

Jerzy A. Pogorzelski*

OSTROŻNIE Z NIESTACJONARNYMI BADANIAMII PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ!

Istnieje wiele metod badania przewodności cieplnej tworzyw, w tym materiałów budowlanych. Można je najogólniej podzielić na metody stacjonarne i niestacjonarne. W metodach stacjonarnych współczynnik przewodzenia ciepła wyznacza się bezpośrednio z prawa Fouriera, ze wzorów o prostej budowie, natomiast konstrukcja przyrządu ma zapewnić dotrzymanie założonych warunków brzegowych. Wyłącznie metody stacjonarne są przedmiotem normalizacji międzynarodowej i istnieją procedury weryfikacji poprawności wyników badań. W metodach niestacjonarnych, opartych na szczególnych rozwiązaniach równania Fouriera, przeważnie wyznacza się tzw. współczynnik wyrównywania temperatury a , a współczynnik przewodzenia ciepła wyznacza się w sposób pośredni z określonej wartości a oraz dodatkowych oznaczeń ciepła właściwego i gęstości. Metody te są oparte na wzorach o mniej oczywistej budowie i trudniejszych do kontroli, stawiają więc wyższe wymagania kwalifikacjom osób prowadzących badania, czego nie wszyscy są świadomi. Między innymi z tej przyczyny dokładność oznaczenia przewodności cieplnej metodą bezpośrednią i pośrednią mogą różnić się znacznie. W artykule porównano wyniki badań właściwości cieplnych kilku materiałów różnymi metodami, ze zwróceniem uwagi na potrzebę zachowania ostrożności przy korzystaniu z metod mniej sprawdzonych.

1. Wstęp

W literaturze technicznej opisano dziesiątki pomysłów i kilkanaście dopracowanych metod badania przewodności cieplnej λ ciał stałych, w tym materiałów budowlanych.

Do badań λ tych ostatnich do celów aprobacyjnych i certyfikacyjnych stosuje się wyłącznie przyrządy wykorzystujące stacjonarne przewodzenie ciepła opisane prawem Fouriera:

$$q = - \lambda \nabla t \quad (1)$$

gdzie: q – gęstość strumienia cieplnego,
 t – temperatura,

i w których znany strumień ciepła przechodzi przez próbkę.

Wśród wyżej wspomnianych przyrządów rozróżnia się:

- przyrządy z kompensacją strumienia cieplnego (metoda pierwotna),
- przyrządy z pomiarem strumienia ciepła za pomocą przetwornika strumienia cieplnego na sygnał napięciowy (metoda wtórna).

* prof. dr hab. inż.

W ISO 8301 i ISO 8302 sformułowane są zasady konstruowania przyrządów i prowadzenia badań, zapewniające błąd pomiaru poniżej 2% w metodzie pierwotnej i poniżej 3% w metodzie wtórnej; w celu kontroli spełniania tych wymagań laboratoria akredytowane prowadzą między innymi kalibrację aparatury, sprawdzanie powtarzalności wyników badań i międzylaboratoryjne badania porównawcze.

Niestacjonarne metody badań są oparte na szczególnych rozwiązaniach równania Fouriera:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (2)$$

w którym:

t – temperatura,

τ – czas,

$a = \frac{\lambda}{c \rho}$ – współczynnik wyrównywania temperatury,

c – ciepło właściwe materiału,

ρ – gęstość materiału.

W większości metod niestacjonarnych ze szczególnego rozwiązania równania Fouriera (np. w postaci tzw. zdegenerowanej, w której rozwiązanie uzyskuje się w postaci jednomianu) wyznacza się współczynnik wyrównywania temperatury, następnie w innym oznaczeniu ciepło właściwe i dopiero pośrednio oblicza się współczynnik przewodzenia ciepła, co zmniejsza dokładność badań.

Koncepcje metod niestacjonarnych były często wysuwane przez ludzi zajmujących się matematyczną teorią przewodnictwa cieplnego i nie były doprowadzane do poziomu konstrukcji urządzeń, lub powstawały urządzenia jednostkowe, bez szans na badania porównawcze. Stąd korzystanie z tych metod wymaga szczególnej ostrożności i np. porównywania wyników z wartościami uzyskanymi za pomocą innych metod.

2. Badania właściwości cieplnych materiałów budowlanych w Zakładzie Fizyki Ciepłej ITB

Zakład Fizyki Ciepłej ITB prowadzi badania przewodności cieplnej materiałów budowlanych od 1956 r., początkowo na tzw. aparacie Bocka (przyrządzie produkcji byłej NRD), od 1993 r. na przyrządzie własnej konstrukcji; oba przyrządy według metody pierwotnej. Od początku 2000 r. Zakład Fizyki Ciepłej dysponuje również amerykańskim przyrządem metody wtórnej FOX 314 firmy LASER Comp.

Koncepcja przyrządów według metody pierwotnej, to jest aparatów płytowych z tzw. ostnioną płytą grzejną (Guarded Hot Plate Apparatus), wiąże się z Poensgenem (1912) i Jacobem (1926). Zgodnie z tą metodą (rys. 1) próbka znajduje się między chłodnicą i grzejnikiem o złożonej budowie, zawierającym grzejnik pomiarowy, grzejnik ochronny i grzejnik kompensacyjny.

