danej serii. Dokładność otrzymanych rezultatów jest zadawalająca w porównaniu z danymi literaturowymi, aczkolwiek jest ona silnie zależna od sposobu przyjęcia zakresu temperatur do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła.

Kolejnym etapem pozwalającym na udoskonalenie metody jest zautomatyzowanie sposobu wyboru zakresu temperatur poprzez wprowadzenie iteracyjnego algorytmu obliczeniowego.

REFINE HEAT CONDUCTIVITY MEASUREMENT METHOD OF LIQUIDS – LOW POWER SET-UP

Summary: The paper presented and discuss the results of conductivity measurements of three different liquids: aniline, glycerin and methanol. On the beginning the short description of new developed measurement set-up is described. The new futures are characterized by thin constantan wire and low heating power supplied. The results were analyzed using two methods. The first, most common used, when the conductivity is calculated from the temperature range. The second, when the function $T=a \cdot \ln t + b$ is approximated for the whole temperature range. For glycerin results more similar to literature were obtained by approximated methods. However for aniline and methanol more accurate conductivity was obtained using calculation technique.

Literatura

- [1] Klemm P. (red.): *Budownictwo Ogólne, tom 2, Fizyka Budowli*, Arkady 2005.
- [2] Heim D., Mrowiec A., Prałat K.: Badania przewodności cieplnej organicznych MFZ przy zastosowaniu metody „gorącej nici”. *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, tom V, zeszyt 2, 2010, s. 15-20.
- [3] Davis W R, Hot-Wire Method for the Measurement of the Thermal Conductivity of Refractory Materials, in Maglič K D, Cezairliyan A, Peletsky V E, (Eds.) *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, Vol. 1 *Survey of Measurement Techniques*, 1984, New York, London, Plenum Press, p. 161.
- [4] Krishnaiah M.V., Thermal Conductivity measurement Techniques, *Proceedings of the 16th National Symposium and Workshop on Thermal Analysis* 2008, pp. 85-95.
- [5] Franco A., An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007), pp. 2495–2504.
- [6] Heim D., Mrowiec A., Prałat K.: Zastosowanie metody „gorącej nici” do wyznaczania przewodności cieplnej płynnych kwasów organicznych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 1, 2010, s. 51-52.
- [7] L. Broniarz-Press, J. Różański, S. Woźniwodzki, *Inżynieria Chemiczna i Procesowa, Materiały Pomocnicze Cz. II, Procesy wymiany ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2001.

