

**Katarzyna Firkowicz-Pogorzelska\***

## **METODYKA OKREŚLANIA WARTOŚCI OBLICZENIOWEJ WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH**

W artykule opisano metodykę ustalania – na podstawie wyników badań – wartości deklarowanej i obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych. Artykuł zawiera przykłady określania wartości deklarowanej na podstawie pomiarów w próbie oraz krzywych regresji. Podano procedurę konwersji danych pomiarowych z jednego zespołu warunków na drugi oraz wartości współczynników konwersji z uwagi na temperaturę i wilgotność w odniesieniu do materiałów termoizolacyjnych i betonu komórkowego. Zaproponowano sposób uwzględniania wpływu starzenia na współczynnik przewodzenia ciepła polistyrenu ekstrudowanego i pianki poliuretanowej. Zamieszczono tabele i wykresy zawierające wyniki badań wykonanych w Zakładzie Fizyki Ciepłej ITB.

### **1. Wstęp**

Współczynnik przewodzenia ciepła (inaczej – przewodność cieplna) jest podstawowym parametrem charakteryzującym właściwości cieplne materiału budowlanego. W odniesieniu do komponentu taką rolę odgrywa opór cieplny. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła mają szczególne znaczenie w przypadku materiałów termoizolacyjnych – służą nie tylko informacji, ale są wykorzystywane w konkurencji między producentami tych materiałów. Dlatego bardzo istotne jest stosowanie jednolitej metodyki określania tego współczynnika w odniesieniu do wszystkich materiałów i producentów.

W normalizacji europejskiej wprowadzono dwa pojęcia odnoszące się do wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów (lub oporu cieplnego komponentów):

- wartość deklarowaną, służącą kontroli jakości produkcji, odpowiadająca warunkom laboratoryjnym,
- wartość obliczeniową, służącą projektowaniu, odpowiadająca warunkom stosowania materiału w budynku.

W Zakładzie Fizyki Ciepłej od kilku lat jest określana wartość deklarowana i obliczeniowa współczynnika przewodzenia ciepła w odniesieniu do wszystkich materiałów badanych do celów aprobacyjnych. We wszystkich przypadkach jest stosowana metodyka opisana w niniejszym artykule.

---

\* mgr – st. specjalista w ITB

Niezależnie od tego, często mamy do czynienia z sytuacjami, w których potrzebna jest orientacyjna wartość obliczeniowa przewodności cieplnej pewnego materiału, nie związana z konkretnym producentem. W takich przypadkach są przydatne tabelaryczne wartości obliczeniowe współczynnika przewodzenia ciepła, odnoszące się do wyrobów anonimowych producentów.

Obliczeniowe wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych są podawane w Polsce od ponad pięćdziesięciu lat, w tym od 1964 r. w Polskich Normach. Przy opracowaniu PN wykorzystywano głównie wyniki badań Zakładu Fizyki Ciepłej ITB.

Do niedawna jednak nie było dobrze sprecyzowanego algorytmu określania wartości deklarowanych i obliczeniowych z uwagi na:

- warunki badania,
- konwersję na warunki stosowania,
- sposób ustalania wartości oczekiwanej w populacji generalnej, z uwzględnieniem liczności próby,
- uwzględnianie wpływu wilgotności,
- uwzględnianie ewentualnego wpływu starzenia materiału.

W ramach tematu 3391/NF-31/00 [1] podjęto próbę stabilizacji wartości obliczeniowych współczynnika przewodzenia ciepła przede wszystkim w odniesieniu do najważniejszych materiałów termoizolacyjnych. Podstawą były głównie wyniki badań i obliczeń prowadzonych w Zakładzie Fizyki Ciepłej. Przewidywane jest ich wykorzystanie w dokumentach normatywnych oraz do projektowania, w odniesieniu do materiałów anonimowego producenta.

## 2. Podstawowe definicje

**Wartość deklarowana** właściwości cieplnej (współczynnika przewodzenia ciepła materiału lub oporu cieplnego wyrobu) jest to wartość oczekiwana tej właściwości:

- oszacowana na podstawie danych pomiarowych, ewentualnie poddanych konwersji na warunki odniesienia,
- podana dla ustalonej frakcji populacji i poziomu ufności,
- odnosząca się do określonych warunków temperatury i wilgotności.

**Wartość obliczeniowa** właściwości cieplnej (współczynnika przewodzenia ciepła materiału lub oporu cieplnego wyrobu) jest to jej wartość w pewnych warunkach, uważanych za typowe przy zastosowaniu materiału lub wyrobu w komponencie budowlanym.

Podstawą określania wartości deklarowanej i obliczeniowej właściwości cieplnej są wyniki badań. Przy prowadzeniu badań istotne są następujące elementy:

- wybór właściwej metody badawczej,
- odpowiednia aparatura, zapewniająca wymaganą dokładność,
- stosowanie jednolitych procedur badawczych,
- wybór reprezentatywnej próby materiału lub wyrobu.

Dalsze rozważania będą dotyczyć przede wszystkim współczynnika przewodzenia ciepła materiałów.

### 3. Metody i warunki badań

Istnieje co najmniej kilkanaście metod pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych. Można je podzielić na dwie grupy:

- metody ustalonego strumienia ciepłego,
- metody nieustalonego strumienia ciepłego.

Tylko metody ustalonego strumienia ciepłego (aparaty rurowe i płytowe), w których znany strumień ciepła przechodzi przez próbkę, są od kilkadziesiąt lat przedmiotem normalizacji w wielu krajach i normalizacji międzynarodowej oraz znajdują zastosowanie w badaniach aprobacyjnych i certyfikacyjnych wyrobów budowlanych.

Stosowane są następujące przyrządy:

- aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną, zgodny z ISO 8302 (metoda pierwotna) [2],
- aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia ciepłego, zgodny z ISO 8301 (metoda wtórna) [3],

- aparat rurowy do badania otulin rur, zgodny z EN-ISO 8497 [4]

oraz, w odniesieniu do oporu ciepłego komponentów:

- skrzynka grzejna, zgodna z ISO 8990 [5].

Przyrządy oparte na metodach nieustalonego strumienia ciepłego zwykle nie są tak dopracowane i wypróbowane jak przyrządy ustalonego strumienia ciepłego i stawiają wyższe wymagania kwalifikacjom personelu; nie stały się nigdzie przedmiotem normalizacji poza PN-89/B-06258 [6] w odniesieniu do autoklawizowanego betonu komórkowego produkowanego przez zakłady zgrupowane w Stowarzyszeniu Bezpiecznej Prefabrykacji Betonowej.