Współczynnik przewodzenia ciepła próbki materiału wyznacza się ze wzoru:

$$\lambda = \frac{Q d}{A (t_1 - t_2) \tau} \quad (3)$$

w którym:

Q – ilość ciepła przepływająca w warunkach ustalonych przez próbkę w czasie τ ,

A – pole pomiarowe aparatu,

t_1 – temperatura płyty ciepłej,

t_2 – temperatura płyty zimnej,

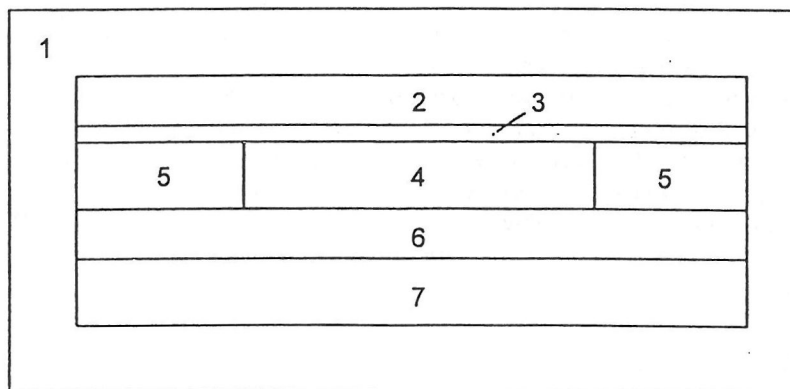
d – grubość próbki.

Podczas pomiaru grzejnik i chłodnica powinny znajdować się w stałych temperaturach, przy czym poszczególne części składowe grzejnika powinny być w jednakowej temperaturze. Strumień ciepła Joule'a–Lenza generowany w grzejniku pomiarowym kierowany jest w ten sposób wyłącznie przez badaną próbkę do chłodnicy. Możliwe są różne rozwiązania układów sterowania, pomiaru i zasilania grzejników.

Aparat systemu Bocka skonstruowany przez Weissa pod koniec lat pięćdziesiątych był produkowany w NRD na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych i eksportowany głównie do krajów Europy Środkowo-Wschodniej, choć pod koniec lat osiemdziesiątych był też używany w EMPA w Szwajcarii. Zastosowano w nim proste rozwiązania elektrotechniczne i pomiarowe: wodny system zasilania chłodnicy i grzejnika kompensacyjnego, umożliwiający pomiary tylko przy średniej temperaturze próbki 23–25°C, nagrzewanie grzejnika pomiarowego i ochronnego ze stałą mocą, co powodowało długi okres stabilizacji, pomiar poboru energii elektrycznej w grzejniku pomiarowym zwykłym watomierzem, regulację temperatury grzejnika pomiarowego i ochronnego za pomocą stosu termopar z małą czułością, pomiar temperatury grzejnika i chłodnicy termometrami rtęciowymi. Aparat Bocka ma zbyt wąski grzejnik ochronny, co powoduje boczne straty ciepła, mogące zawyżać wyniki badań do 6% już przy próbkach z betonu komórkowego o grubości 6 cm. Generalnie aparat ten nie spełnia współczesnych wymagań dokładności (błąd pojedynczego pomiaru około 6%) i czasu do stabilizacji strumienia cieplnego; jest dziś wśród przyrządów pomiarowych odpowiednikiem trabanta z tamtych czasów na współczesnej autostradzie.

W latach 1989–1993 w Instytucie Techniki Budowlanej skonstruowano aparat płytowy [1] metody pierwotnej, według założeń Zakładu Fizyki Ciepłej opartych na znanych konstrukcjach Bankvalla (Szwecja) i Igushi (Japonia). W stosunku do aparatu Bocka powiększono wymiary płyt i poszerzono grzejnik ochronny, zmniejszając boczne straty ciepła. Zmieniono sposób nagrzewania próbki, zaczynając nagrzewanie stosunkowo dużą mocą w celu skrócenia czasu badania, ze stopniowym spadkiem mocy regulowanym przez układ procesorowy.

W wyniku zastosowania kriostatu do zasilania chłodnicy przyrząd może pracować w dość szerokim zakresie temperatury; średnia temperatura próbki może być zadawana w granicach od 0 do 50°C. Przyrząd może być obracany na poziomej osi, w związku z czym można prowadzić pomiary przy przepływie ciepła pionowo (w dół i w górę) oraz poziomo; w ten sposób daje się uchwycić wpływ konwekcji w materiałach o luźnej strukturze.



Rys. 1. Schemat aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejną (wersja z jedną próbką)
 1 – osłona, 2 – grzejnik kompensacyjny, 3 – izolacja cieplna, 4 – grzejnik pomiarowy, 5 – grzejnik ochronny, 6 – próbka, 7 – chłodnica

Dokładność pojedynczego wyniku przy badaniach na aparacie Bocka wynosiła około 6%, czas jednego badania około 6 godzin; dokładność pojedynczego wyniku przy badaniach na przyrządzie konstrukcji ITB wynosi około 1%, czas jednego badania około 3 godzin.

Wszystkie wielkości, włącznie z grubością próbki, są mierzone bezpośrednio i procesor oblicza przewodność cieplną, podając ją na wyświetlaczu.

Badania ITB mają najczęściej charakter badań rutynowych, stąd są prowadzone w kolejności wynikającej z napływu zleceń i próbek do badań. W miarę rozrastania się zbioru wyników zaczęły powstawać trudności w dotarciu do poszczególnych wyników i prowadzenia ich analizy. Z tego względu w drugiej połowie lat osiemdziesiątych w ramach pracy [2] opracowano w Zakładzie Fizyki Ciepłej ITB komputerową bazę danych LAMBDA gromadzącą wyniki badań aparatem Bocka; w bazie tej wyróżniono podzbiory z danymi o materiałach jednorodnych z uwagi na skład chemiczny i budowę morfologiczną, a także z uwagi na wilgotność badanych próbek (próbki suche, powietrzno-suche lub o znanej wilgotności, w granicach wilgotności sorpcyjnej).

Dla tych podzbiorów za pomocą programu STATGRAPHICS ustalono zależności współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości materiału; przy okazji wychwycono w bazie pewną liczbę wyników błędnych (np. z pozorną przewodnością cieplną lub ze złą identyfikacją materiału).

Od kilku lat prowadzimy też drugą komputerową bazę danych, zawierającą wyniki badań przyrządu konstrukcji ITB; w obu bazach mamy łącznie około 5000 danych.