Wartości liczbowe współczynnika przewodzenia ciepła lub oporu ciepłego uzyskane metodami nieustalonego strumienia ciepłego nie mogą służyć jako podstawa do obliczeń wartości deklarowanych i obliczeniowych tych właściwości.

W Zakładzie Fizyki Ciepłej ITB od kilku lat działa akredytowane stanowisko badawcze współczynnika przewodzenia ciepła, zgodne z ISO 8302. Aparat płytowy, oparty na metodzie absolutnej, umożliwia badania przy średniej temperaturze w zakresie od 0°C do +50°C.

Wymagana dokładność metody wynosi 2%, w odniesieniu do pojedynczego pomiaru w temperaturze zbliżonej do pokojowej – stanowisko badawcze zapewnia spełnienie tego warunku.

Wyniki badań współczynnika przewodzenia ciepła są zapisywane w bazie danych. Pod koniec 2000 r. zawierała ona ponad 2000 pozycji, a uzupełniana jest na bieżąco. Baza danych jest wykorzystywana do kontroli prawidłowości uzyskiwanych wyników – przez porównywanie z wcześniejszymi rezultatami badań podobnych materiałów, a także do wykrywania pewnych zależności i formułowania uogólnień.

Współczynnik przewodzenia ciepła zależy od rodzaju materiału oraz od:

- temperatury,
- wilgotności,
- niekiedy – wieku (czasu, który upłynął od chwili wyprodukowania),
- grubości próbki, jeżeli jest ona mniejsza od pewnej granicznej.

Opór cieplny zawsze jest związany z określoną grubością wyrobu. Dlatego podczas badania właściwości cieplnych należy określić następujące parametry:

- gęstość i grubość wyrobu (do celów identyfikacji),
- średnią temperaturę badania,
- zawartość wilgoci w próbce

oraz, w przypadku materiałów ulegających starzeniu:

- wiek próbki i warunki klimatyzowania (starzenia) przed badaniem.

W literaturze i praktyce europejskiej są stosowane zespoły warunków odniesienia przedstawione poniżej:

- średnia temperatura: 10°C lub 23°C,
- wilgotność: stan suchy lub stan odpowiadający równowadze z powietrzem o wilgotności względnej 50% albo 80%.

Stosowanie jednolitych warunków odniesienia pozwala na porównywanie właściwości różnych materiałów należących do jednej grupy, na przykład izolacji cieplnej.

Badania często są prowadzone w warunkach odniesienia. Przykładowo, beton komórkowy jest badany najczęściej po wysuszeniu do stałej masy.

## 4. Procedura określania wartości deklarowanej współczynnika przewodzenia ciepła

Wartość deklarowana współczynnika przewodzenia ciepła może być określana albo na podstawie bezpośrednich pomiarów na próbkach należących do jednej próby, albo przy wykorzystaniu zależności tego współczynnika od określonego parametru, na przykład gęstości.

Wartość deklarowana cechy jest to wartość oczekiwana w populacji generalnej wyrobu, oszacowana na podstawie:

- wyników pomiarów,
- określonej frakcji populacji przy zadanym poziomie ufności.

### 4.1. Określanie wartości deklarowanej na podstawie pomiarów w próbie

Metoda określania wartości deklarowanej na podstawie pomiarów w próbie jest oparta na założeniu, że rozkład cechy, jaką jest przewodność cieplna, w populacji jest rozkładem normalnym.

Oczekiwana wartość przewodności cieplnej może być obliczona na podstawie średniej arytmetycznej i oczekiwanego odchylenia standardowego  $n$  danych przy założeniu, że odchylenie standardowe populacji jest znane lub że nie jest znane.

Estymowana (oczekiwana) przewodność cieplna  $\lambda_{es}$  (np. dla 50% lub 90% frakcji) jest określona równaniami (1) i (2).

Gdy odchylenie standardowe w populacji generalnej jest znane:

$$\lambda_{es} = \lambda_m \pm k_1 \sigma_\lambda \quad (1)$$

Gdy odchylenie standardowe w populacji generalnej nie jest znane:

$$\lambda_{es} = \lambda_m \pm k_2 s_\lambda \quad (2)$$

- gdzie:  $\lambda_m$  – średnia arytmetyczna wyników pomiarów,  
 $\sigma_\lambda$  – odchylenie standardowe w populacji,  
 $s_\lambda$  – odchylenie średnie w próbie,  
 $k_1$  i  $k_2$  – odpowiednie współczynniki, uzależnione od:
- wymaganej frakcji  $p$ ,
  - wymaganego poziomu ufności,  $1-\alpha$ ,
  - liczebności próby,  $n$ .

We wzorach (1) i (2) znak plus daje jednostronną górną, a znak minus – dolną granicę przedziału ufności wartości estymowanej.

Tablica 1. Współczynniki do wyznaczania przedziałów ufności, przy nieznanym odchyleniu standardowym

Table 1. Coefficients for tolerance intervals, standard deviation unknown

n	$k_2$			
	$1-\alpha = 0,90$		$1-\alpha = 0,95$	
	$p = 50\%$	$p = 90\%$	$p = 50\%$	$p = 90\%$
3	1,09	4,26	1,69	
5	0,69	2,74	0,87	3,41
7	0,54	2,33	0,73	2,76
10	0,43	2,07	0,57	2,36
15	0,35	1,87	0,45	2,07
20	0,30	1,77	0,39	1,93
50	0,18	1,75	0,24	1,65
$\infty$	0,00	1,28	0,00	1,28

Najczęściej nie jest znane odchylenie średnie w populacji generalnej, a wartość oczekiwaną określa się na podstawie pomiarów w próbie, tzn. stosuje się wzór (2).

Średnia arytmetyczna wartości współczynnika przewodzenia ciepła,  $\lambda_m$ , jest dana wzorem:

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad (3)$$

a odchylenie średnie,  $s_{\lambda}$  – wzorem:

$$s_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_m - \lambda_i)^2}{n-1}} \quad (4)$$

w których  $\lambda_i$  – wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla  $i$ -tego elementu próby.

Wartości współczynnika  $k_2$  dla frakcji 50% i 90% oraz poziomu ufności 90% i 95% podano w tablicy 1, na podstawie [7].

W 1992 r. w europejskich komisjach normalizacyjnych CEN/TC 88 i 89 uzgodniono (tzw. Ischia Agreement), że 90% produkcji danego wyrobu ma być lepsze od wartości deklarowanej na poziomie ufności 90%.

Korzystając więc z tablic przy szacowaniu przedziału ufności przewodności cieplnej, należy przyjmować wartości współczynnika  $k_2$  dla  $1-\alpha = 0,90$  i  $p = 90\%$ .

#### 4.2. Reguły zaokrąglania

Wartość deklarowana współczynnika przewodzenia ciepła jest statystyczną wartością oczekiwaną, zaokrągloną zgodnie z następującymi zasadami:

- $\lambda \leq 0,08$ : zaokrąglenie w górę z dokładnością do 0,001 W/(m·K)
- $0,08 < \lambda \leq 0,20$ : zaokrąglenie w górę z dokładnością do 0,005 W/(m·K)
- $0,20 < \lambda \leq 2,00$ : zaokrąglenie w górę z dokładnością do 0,01 W/(m·K)
- $2,00 < \lambda$ : zaokrąglenie w górę z dokładnością do 0,1 W/(m·K).

#### 4.3. Przykłady określania wartości deklarowanej na podstawie pomiarów w próbie

##### Przykład 1

Zbadano 10 próbek wełny mineralnej. Wszystkie próbki potraktowano jako jedną próbę. Oznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła wykonano w średniej temperaturze próbki 20°C. Wyniki podano w tablicy 2.

Obliczenia statystyczne wykonano w odniesieniu do 10 wyników badań. Otrzymano:

$$\lambda_m = 0,03745 \text{ W/(m·K)}$$

$$s_{\lambda} = 0,00087 \text{ W/(m·K)}$$

Estymowana wartość współczynnika przewodzenia ciepła

$$\lambda_{es} = \lambda_m \pm k_2 s_{\lambda}$$

Dla 90% frakcji, poziomu ufności 90% i  $n = 10$   $k_2 = 2,07$ , stąd:

$$\lambda_{es} = 0,03745 \pm 0,00180$$

lub

$$0,03565 \leq \lambda_{es} \leq 0,03925$$

Aby otrzymać wartość deklarowaną, górną granicę przedziału ufności należy zaokrąglić w górę do najbliższej trzeciej cyfry po przecinku (0,001 W/(m·K)), zgodnie z regułami podanymi w p. 4.2.

Deklarowana wartość współczynnika przewodzenia ciepła wełny mineralnej w temperaturze 20°C będzie wynosić:

$$\lambda_D = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}.$$

Tablica 2. Dane liczbowe do przykładu 1

Table 2. Numerical data for example 1

Nr próbki	Współczynnik przewodzenia ciepła, $\lambda$ W/(m·K)	Nr próbki	Współczynnik przewodzenia ciepła, $\lambda$ W/(m·K)
1	0,0389	6	0,0380
2	0,0365	7	0,0374
3	0,0358	8	0,0379
4	0,0370	9	0,0373
5	0,0379	10	0,0378

### Przykład 2

Przykład 1 dotyczył dość dużej liczby próbek. W przykładzie 2 poddano badaniom tylko 3 próbki tej samej wełny mineralnej i otrzymano wyniki podane w tablicy 3 (trzy pierwsze wyniki z przykładu 1).

Tablica 3. Dane liczbowe do przykładu 2

Table 3. Numerical data for example 2

Nr próbki	Współczynnik przewodzenia ciepła, $\lambda$ W/(m·K)
1	0,0389
2	0,0365
3	0,0358

Otrzymano następujące wyniki obliczeń statystycznych:

$$\lambda_m = 0,03707 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$s_\lambda = 0,00163 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Dla 90% frakcji, poziomu ufności 90% i  $n = 3$   $k_2 = 4,26$ , stąd:

$$\lambda_{es} = 0,03707 \pm 0,00693$$

lub

$$0,03014 \leq \lambda_{es} \leq 0,04400$$

Po zaokrągleniu w górę górnej granicy przedziału ufności otrzymano deklarowaną wartość współczynnika przewodzenia ciepła tej samej, co w przykładzie 1, wełny mineralnej w temperaturze 20°C

$$\lambda_D = 0,044 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}.$$

Wynik ten jest o 10% wyższy od wartości uzyskanej w przykładzie 1. Decydujące znaczenie ma w tym przypadku dwa razy większa wartość współczynnika  $k_2$ . Zważyło również znacznie większe niż w przykładzie 1 średnie odchylenie, spowodowane dużym rozrzutem trzech wyników. Rozrzut ten nie odegrał takiej roli wśród dziesięciu wyników z przykładu 1. Należy zauważyć, że wartość średnia,  $\lambda_m$  w przykładzie drugim była znacznie niższa, a mimo to otrzymano większą wartość deklarowaną.

Stąd wniosek, że biorąc do badań próby o zbyt małej liczebności, można otrzymać znacznie zawyżone wartości deklarowane współczynnika przewodzenia ciepła.

#### 4.4. Określanie wartości deklarowanej na podstawie krzywej regresji

Wiele materiałów budowlanych charakteryzuje się zależnością przewodności cieplnej od gęstości. Są to zarówno betony i betony komórkowe, jak i materiały włókniste oraz porowate, służące do izolacji cieplnej.

W przypadku badania konkretnej odmiany jakiegoś materiału, na przykład styropianu lub wełny mineralnej o określonej gęstości, zbiór badanych próbek można traktować jak jedną próbę i postępować w sposób opisany w p. 4.1. Jednak gdy mamy do czynienia z szerokim przedziałem gęstości, należy postąpić inaczej.

Na podstawie wyników badań sporządza się krzywą regresji – tzn. linię oraz zależność funkcyjną (równanie regresji), najlepiej dopasowaną do zaobserwowanych wartości pomiarowych. W szczególności może to być zależność liniowa.

W celu znalezienia parametrów określających tę zależność można postąpić metodą najmniejszych kwadratów. Najdogodniej jest jednak skorzystać z jakiegoś pakietu programów komputerowych, służącego do statystycznej analizy pomiarów.

Sposób postępowania najlepiej jest prześledzić na konkretnym przykładzie.

##### Przykład 3

Zbadano 12 próbek styropianu samogasnącego (PS-EFS), po trzy z każdej z czterech odmian: 12, 15, 20 i 30. Styropian pochodził od anonimowego producenta. Średnia temperatura badania wynosiła 23°C.