Komputerowe bazy danych pełnią bardzo ważną rolę w systemie jakości akredytowanego laboratorium, ułatwiając kontrolę wyników i eliminując możliwość popełnienia błędów grubych. Nie jest możliwe podanie przez laboratorium wyniku badań z błędem przekraczającym granice podane w wymienionych wyżej normach.

Zakład Fizyki Ciepłej ITB nie prowadzi obecnie badań współczynnika przewodzenia ciepła metodami niestacjonarnymi ani badań ciepła właściwego materiałów. Nie stwarza to jednak problemów, nawet przy modelowaniu niestacjonarnych procesów cieplnych

i sprzężonych, ponieważ wartości ciepła właściwego materiałów budowlanych – podawane w normach – są wystarczająco dokładne.

Ciepło właściwe materiałów suchych można obliczać na podstawie składu chemicznego i ciepła właściwego poszczególnych składników; dane te są podawane w odpowiednich International Critical Tables. W przypadku suchych materiałów pochodzenia mineralnego ich ciepło właściwe wynosi zwykle 0,84–0,88 kJ/(kg·K).

Ciepło właściwe materiałów wilgotnych w temperaturze wyższej niż 0°C (patrz PN-EN ISO 6946:1999) oblicza się jako sumę ciepła właściwego materiału suchego i wody z zależności:

$$c_w = c + 0,0419 w_M \quad (4)$$

w której:

- c – ciepło właściwe materiału w stanie suchym,
- w_M – wilgotność materiału w stosunku do masy, %.

W zależności od rodzaju materiału i wilgotności ustabilizowanej, ze wzoru (4) uzyskuje się ciepło właściwe materiałów nieorganicznych w granicach od 0,9 do 1,1 kJ/(kg·K).

Jeszcze prościej ujęto tę sprawę w DIN 4108 *Wärmeschutz im Hochbau*, cz. 4, oraz w projekcie EN *Tabulated design values*, ponieważ podano ciepło właściwe większości materiałów nieorganicznych równe 1,00 kJ/(kg·K).

3. Badania przewodności cieplnej „aparatem termistorowym” według PN-B-06258

PN-B-06258 dopuszcza badania przewodności cieplnej betonu komórkowego dwiema metodami:

- aparatem Bocka,
- tzw. aparatem termistorowym (właściwiej α -kalorymetrem Kondratiewa).

Wzór obliczeniowy α -kalorymetru Kondratiewa wynika z teorii tzw. stanu uporządkowanego. Teoria ta wynika z faktu, że temperaturę wewnątrz ostygających (lub nagrzewanych) ciał można wyrazić w postaci nieskończonego szeregu, którego wyrazy dążą do zera tym szybciej, im wyższy jest ich numer. Powyżej określonej wartości liczby Fouriera (to jest po odpowiednio długim czasie) można pominąć wyrazy z indeksem $n > 1$ jako małe w porównaniu z wyrazem o $n = 1$.

W efekcie, w stanie uporządkowanym prędkość zmian temperatury w czasie we wszystkich punktach ciała jest jednakowa, co wyraża wzór:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \ln(t - t_c) = m \quad (5)$$

w którym:

- m – wielkość stała, nazywana „tempem ostygania”,
- t – temperatura ciała,
- t_c – temperatura otoczenia,
- τ – czas.

Przy intensywnym przejmowaniu ciepła z powierzchni ostygającego ciała (przyjmuje się zwykle wartość liczby podobieństwa Biota $Bi > 100$) w przypadku ostygającego prostopadłościanu tempo ostygania m można wyrazić wzorem:

$$m = \frac{a}{B} \quad (6)$$

w którym:

$$B = \frac{1}{\pi^2 \left(\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} \right)} \quad \text{– tzw. współczynnik kształtu prostopadłościanu,}$$

$d_{1,2,3}$ – długości boków prostopadłościanu.

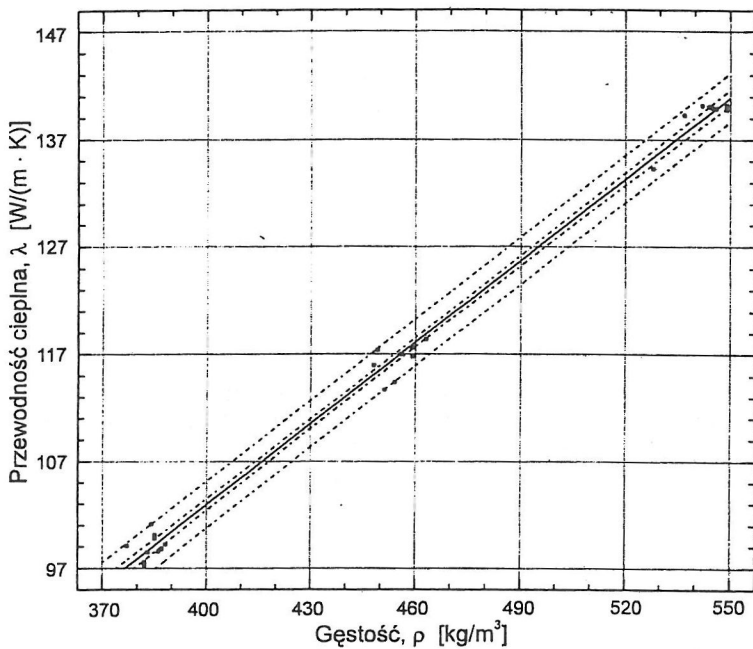
Określając z pomiarów temperatury wartość „tempa ostygania” m próbki o znanym współczynniku kształtu B możemy na tej podstawie obliczyć współczynnik wyrównywania temperatury, a znając ciepło właściwe i gęstość materiału – współczynnik przewodzenia λ . Z wyrażenia na a i wzoru (6) otrzymujemy:

$$\lambda = B m c \rho \quad (7)$$

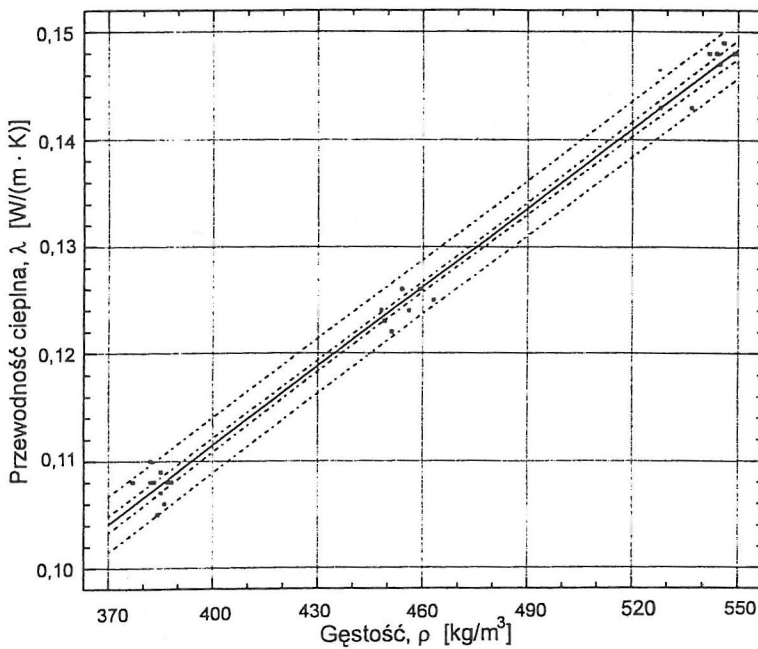
Wzór (7) podany jest jako wzór obliczeniowy metody w PN-B-06258. Zgodnie z tą normą badania prowadzi się na próbkach o wymiarach $4 \times 4 \times 8$ cm, nagrzewanych do temperatury $40\text{--}50^\circ\text{C}$ i ostygających w kąpeli wodnej w temperaturze około 20°C . Wartość ciepła właściwego betonu komórkowego przyjmuje się stałą i równą $960 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, nie wiadomo na jakiej podstawie. W celu uniknięcia zawilgocenia próbki zabezpiecza się osłonkami gumowymi. Pomiar temperatury odbywa się za pomocą termistora o wymiarach do 440 mm, umieszczonego w próbce w wywierconym otworze, oraz mostka oporowego. Woda w termostacie jest mieszana mieszadłem elektrycznym. W PN-B-06258 nie podano wymagań w zakresie warunków opływu próbki wodą, odwołując się w opisie urządzenia do instrukcji „aparatu termistorowego” wykonanego na początku lat sześćdziesiątych.

3. Porównanie wyników pomiarów ITB i CEBET

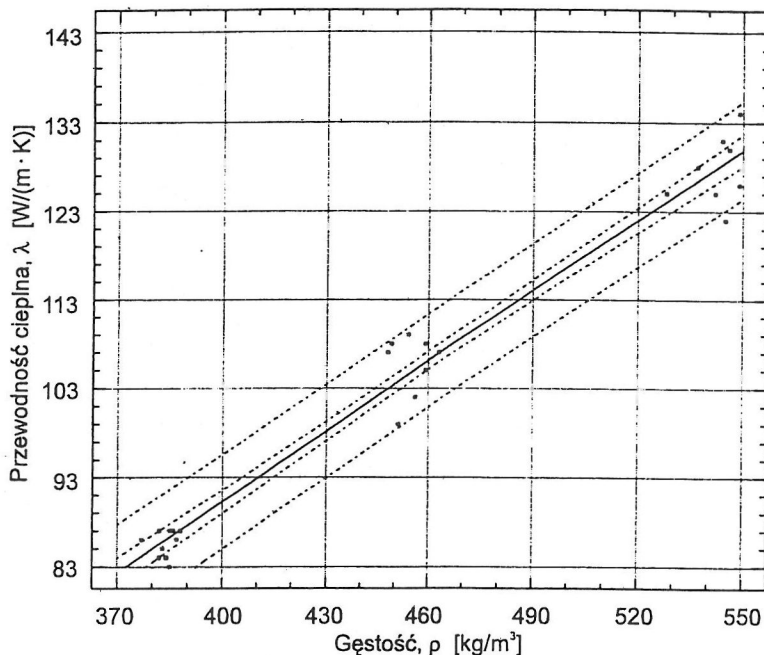
W drugim kwartale 1997 r. przeprowadzono porównawcze badania międzylaboratoryjne w CEBET i Zakładzie Fizyki Ciepłej ITB. Do badań przygotowano 36 próbek tego samego betonu komórkowego (po 12 próbek z odmian 04, 05 i 06) o wymiarach $25 \times 25 \times 5$ cm, wyciętych z bloków betonu komórkowego. Próbki badane były najpierw w aparacie płytowym ITB (zgodnym z ISO 8302), następnie przesyłano je do CEBET, gdzie badano je na aparacie Bocka, a na koniec wycinano z nich po trzy próbki o wymiarach $4 \times 4 \times 8$ cm i badano w „aparacie termistorowym”. Kilka próbek uległo uszkodzeniu w transporcie lub podczas badań w aparacie Bocka w CEBET; należy przy tym stwierdzić, że pęknięcia te – równoległe do linii gęstości strumienia ciepłego – nie mają wpływu na wynik badania. Do porównania rozpatrzono tylko 26 próbek (10 z odmiany 04 i po 8 z odmian 05 i 06), w odniesieniu do których był komplet oznaczeń. Wartości z badań „aparatem termistorowym” przyjmowano jako średnie z trzech (sporadycznie z mniejszej liczby) oznaczeń.