Na podstawie wszystkich wyników oznaczeń sporządzono wykres zależności współczynnika przewodzenia ciepła styropianu od gęstości. Krzywą regresji otrzymano za pomocą pakietu STATGRAPHICS. Przyjęto model zależności w postaci funkcji potęgowej:

$$\lambda = a \rho^b \quad (5)$$

Otrzymano następujące parametry modelu:

$$a = 0,080945$$

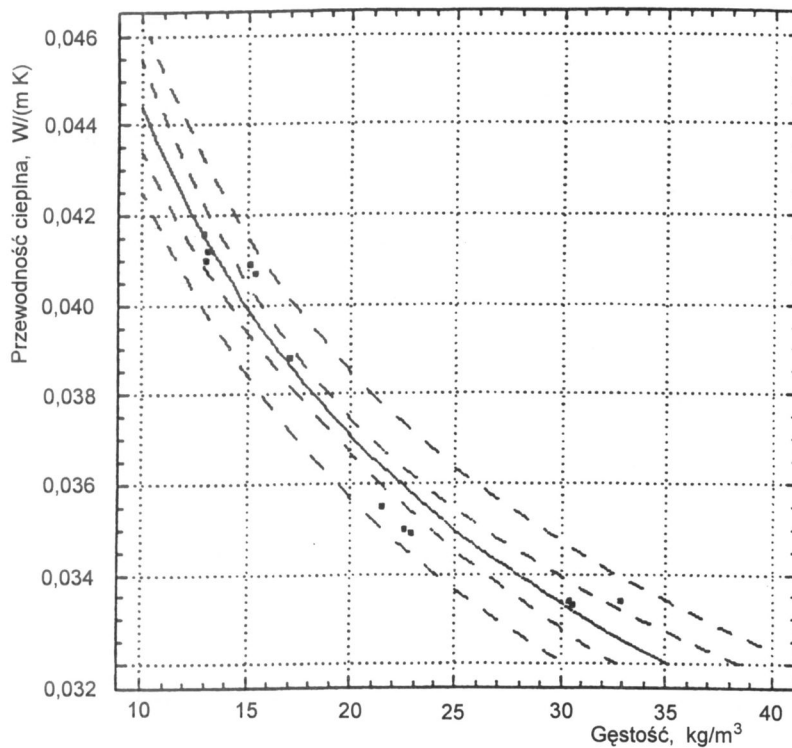
$$b = -0,260826$$

Na rysunku 1 podano krzywą regresji – tzn. zależność współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości dla wszystkich odmian styropianu.

Na wydruku, po obu stronach krzywej regresji widać dwie pary kropkowanych linii. Pierwsza para, leżąca blisko linii regresji oznacza przedział ufności modelu, przy założonym poziomie ufności (założono 90%). Druga, zewnętrzna para linii określa przedział ufności dla pojedynczego wyniku. W tym przypadku przyjęto również 90%, co oznacza, że 90% populacji charakteryzuje się przewodnością cieplną nie większą niż wyznaczona przez górną linię ograniczającą ten przedział ufności.



Przewodność cieplna styropianu  
w funkcji gęstości, temp.śr. 23°C



Rys. 1. Krzywa regresji dla styropianu  
Fig. 1. Regression line for EPS

Tablica 4. Wartości deklarowane współczynnika przewodzenia ciepła poszczególnych odmian styropianu

Table 4. Declared values of thermal conductivity for different varieties of EPS

Odmiana styropianu PS-E FS	Gęstość nominalna kg/m <sup>3</sup>	Wartość deklarowana współczynnika przewodzenia ciepła, $\lambda_D$ W/(m·K)
12	12	0,044
15	15	0,042
20	20	0,039
30	30	0,035

Wartości deklarowane współczynnika przewodzenia ciepła przy nominalnych wartościach gęstości czterech odmian styropianu zostały odczytane z wykresu. Wzięto pod uwagę linię ograniczającą od góry przedział ufności dla pojedynczego wyniku, przy założonym poziomie ufności 90%. Wartości te podano w tabelicy 4.

## 5. Procedura określania wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła

Jak powiedziano wcześniej, wartość obliczeniowa współczynnika przewodzenia ciepła materiału jest to jego wartość w typowych warunkach stosowania.

Przy ustalaniu wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła materiałów należy uwzględnić:

- wartości uzyskane z badań – traktowane jako wyjściowe,
- ocenę statystyczną wyrobu,
- poprawki z uwagi na temperaturę, wilgotność i starzenie.

Na podstawie zmierzonych wartości  $\lambda$  w określonych warunkach można – stosując odpowiednią konwersję – określić współczynnik przewodzenia ciepła w wybranych warunkach porównawczych.

Wartość obliczeniową otrzymuje się więc dokonując konwersji górnej granicy przedziału ufności współczynnika przewodzenia ciepła, otrzymanej w wyniku obliczeń statystycznych, na warunki eksploatacji izolacji w budynkach w zakresie temperatury i wilgotności.

## 6. Konwersja danych z jednego zespołu warunków na drugi

### 6.1. Podstawowe zależności

Przy znanej gęstości materiału, w pewnych określonych granicach zmian zawartości wilgoci, temperatury i wieku można dokonać konwersji współczynnika przewodzenia ciepła z jednego zestawu warunków (1) na drugi (2), zgodnie z wyrażeniem:

$$\lambda_2 = \lambda_1 F_T F_u F_a \quad (6)$$

gdzie:  $F_T$  – temperaturowy czynnik konwersji,  
 $F_u$  – wilgotnościowy czynnik konwersji,  
 $F_a$  – czynnik konwersji z uwagi na wiek,  
 $T$  – temperatura,  
 $u$  – zawartość wilgoci,  
 $a$  – wiek (czas od wyprodukowania).

Podobnie – znając wilgotność i temperaturę w warunkach przyszłego użytkowania oraz asortyment grubości – można określić współczynnik przewodzenia ciepła w warunkach użytkowania materiału.

Czynnik konwersji  $F_T$ , związany z temperaturą,  $T$ , jest określony następująco:

$$F_T = e^{f_T(T_2 - T_1)} \quad (7)$$

gdzie  $f_T$  – współczynnik konwersji z uwagi na temperaturę, w 1/K.

Czynnik konwersji  $F_U$ , związany z zawartością wilgoci na jednostkę masy,  $u$ , jest określony następująco:

$$F_U = e^{f_u(u_2 - u_1)} \quad (8)$$

gdzie  $f_u$  – współczynnik konwersji z uwagi na wilgotność odniesioną do masy.

Czynnik konwersji  $F_U$ , związany z zawartością wilgoci na jednostkę objętości,  $\psi$ , jest określony następująco:

$$F_U = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)} \quad (9)$$

gdzie  $f_\psi$  – współczynnik konwersji z uwagi na wilgotność odniesioną do objętości.

Starzenie zależy od typu materiału, struktury, środka spieniającego, okładzin, temperatury oraz grubości materiału. Ocenę efektu starzenia danego materiału można uzyskać na podstawie teoretycznego modelu sprawdzonego za pomocą danych eksperymentalnych. Nie ma prostych zasad korelowania starzenia z upływem czasu w przypadku konkretnego materiału.

W dalszej części niniejszego artykułu będą przedstawione wyniki badań wpływu wymienianych wyżej czynników na przewodność cieplną typowych materiałów termoizolacyjnych, jak również uzyskane wartości współczynników konwersji.

## 6.2. Konwersja z uwagi na temperaturę

Wartości współczynników konwersji temperaturowej w odniesieniu do dużej grupy materiałów budowlanych są podane w PN-ISO 10456 [7], w załączniku 1, w formie tablic. Identyfikatorem, poza nazwą materiału, jest współczynnik przewodzenia ciepła. Jest to wartość orientacyjna, przy czym nie ma informacji, jakiej temperaturze odpowiada. Podano jedynie, że wartości w tablicach są ważne dla średniej temperatury między 0°C i +30°C.

Badania zależności współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury były prowadzone w ostatnich latach w Zakładzie Fizyki Ciepłej przede wszystkim w odniesieniu do materiałów termoizolacyjnych. Najczęściej na podstawie badań w pięciu punktach temperaturowych dla każdej próbki sporządzano wykres zależności przewodności cieplnej od temperatury, a następnie obliczano współczynnik konwersji z uwagi na ten parametr  $f_T$  występujący w wyrażeniu (7).

Korzystano z pakietu STATGRAPHICS, przyjmując jako krzywą regresji – funkcję wykładniczą postaci:

$$\lambda = e^{a+bt} \quad (10)$$

gdzie  $a$  i  $b$  są współczynnikami wyliczonymi przez program, a  $t$  – temperaturą w stopniach Celsjusza.

Funkcję tę można zapisać inaczej jako:

$$\lambda = e^a e^{bt} = Ae^{bt} \quad (11)$$

gdzie

$$e^a = A \quad (12)$$

Wyrażenie (7) przekształcono do analogicznej postaci, przyjmując:

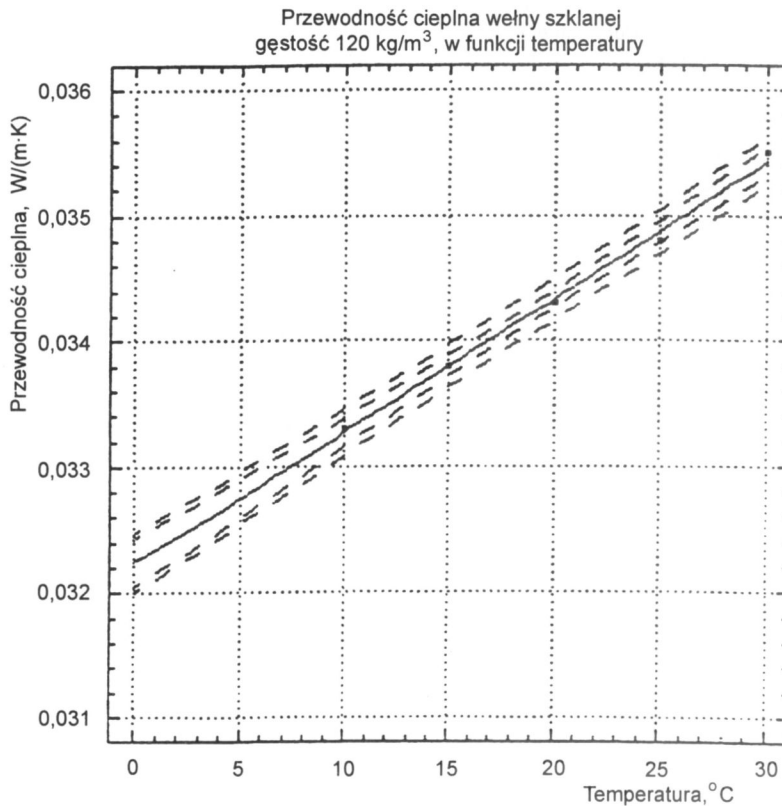
$$T_1 = 0^\circ\text{C}, \quad T_2 - T_1 = t, \quad \lambda_1 = \lambda(0), \quad \lambda_2 = \lambda.$$

Wówczas

$$\lambda = \lambda(0) e^{f_T t} \quad (13)$$

Z porównania (11) i (13) wynika:

$$A = e^a = \lambda(0), \quad b = f_T \quad (14)$$



Rys. 2. Współczynnik przewodzenia ciepła wełny szklanej w funkcji temperatury  
Fig. 2. Thermal conductivity versus density for glass wool

Jako przykład, na rysunku 2 pokazano krzywą zależności współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury dla wełny mineralnej szklanej o gęstości około  $120 \text{ kg/m}^3$ . Współczynnik  $b$  jest równy  $3,2495 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . A zatem współczynnik konwersji z uwagi na temperaturę wynosi

$$f_T = 0,0031 \text{ K}^{-1}$$

Więcej przykładów analizy regresji ze względu na temperaturę można znaleźć w opracowaniu [1] z 1999 r.

Alternatywnym sposobem określania współczynnika konwersji temperaturowej jest zbadanie współczynnika  $\lambda$  w dwóch różnych temperaturach średnich i wykorzystanie następującego wyrażenia, wynikającego z (7):

$$f_u = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (15)$$

W tablicach 5 i 6 zestawiono wartości współczynnika konwersji temperaturowej otrzymane jednym z wyżej opisanych sposobów, a także wartości zmieszczone w PN-ISO 10456. Dla każdej próbki podano gęstość,  $\rho$ , i współczynnik przewodzenia ciepła,  $\lambda_{10}$ , w średniej temperaturze  $10^\circ\text{C}$ .

Porównując wartości współczynnika  $f_T$  wełny mineralnej należy wziąć pod uwagę, że w PN-ISO 10456 nie wprowadzono rozróżnienia wełny skalnej i szklanej. Przy tym zastrzeżeniu, przyjmując wartości normowe jako orientacyjne, trzeba zauważyć, że istnieje wyraźna tendencja: im lżejsza wełna, tym większa wartość współczynnika konwersji temperaturowej. Ta sama prawidłowość występuje w przypadku styropianu.

Obserwuje się niezłą zbieżność wyników, przy czym wartości  $f_T$  w przypadku lekkich wyrobów z wełny skalnej są większe według badań Zakładu Fizyki Ciepłej, a w przypadku lekkich wyrobów z wełny szklanej – według PN-ISO 10456.

W tablicy 6 podano współczynniki konwersji najczęściej stosowanego piankowego materiału termoizolacyjnego – styropianu.

Powyższe wartości współczynnika konwersji z uwagi na temperaturę są średnimi z badań wielu próbek styropianu różnych producentów. Konkretnie wartości dotyczące poszczególnych odmian różniły się nieco w zależności od producenta, jednak zaobserwowano ogólną tendencję: im większa gęstość styropianu, tym mniejsza wartość  $f_T$ . W wyniku tych badań otrzymano wartości współczynnika konwersji temperaturowej nieco mniejsze niż to przewiduje norma.