Rys. 2. Zależność λ (ρ) według badań za pomocą aparatu płytowego ITB



Rys. 3. Zależność λ (ρ) według badań za pomocą aparatu Bocka



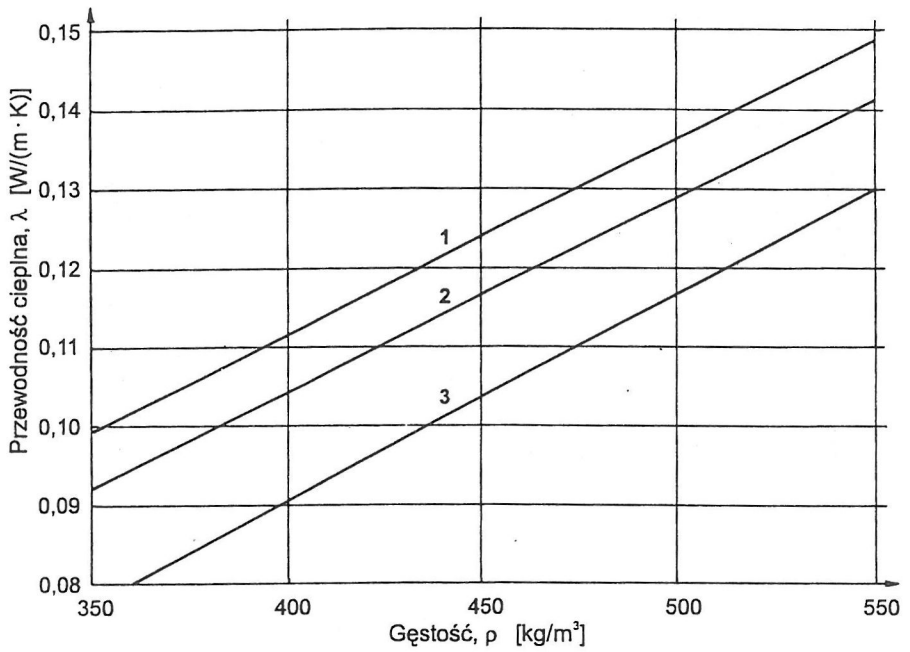
Rys. 4. Zależność λ (ρ) według badań za pomocą „aparatu termistorowego”

Przy obróbce statystycznej wyników należy mieć na uwadze, że wyniki są zależne od gęstości ρ betonu komórkowego. Generalnie zależność λ (ρ) ma charakter wykładniczy; przy niewielkim przedziale gęstości można przyjmować zależność liniową przewodności cieplnej od gęstości.

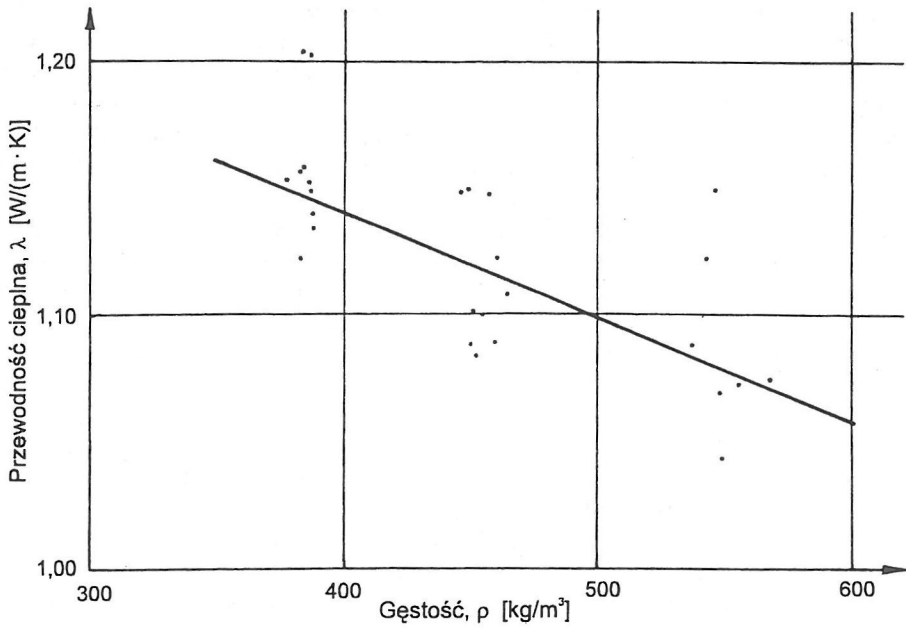
Na rysunku 2 przedstawiono zależność regresyjną λ (ρ) według aparatu płytowego ITB, na rysunku 3 według aparatu Bocka i na rysunku 4 według „aparatu termistorowego” w postaci wydruków z pakietu STATGRAPHICS.

We wszystkich trzech przypadkach była bardzo dobra zgodność wyników badań z modelem; współczynnik korelacji wynosił odpowiednio: 0,997, 0,996 i 0,987. Nie widać odchyżeń od modelu spowodowanych błędami losowymi, w tym np. pęknięciem próbek. Widoczne jest natomiast wyraźne przesunięcie linii regresyjnych; unaocznia to rysunek 5, na którym zestawiono trzy linie regresji z rysunków 2, 3 i 4.

Różnica wyników między aparatem Bocka (linia 1) i „aparatem termistorowym” (linia 3) wynosi od 0,022 W/(m·K) przy gęstości 400 kg/m³ do 0,018 W/(m·K) przy gęstości 600 kg/m³; w procentach w stosunku do wyniku według „aparatu termistorowego” wynosi to odpowiednio od 24 do 14. Porównanie wyników z aparatu Bocka z wynikami z aparatu ITB daje stałe przesunięcie o wartości 0,007 W/(m·K); w procentach w stosunku do wyniku według aparatu ITB wynosi to od 6,5 przy gęstości 400 kg/m³ do 5 przy gęstości 600 kg/m³. Porównanie wyników z „aparatu termistorowego” z wynikami z aparatu ITB daje zniżenie w stosunku do wyniku według aparatu ITB od 13% przy gęstości 400 kg/m³ do 8% przy gęstości 600 kg/m³.