Na zakończenie – trzy przykłady zależności współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego od temperatury. Zależność ta nie jest silna, o czym świadczą wartości współczynnika konwersji temperaturowej trzech odmian betonu komórkowego w stanie suchym podane w tablicy 7.

Należy zauważyć, że w PN-ISO 10456 nie podano współczynników konwersji temperaturowej w odniesieniu do betonu komórkowego, a tylko ogólnie – do lekkich betonów; być może jest to przyczyną rozbieżności między nimi a wynikami badań autorki. Zgodnie z tymi ostatnimi współczynnik konwersji z uwagi na temperaturę praktycznie nie zależy od gęstości betonu komórkowego.

Tablica 5. Przykłady wartości współczynnika konwersji temperaturowej – wełna mineralna  
 Table 5. Examples of temperature conversion coefficient for mineral wool

Lp.	Gęstość, $\rho$	Przewodność cieplna $\lambda_{10}$	Współczynnik konwersji, $f_T$ , według	
	kg/m <sup>3</sup>		W/(m·K)	badań autorki
wełna mineralna skalna				
1	32	0,037	0,0045	0,0050
2	40	0,035	0,0043	0,0046
3	82	0,032	0,0033	0,0040
4	108	0,034	0,0027	0,0033
5	147	0,037	0,0030	0,0030
6	170	0,039	0,0032	0,0027
wełna mineralna szklana				
7	16	0,035	0,0050	0,0046
8	34	0,032	0,0040	0,0038
9	83	0,030	0,0030	0,0033
10	120	0,033	0,0029	0,0035
11	137	0,034	0,0029	0,0033
12	156	0,032	0,0033	0,0035

Tablica 6. Przykłady wartości współczynnika konwersji temperaturowej – styropian  
 Table 6. Examples of temperature conversion coefficient for EPS

Lp.	Gęstość $\rho$	Przewodność cieplna $\lambda_{10}$	Współczynnik konwersji, $f_T$ , według	
	kg/m <sup>3</sup>		W/(m·K)	badań autorki
1	12	0,040	0,0034	0,0037
2	15	0,038	0,0032	0,0034
3	20	0,035	0,0026	0,0033
4	30	0,032	0,0024	0,0032
5	40	0,031	0,0022	0,0030

Tablica 7. Przykłady wartości współczynnika konwersji temperaturowej – beton komórkowy  
 Table 7. Examples of temperature conversion coefficient for autoclaved aerated concrete

Odmiana betonu	Gęstość $\rho$	Przewodność cieplna, $\lambda_{10}$	Współczynnik konwersji, $f_T$ , według	
			badania własnych	PN-ISO 10456
	kg/m <sup>3</sup>	W/(m·K)	1/K	1/K
04	390	0,099	0,0017	0,003
05	466	0,115	0,0018	0,003
06	609	0,150	0,0015	0,002

Podsumowując serię badań wpływu temperatury na przewodność cieplną należy stwierdzić, że wartości współczynnika konwersji uzyskane w Zakładzie Fizyki Ciepłej są na ogół niższe od podanych w PN-ISO 10456. Wobec tych rozbieżności słuszna wydaje się zasada, aby badać współczynnik przewodzenia ciepła w warunkach maksymalnie zbliżonych do warunków stosowania materiału.

### 6.3. Konwersja z uwagi na wilgotność

Zawilgocenie materiału w zakresie wilgotności sorpcyjnej nie ma istotnego wpływu na wartość współczynnika przewodzenia ciepła włóknistych i piankowych materiałów termoizolacyjnych. Analiza tego zagadnienia znajduje się w opracowaniu [1] z 1999 r.

Również w projekcie Europejskiej Normy [8] dotyczącej obliczeniowych wartości ciepło-wilgotnościowych podano obliczeniową wilgotność sorpcyjną tych materiałów jako równą zero.

Inna jest sytuacja w przypadku betonów, również betonów komórkowych, które mogą być traktowane jako materiały do izolacji cieplnej.

Poniżej podano przykładowe wyniki badań wpływu zawilgocenia sorpcyjnego kilku odmian betonu komórkowego.

Współczynnik konwersji z uwagi na wilgotność,  $f_u$ , obliczono biorąc pod uwagę dwie wartości przewodności cieplnej, odpowiadające dwom różnym wartościom wilgotności. Ze wzoru (8) wynika, że

$$f_u = \frac{1}{u_2 - u_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (16)$$

We wszystkich przypadkach wyniki odnoszono do stanu suchego, przyjmując jako  $u_1$  wilgotność w stanie suchym równą zero.

Po podstawieniu:  $u_2 = u$  i  $u_1 = 0$  otrzymano

$$f_u = \frac{1}{u} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (17)$$

Wyniki badań i obliczeń podano w tablicy 8.

Tablica 8. Przykłady współczynnika konwersji wilgotnościowej dla różnych odmian betonu komórkowego  
 Table 8. Examples of moisture conversion coefficient for autoclaved aerated concrete

Rodzaj betonu komórkowego	Gęstość nominalna (odmiana) kg/m <sup>3</sup>	Wilgotność masowa kg/kg	Przewodność cieplna W/(m·K)		Współczynnik konwersji wilgotnościowej kg/kg
			$\lambda_1$	$\lambda_2$	
Piaskowy	400	0,034	0,0861	0,0923	2,05
Piaskowy	400	0,037	0,0974	0,1040	1,77
Piaskowy	600	0,027	0,1487	0,1596	2,62
Piaskowy	600	0,058	0,1284	0,1497	2,65
Popiołowy	400	0,037	0,0953	0,1047	2,54
Popiołowy	600	0,036	0,1180	0,1278	2,22

Wartości współczynnika konwersji badanych rodzajów i odmian betonu komórkowego są zbliżone – ich rozrzut sprawia wrażenie przypadkowego. Średnia wartość wynosi 2,31. Po zaokrągleniu do dwóch cyfr znaczących otrzymano współczynnik konwersji z uwagi na wilgotność dla betonu komórkowego równy

$$f_u = 2,3$$

Wartość ta jest prawie dwa razy mniejsza od podanej w PN-ISO 10456 [7] dla autoklawizowanego betonu komórkowego, wynoszącej 4.

#### 6.4. Wpływ wilgoci na przenoszenie ciepła według dokumentów europejskich

Zagadnienia ruchu wilgoci w przegrodach budowlanych oraz wpływu zawilgocenia na ich izolacyjność cieplną zaczynają się dopiero pojawiać w normalizacji europejskiej.

Problem dotyczy głównie materiałów murowych (cegły i betonu komórkowego). Przy analizie wpływu wilgoci na przenoszenie ciepła wygodne jest podzielenie gęstości strumienia ciepłego na trzy składniki:

a) przepływ ciepła spowodowany gradientem temperatury w warunkach równowagi termodynamicznej wilgoci z otoczeniem, tj. bez transportu wilgoci:

$$q_a = -\lambda^* \frac{dT}{dx} \quad (18)$$

gdzie:  $q_a$  – gęstość strumienia ciepła,  
 $\lambda^*$  – przewodność cieplna wilgotnego materiału,  
 $\frac{dT}{dx}$  – gradient temperatury;

b) konwekcyjne przenoszenie ciepła w wyniku ruchu wilgoci; ten składnik jest zwykle pomijalny;



c) przepływ ciepła w wyniku przemian fazowych; ten efekt zależy od występowania i wielkości transportu wilgoci w materiale.

Zapobieganie przepływowi ciepła w wyniku przemian fazowych oraz jego ewentualne uwzględnianie omówiono w Raporcie Technicznym CEN [9]. W dokumencie tym ograniczono się do zawartości wilgoci w zakresie wilgotności sorpcyjnej, tzn. pozostającej w równowadze termodynamicznej z powietrzem o wilgotności względnej nie przekraczającej 95%. W przypadku większości materiałów budowlanych zawartość wilgoci będącej w równowadze z powietrzem o wilgotności nie większej niż 95% jest zwykle poniżej wartości progowej przepływu wilgoci w fazie ciekłej. Wartość ta jest często nazywana nasyceniem krytycznym, jeżeli dotyczy frakcji nie zawierającej fazy ciekłej, lub krytyczną zawartością wilgoci, jeżeli odnosi się do wilgotności właściwej materiału.

## 6.5. Konwersja z uwagi na starzenie

Zmiana wartości współczynnika przewodzenia ciepła w miarę upływu czasu jest charakterystyczna dla tych izolacji piankowych, do spieniania których zastosowano gazy inne niż powietrze. Dotyczy to przede wszystkim:

- polistyrenu ekstrudowanego,
- pianki poliuretanowej.

Jeżeli materiały te nie są szczelnie osłonięte, następuje wymiana, na skutek dyfuzji, gazów użytych do spieniania – na powietrze. Prowadzi to do wzrostu przewodności cieplnej tych materiałów. Wzrost wartości  $\lambda$  jest szybki w pierwszych tygodniach, potem jego tempo maleje, a współczynnik przewodzenia ciepła asymptotycznie dąży do wartości odpowiadającej całkowitemu zastąpieniu gazów spieniających przez powietrze.

Szybkość zmian współczynnika przewodzenia ciepła zależy od grubości warstwy materiału (im większa grubość, tym wolniejsze zmiany) i od temperatury powietrza otaczającego (im wyższa temperatura, tym proces przebiega szybciej). Wpływ wilgotności powietrza otaczającego jest pomijalnie mały.

Określenie zarówno postaci funkcyjnej czynnika konwersji z uwagi na starzenie materiału, jak i wartości liczbowych współczynnika konwersji jest zadaniem trudnym. Wymaga ono wielokrotnego badania tych samych próbek w długim przedziale czasu. Należy również dysponować „świeżymi” próbkami w momencie rozpoczynania eksperymentu, a później, między badaniami przechowywać je w określonych warunkach. Dlatego też w PN-ISO 10456 [7], zawierającej reguły dokonywania konwersji z uwagi na temperaturę i wilgotność, w odniesieniu do procesu starzenia autorzy ograniczyli się jedynie do kilku ogólnych stwierdzeń.

W Zakładzie Fizyki Ciepłej były co pewien czas ponawiane badania grupy próbek polistyrenu ekstrudowanego i pianki poliuretanowej, przysłanych do Zakładu w ramach zleceń zewnętrznych. Szczególnie cenne były pomiary dotyczące pianki poliuretanowej, której próbki dostarczono w opakowaniu foliowym tuż po wytworzeniu, tak że w momencie pierwszego badania była to „świeża” pianka. Między badaniami próbki były przechowywane w komorze klimatycznej o temperaturze  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej powietrza  $(50 \pm 5)\%$ .

Poniżej przedstawiono wyniki badań polistyrenu ekstrudowanego (tablica 9) oraz pianki poliuretanowej (tablice 10 i 11). Podany w kolumnie 2 wiek próbki oznacza czas liczony od pierwszego badania.

Tablica 9. Wpływ starzenia na przewodność cieplną polistyrenu ekstrudowanego,  $t_{sr} = 25^{\circ}\text{C}$   
 Table 9. The impact of aging on thermal conductivity of XPS, mean temperature  $25^{\circ}\text{C}$

Data badania	Wiek próbki	Przewodność cieplna W/(m·K)	Względny wzrost przewodności %
11.03.97	0	0,0239	—
06.10.98	20 miesięcy	0,0277	15,9
06.11.99	31 miesięcy	0,0278	16,3
23.11.00	43 miesiące	0,0292	22,2

Tablica 10. Wpływ starzenia na przewodność cieplną pianki poliuretanowej,  $t_{sr} = 23^{\circ}\text{C}$   
 Table 10. The impact of aging on thermal conductivity of polyurethane foam, mean temp.  $23^{\circ}\text{C}$

Data badania	Wiek próbki	Przewodność cieplna W/(m·K)	Względny wzrost przewodności %
31.07.97	0	0,0220	—
20.07.99	24 miesiące	0,0285	29,5
07.10.99	27 miesięcy	0,0281	27,7
23.11.00	40 miesięcy	0,0286	30,0

Tablica 11. Wpływ starzenia na przewodność cieplną pianki poliuretanowej,  $t_{sr} = 23^{\circ}\text{C}$   
 Table 11. The impact of aging on thermal conductivity of polyurethane foam, mean temp.  $23^{\circ}\text{C}$