Rys. 5. Zależność λ (ρ) według badań za pomocą aparatu Bocka (linia 1), aparatu płytowego ITB (linia 2) i „aparatu termistorowego” (linia 3)



Rys. 6. Zależność regresyjna współczynnika korekcyjnego KOR (ρ)

Wyniki badań porównawczych jednoznacznie wykazują systematyczny charakter błędów w dwu metodach badań „legalnych” według PN-B-06258; zgodnie z przewidywaniami aparat Bocka zawyża przewodność cieplną próbek z betonu komórkowego, a „aparat termistorowy” zaniża. W pracy [3] wysunięto hipotezę, że źródłami błędów systematycznych w „aparacie termistorowym” są:

- zbyt mała prędkość wody w otoczeniu próbki,
- zaniedbanie pojemności cieplnej osłonki gumowej i termistora.

Na podstawie powyższych badań można wprowadzić współczynnik korekcyjny do wyników badań λ według „aparatu termistorowego”; zależy on od gęstości, jak na rysunku 6. Współczynnik korekcyjny będzie niedługo wprowadzony do PN-B-06258.

4. Badania właściwości cieplnych materiałów budowlanych według pracy [4]

W pracy [4] podano wyniki badań właściwości cieplnych kilku wybranych materiałów, scharakteryzowanych jako ogólnie dostępne na polskim rynku: cegły pełnej ceramicznej o gęstości 1780 kg/m^3 , gipsu o gęstości 935 kg/m^3 , betonu komórkowego o gęstości 1002 kg/m^3 (obecnie raczej rzadko spotykanej) oraz zaprawy cementowej o gęstości 2020 kg/m^3 .

Badania prowadzono w ramach grantu Komitetu Badań Naukowych nr 7 T07E 00313 „Modelowanie sprzężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych”, w celu wykorzystania ich przy późniejszych symulacjach komputerowych.

Oznaczono gęstość, porowatość oraz krzywe sorpcji pary wodnej wybranych materiałów.

Przyjęto trzy wyróżnione stany zawilgocenia materiałów: powietrzno-suchy (przy wilgotności względnej powietrza około 40% i temperaturze około 22°C), wilgotny (przy wilgotności względnej powietrza około 75%) oraz stan pełnego nasycenia wodą.

Właściwości cieplne materiałów wyznaczano w zasadzie przy trzech wartościach temperatury: 5°C , 22°C i 50°C .

Współczynnik wyrównywania temperatury określano „laserową metodą impulsową” (Laser Flash Method). W metodzie tej współczynnik wyrównywania temperatury materiału próbki określa się ze wzrostu temperatury małej próbki materiału (cienkiej płytki o boku kilku mm) poddanej nagraniu impulsem laserowym o znanej energii.

Laserowa metoda impulsowa (LFM) jest znana i na przykład amerykańska firma HOLOMETRIX produkuje seryjnie przyrządy według tej metody; jest to metoda dobra, jeżeli dysponujemy małymi ilościami badanej substancji (synteza nowych polimerów, badania identyfikacyjne diamentów), ale nie jest stosowana w przypadku porowatych i niejednorodnych materiałów budowlanych.

Ciepło właściwe wraz z efektami cieplnymi przemian fazowych określano za pomocą różnicowego mikrokalorymetru skaningowego, też na małych próbkach; te badania prowadzono w przedziale temperatury od około -10°C do około 200°C .

Na podstawie badań zestawiono:

- wartości współczynnika wyrównywania temperatury przy trzech wartościach temperatury i w trzech stanach wilgotności,

- zależności ciepła właściwego w trzech stanach wilgotności od temperatury,
- zależności przewodności cieplnej w trzech stanach wilgotności od temperatury.

5. Porównanie wyników badań właściwości termicznych według pracy [4] i ITB oraz PN-EN ISO 6946:1999

Wyniki badań podane w pracy [4] charakteryzowały się dużym rozrzutem (do kilkunastu procent w stosunku do wartości średniej dla czterech próbek). W tabelicy 1 zestawiono wartości średnie współczynnika wyrównywania temperatury dla próbek w stanie powietrzno-suchym, przy początkowej temperaturze próbki równej 22°C. Dla porównania podano wartości obliczone na podstawie danych PN-EN ISO 6946 (jeśli chodzi o ciepło właściwe) i badań ITB [3] (jeśli chodzi o współczynnik przewodzenia ciepła).

Tabela 1. Porównanie współczynnika wyrównywania temperatury według [1] i PN-EN ISO 6946 oraz badań ITB [3]

Materiał	Współczynnik wyrównywania temperatury, 10^{-7} , m ² /s	
	wg [1]	wg PN-EN ISO 6946 i [3]
Cegła pełna ceramiczna	5,53	4,81
Gips	4,80	3,86
Beton komórkowy	4,25	3,85
Zaprawa cementowa	9,67	4,69

Tabela 2. Porównanie ciepła właściwego według [1] i PN-EN ISO 6946

Materiał	Ciepło właściwe, kJ/(kg · K)	
	wg [1]	wg danych PN-EN ISO 6946
Cegła pełna ceramiczna	0,28	0,90
Gips	0,52	0,86
Beton komórkowy	0,58	1,09
Zaprawa cementowa	0,31	0,97

Jak widać, wartości współczynnika wyrównywania temperatury w odniesieniu do cegły ceramicznej, gipsu i betonu komórkowego według [1] są wyższe o 10–20% w stosunku do wartości obliczonych według PN-EN ISO 6946 oraz badań ITB [3], natomiast wartości w odniesieniu do zaprawy cementowej są wyższe dwukrotnie.

W tabelicy 2 zestawiono wartości średnie ciepła właściwego próbek w stanie powietrzno-suchym, przy początkowej temperaturze próbki równej 22°C. W celu porównania podano wartości obliczone na podstawie danych PN-EN ISO 6946. Wilgotność sorpcyjną

materiałów przyjęto na podstawie posiadanego doświadczenia: cegły i gipsu 0,5%, betonu komórkowego 6%, zaprawy cementowej 3%.

Jak widać, wartości ciepła właściwego w odniesieniu do cegły ceramicznej i zaprawy cementowej podane w pracy [1] są niższe w stosunku do danych normowych trzykrotnie, natomiast w odniesieniu do gipsu i betonu komórkowego są niższe w stosunku do danych normowych prawie dwukrotnie.

W tabelicy 3 zestawiono wartości średnie współczynnika przewodzenia ciepła próbek w stanie powietrzno-suchym, przy początkowej temperaturze próbki równej 22°C. W celu porównania podano wartości z badań ITB [3], odpowiadające założonej gęstości materiału. Zależności współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości materiałów podano na rysunkach 7, 8 i 9.

Z zależności współczynnika przewodzenia ciepła gipsu w stanie powietrzno-suchym od gęstości podanej na rysunku 7 przy gęstości 935 kg/m³ odczytuje się wartość 0,31 W/(m·K).

Z zależności współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego w stanie powietrzno-suchym od gęstości podanej na rysunku 8, przy gęstości 1000 kg/m³, odczytuje się wartość 0,42 W/(m · K).

Z zależności współczynnika przewodzenia ciepła zaprawy cementowej w stanie powietrzno-suchym od gęstości podanej na rysunku 9, przy gęstości 2020 kg/m³, odczytuje się wartość 0,92 W/(m·K).

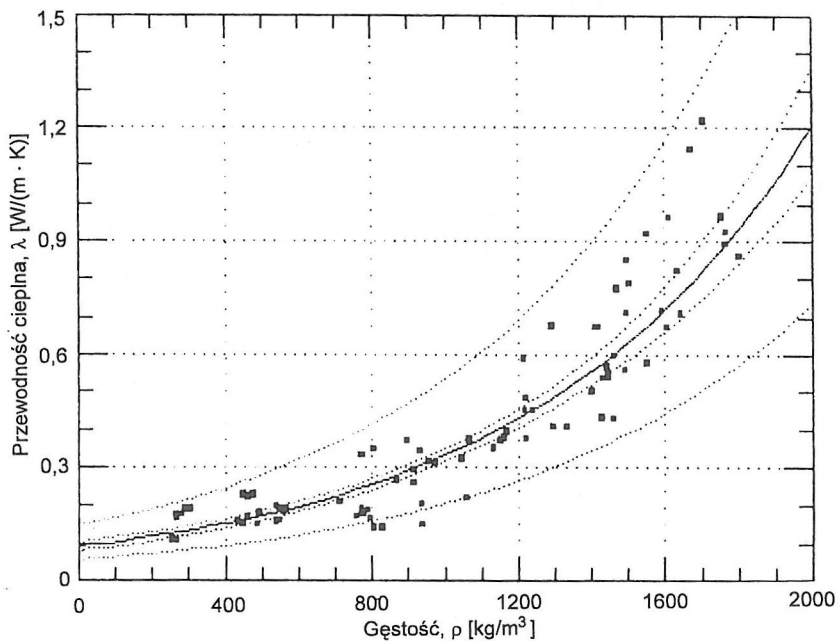
Tabela 3. Porównanie współczynnika przewodzenia ciepła według prac [3] i [4]

Materiał	Współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K)	
	wg [4]	wg [3]
Cegła pełna ceramiczna	0,23	0,77*
Gips	0,26	0,31
Beton komórkowy	0,29	0,42
Zaprawa cementowa	0,70	0,92
* Z braku danych dotyczących cegły przyjęto wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiału obliczonego dla muru z cegły		

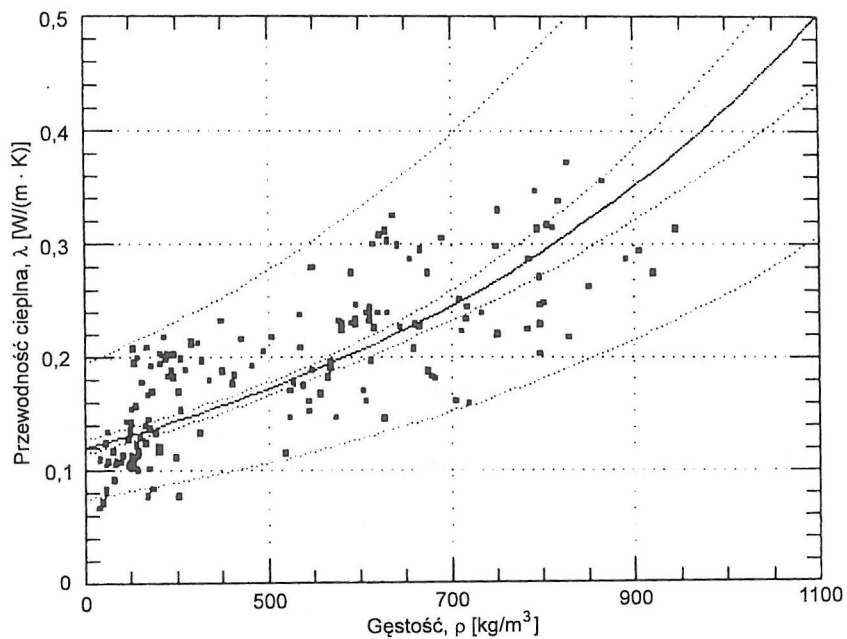
Jak widać z tabelicy 3, występują bardzo duże różnice współczynnika przewodzenia ciepła według [4] i według wieloletnich systematycznych badań ITB [3] materiałów w stanie powietrzno-suchym. Nie ma przy tym jakiegóż prawidłowości mogącej świadczyć o błędzie systematycznym.

Podany w pracy [4] współczynnik przewodzenia ciepła 0,23 W/(m·K) może wystąpić w przypadku poryzowanej ceramiki drażonej o gęstości około 750 kg/m³, a w odniesieniu do cegły pełnej jest zaniżony w przybliżeniu trzykrotnie.