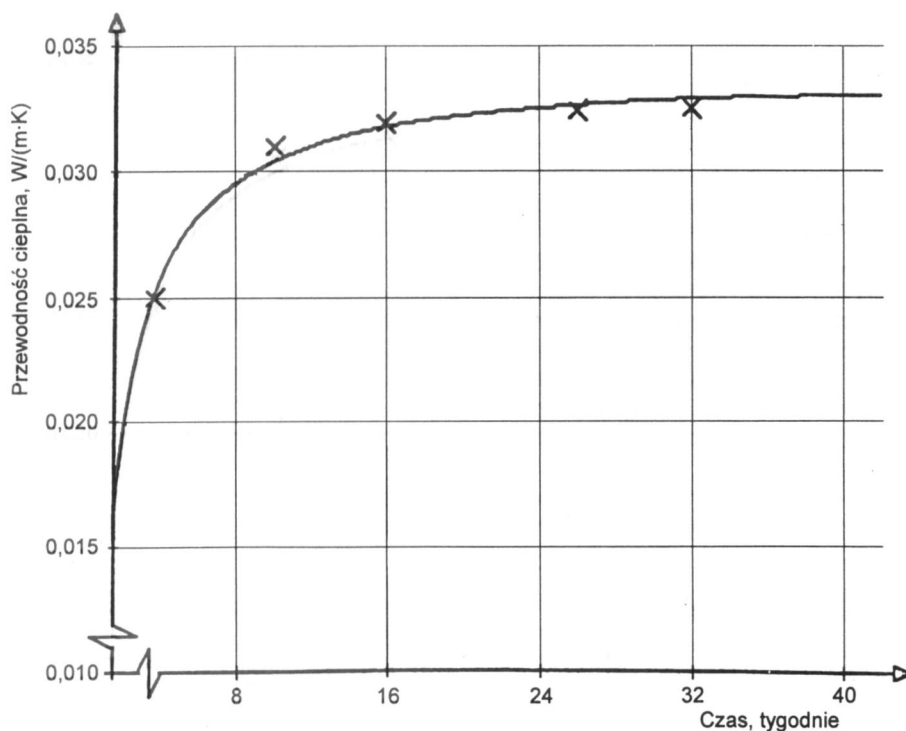
Data badania	Wiek próbki	Przewodność cieplna W/(m·K)	Względny wzrost przewodności %
01.08.97	0	0,0206	—
08.11.99	27 miesięcy	0,0266	29,1
21.11.00	39 miesięcy	0,0270	31,1

W przypadku polistyrenu ekstrudowanego wzrost współczynnika przewodzenia ciepła w ciągu 3,5 roku wynosił średnio około 20% wartości początkowej. Przed pierwszym badaniem próbki były stosunkowo „świeże”, ich wiek nie przekraczał 3 miesięcy.

Jak wspomniano wcześniej, tempo zmian współczynnika przewodzenia ciepła zależy od rodzaju gazu zastosowanego do spieniania. Szczególnie szybko proces wymiany gazów przebiega wówczas, gdy środkiem spieniającym jest dwutlenek węgla. Na rysunku 3 pokazano zależność współczynnika przewodzenia ciepła od czasu w przypadku pianki poliuretanowej spienianej  $\text{CO}_2$ . Pierwsze badanie miało miejsce po 4 tygodniach od wyprodukowania pianki, ostatnie – po 32 tygodniach. W tym czasie nastąpił wzrost wartości  $\lambda$  o 30%, przy czym najszybszy był w pierwszych 10 tygodniach. Przewodność cieplna tuż po wytworzeniu pianki była nieznana, można jednak przypuszczać, że jej wzrost odpowiadający długiemu okresowi użytkowania sięgnie 40% wartości początkowej.

Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku pianki poliuretanowej następuje wzrost przewodności cieplnej, na skutek zjawiska starzenia, o około 30 + 40% w stosunku do wartości początkowej. Po trzech latach przewodność cieplna jest już praktycznie ustabilizowana.

W przypadku polistyrenu ekstrudowanego wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła jest prawdopodobnie mniejszy – wynosi około 30% wartości początkowej. Tak jak poprzednio – najszybciej starzeją się polistyreny spieniane  $\text{CO}_2$ .



Rys. 3. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od czasu – pianka poliuretanowa spieniana  $\text{CO}_2$

Fig. 3. Thermal conductivity versus time – polyurethane foam blown  $\text{CO}_2$

## 12. Podsumowanie

Proces ustalania wartości obliczeniowych współczynnika przewodzenia ciepła składa się z dwóch faz: pomiarowej i obliczeniowej.

W fazie pomiarowej istotne jest zgromadzenie odpowiedniej liczby wiarygodnych danych doświadczalnych – tzn. reprezentatywnych i obciążonych jak najmniejszymi błędami. Dokładność pomiarów jest uzależniona od rzetelności aparatury i od stosowania właściwych procedur badawczych.

Faza obliczeniowa to określanie wartości deklarowanej na podstawie wyników pomiarów, a następnie – wartości obliczeniowej przewodności cieplnej, z uwzględnieniem warunków stosowania danego materiału. W tej fazie istotne jest stosowanie jednakowej dla wszystkich materiałów metodyki – w zakresie schematu obliczeniowego, liczebności próby, współczynników przeliczeniowych z warunków badania na warunki zastosowania. Metodyka określania wartości obliczeniowej  $\lambda$  opisana w niniejszym artykule jest rutynowo stosowana w Zakładzie Fizyki Ciepłej w procesie aprobacyjnym materiałów budowlanych.

## Bibliografia

- [1] Firkowicz-Pogorzelska K.: Metodyka określania wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła i dane tabelaryczne do normalizacji. Praca naukowo-badawcza ITB nr 3391/NF-31/99 i nr 3391/NF-31/00, maszyn., biblioteka ITB, Warszawa
- [2] PN-ISO 8302 Izolacja cieplna – Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym – Aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną
- [3] PN-ISO 8301 Izolacja cieplna – Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym – Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego
- [4] EN-ISO 8497:1996 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties of thermal insulation for circular pipes
- [5] PN-EN ISO 8990:1998 Izolacja cieplna. Określanie właściwości związanych z przenikaniem ciepła w stanie ustalonym. Metoda kalibrowanej i osłoniętej skrzynki grzejnej
- [6] PN-89/B-06258 Autoklawizowany beton komórkowy
- [7] PN-ISO 10456:1999 Izolacja cieplna – Materiały i wyroby budowlane – Określanie deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych
- [8] prEN 12524:1999 Building materials and products – Hygrothermal properties – tabulated design values
- [9] CEN/TC 89N 791E:2001 Thermal performance of building materials and components – Principles for the determination of thermal properties of moist materials and components

### METHODICS OF DETERMINATION OF DESIGN VALUE OF THERMAL CONDUCTIVITY FOR BUILDING MATERIALS

#### Summary

The paper deals with following problems:

– rules of determination of declared value of thermal conductivity for building materials using two methods based on measurements: in the first – calculated declared value as

expected value, given for 90% fraction and 90% confidence level; in the second – declared value obtained from regression analysis; 3 examples have been given;

- rules of determination of design value of thermal conductivity for building materials;
- procedures to convert values obtained under one set of conditions to those valid for another set of conditions;
- conversion coefficients for temperature and moisture with reference to thermal insulating materials and aerated concrete;
- proposal of aging factors for extruded polystyrene and polyurethane foam.

*Praca wpłynęła do Redakcji 29 V 2001*