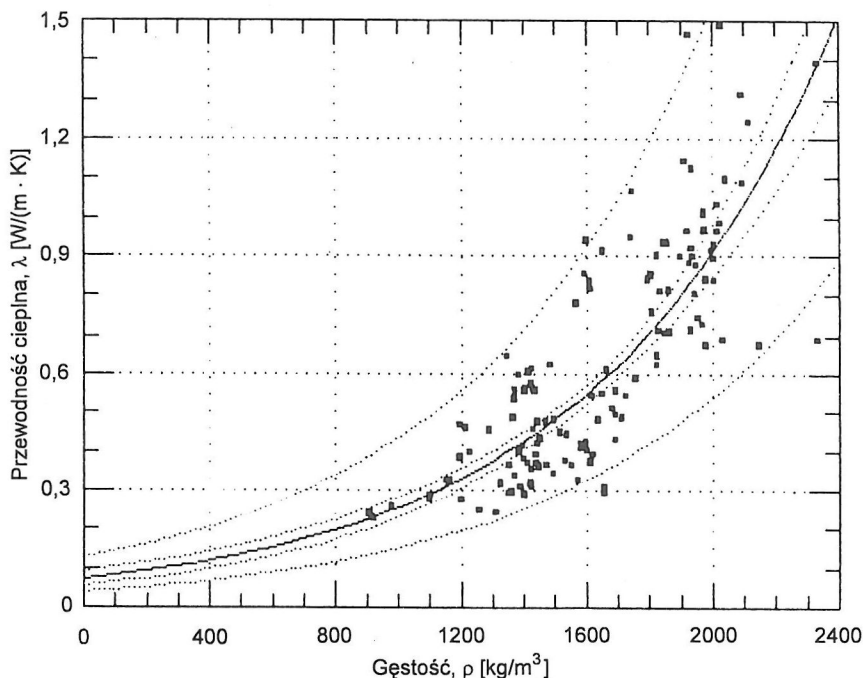
Wartości współczynnika przewodzenia ciepła gipsu, betonu komórkowego i zaprawy cementowej podane w pracy [4] są również zaniżone, ale „tylko” o 20–30%.



Rys. 7. Przewodność cieplna gipsu w funkcji gęstości według [3]



Rys. 8. Przewodność cieplna betonu komórkowego w funkcji gęstości według [3]



Rys. 9. Przewodność cieplna zaprawy w funkcji gęstości według [3]

6. Podsumowanie

Należy stwierdzić, że przytoczone wyżej próby opracowania niestacjonarnych metod pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła nie powiodły się.

Przypomnijmy, że w rutynowych badaniach przewodności cieplnej – wykonywanych za pieniądze klienta – należy zapewnić błąd pomiaru poniżej 2% w metodzie pierwotnej i poniżej 3% w metodzie wtórnej; w przypadku obu omawianych metod niestacjonarnych uzyskiwano błędy większe o jeden lub dwa rzędy wielkości.

Badania przewodności cieplnej betonu komórkowego przez CEBET tzw. aparatem termistorowym dają przynajmniej błąd systematyczny w stosunku do wyników badań aparatem płytowym; można wprowadzić mnożniki korekcyjne.

W przypadku badań przeprowadzonych w ramach pracy [4] brak jakiegokolwiek prawidłowości mogącej świadczyć o błędzie systematycznym. W przypadku każdej wielkości fizycznej (współczynnika wyrównywania temperatury, ciepła właściwego, przewodności cieplnej) i każdej serii badań uzyskiwano rozbieżności wyników – w porównaniu z badaniem innymi metodami o różnej wartości – od około 20 do około 100%.

Uzyskane wyniki z całą pewnością nie upoważniają Autorów do prowadzenia na ich podstawie symulacji komputerowych sprzężonych zjawisk ciepłno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych. Co więcej – w zwykłym laboratorium akredytowanym wyniki takie nie miałyby również wartości handlowej; żaden producent mate-

riałów nie zapłaciłby za wyniki tak sprzeczne z innymi metodami, ponieważ dokonałby natychmiast porównania z danymi tablicowymi i uznałby te wyniki za nieprawdopodobne i nieusprawiedliwione naturalną zmiennością cech wyrobu. Skądinąd system jakości laboratorium akredytowanego zawiera procedurę postępowania reklamacyjnego w przypadku, gdy klient złoży zastrzeżenia do raportu z badań.

Rozumiem, że badania opisane w pracy [4] nie są badaniami rutynowymi wykonywanymi na zlecenie klienta; jest to eksperyment naukowy finansowany przez KBN. Wprawdzie wyniki pracy naukowej powinny być lepsze niż badań rutynowych, ale przy badaniach naukowych przyjmuje się zwykle zasadę o prawie do błędu w imię wolności poszukiwań itd. Tym niemniej dziwię się trochę, że Autorzy pracy [4] nie porównali swoich wyników – jeśli nie z własnymi badaniami inną metodą, to chociaż z danymi literaturowymi – przed ich publikacją.

Literatura

- [1] Firkowicz K., Golański R., Pogorzelski J. A., Suchowierski J.: Nowy aparat płytowy do badania przewodności cieplnej materiałów budowlanych. XXXIX Konf. Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Warszawa – Krynica – Rzeszów, 1993
- [2] Pogorzelski J. A., Stempniak B.: Opracowanie wyników pomiarów przewodności cieplnej z badań ITB z lat 1956-88. Praca nauk. bad. ITB, NF-88/89, maszynopis, biblioteka ITB
- [3] Firkowicz-Pogorzelska K., Pogorzelski J. A.: Przewodność cieplna autoklawizowanych betonów komórkowych według PN-B-06258. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 2-3 (106-107) 1998
- [4] Gawin D. i in.: Wyniki badań własności termicznych wybranych materiałów budowlanych. 7 Konf. Nauk.-Techn. „Fizyka budowni w teorii i praktyce”, Łódź, 1999

Praca wpłynęła do Redakcji 15 III 2000