ARCHITEKTURA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ARCHITECTURE
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-A/2/2011
ZESZYT 11
ROK 108
ISSUE 11
YEAR 108

HALINA GARBALIŃSKA, MAGDALENA BOCHENEK*

IZOLACYJNOŚĆ TERMICZNA A AKUMULACYJNOŚĆ CIEPLNA WYBRANYCH MATERIAŁÓW ŚCIENNYCH

THERMAL INSULATION AND THERMAL ACCUMULATION OF SELECTED WALL MATERIALS

Streszczenie

W ostatnich latach coraz większą wagę przywiązuje się do właściwego zaprojektowania przegród zewnętrznych pod względem cieplno-wilgotnościowym. Stosowane rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe mają służyć redukcji zużycia energii na cele grzewcze poprzez ograniczenie przenikania ciepła przez zewnętrzne przegrody. Drogą do realizacji tego celu jest zwiększanie oporów termicznych przegrody, głównie poprzez wprowadzenie materiałów o możliwie niskiej przewodności cieplnej. Tymczasem o zachowaniu się przegrody w zmiennych warunkach termicznych decyduje nie tylko współczynnik przewodzenia ciepła składowych warstw, ale również pojemność cieplna zastosowanych w nich materiałów. W artykule przedstawiono badania dotyczące wzajemnych relacji między tymi parametrami materiałowymi na przykładzie wybranych materiałów ściennych.

Słowa kluczowe: przewodność cieplna, pojemność cieplna objętościowa, beton komórkowy

Abstract

In recent years, increasing attention is paid to the proper solution envelope in terms of thermo-moisture properties. There are construction and material solutions, which serve to reduce energy consumption for heating purposes by limiting heat transfer through the outer barrier. The way to achieve this goal is to increase the thermal resistance of a barrier, mainly through the implementation of materials with as low thermal conductivity as possible. Whereas the behaviour of the barrier in varying thermal conditions is determined not only by the thermal conductivity coefficient of layers, but also the heat capacity of used materials. The paper presents the study of the common relation between these parameters based on selected wall materials.

Keywords: thermal conductivity, volumetric heat capacity, autoclaved aerated concrete

* Dr hab. inż. Halina Garbalińska, prof. ZUT, mgr inż. Magdalena Bochenek, Katedra Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

W naszej szerokości geograficznej budynki wymagają ogrzewania przez 7–8 miesięcy. W rezultacie nakłady energetyczne ponoszone na ogrzewanie stają się dominującym składnikiem w strukturze zużycia energii. Według danych zamieszczonych w [13, 14] w gospodarstwach domowych w Polsce średnio 71,5% zużywanej energii przeznacza się na ogrzewanie pomieszczeń. Potrzeba racjonalnej gospodarki surowcami energetycznymi, jak również ograniczenia emisji CO_2 wydzielanego w trakcie ich spalania, legła u podstaw współczesnych aktów prawnych, na czele z Dyrektywą 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy w sprawie charakterystyki energetycznej budynków [2]. Zaostrzone wymagania znalazły swój wyraz m.in. w znowelizowanym w listopadzie 2008 r. Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [11]. Zawarte tam wymagania obligują projektanta do takiego zaprojektowania przegród zewnętrznych budynku pod względem cieplno-wilgotnościowym, aby wyeliminować niebezpieczeństwo wystąpienia porażeń pleśniowych oraz zapewnić właściwą izolacyjność cieplną. Ustawowo określono maksymalne współczynniki przenikania ciepła U_{max} dla różnego rodzaju przegród w budynkach o różnym przeznaczeniu. Spełnienie tych wymagań wiąże się z koniecznością zapewnienia odpowiednio wysokiego oporu termicznego każdej przegrody odgradzającej grzane wnętrze od chłodnego otoczenia. Zadanie sprowadza się zatem do właściwego doboru poszczególnych warstw przegrody – ze względu na ich grubość oraz współczynnik przewodzenia ciepła. Odpowiednio duży opór termiczny przegrody gwarantuje formalne spełnienie warunku $U \leq U_{max}$. Wobec wprowadzonych w 2008 r. surowszych wymagań w stosunku do wartości U_{max} ograniczeniu ulegają straty ciepła przez przegrody w wyniku przenikania, co przekłada się na zmniejszone zużycie energii na ogrzewanie w nowoprojektowanych budynkach. Niestety przepisy zawarte w [11] nie odnoszą się do zagadnień związanych z akumulacją ciepła w przegrodach, gdy tymczasem zagwarantowanie właściwej pojemności cieplnej przegród może zdecydowanie poprawić bilans energetyczny budynku, szczególnie w warunkach zamierzonego nieciągłego dostarczania energii cieplnej. Przegrody o dużej pojemności cieplnej poprawiają nie tylko funkcjonowanie budynków w okresie grzewczym, ale chronią wnętrze budynku przed nadmiernym nagrzaniem w okresie letnim.

Materiałem, który usiłuje pogodzić te dwa przeciwstawne wymagania jest beton komórkowy. Z jednej strony cechuje się on stosunkowo niską przewodnością cieplną (jak na materiał pełniący również funkcję konstrukcyjną), a z drugiej strony stosunkowo wysoką akumulacyjnością cieplną (w porównaniu z lekkimi materiałami do izolacji cieplnej). Niestety oferowane projektantom dane materiałowe są bardzo skromne [9] i wg [4] „nie są na ogół dostępne w postaci dogodnej do bezpośredniego wykorzystania jako parametry wejściowe w programach komputerowych".

W niniejszym artykule przedstawiono badania dotyczące przewodności cieplnej oraz objętościowej pojemności cieplnej przeprowadzone w odniesieniu do czterech odmian bloczków z betonu komórkowego.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

2. Przewodność cieplna

Zdolność do przewodzenia ciepła przez dany materiał charakteryzuje współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]. Jest on definiowany jako gęstość ustalonego strumienia ciepła przepływającego przez jednolitą warstwę materiału, gdy spadek temperatury ΔT w stosunku do grubości warstwy d wynosi 1 K/m. Wyznacza się go ze wzoru

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{\Delta T \cdot A \cdot t} \tag{1}$$

gdzie:

- Q – ilość ciepła [J],
- d – grubość warstwy [m],
- ΔT – różnica temperatur na powierzchniach warstwy [K],
- A – powierzchnia warstwy [m^2],
- t – czas przepływu ciepła [s].

Im niższy współczynnik przewodzenia ciepła, tym lepsze właściwości termoizolacyjne materiału. Współczynnik λ zależy od wielu czynników, głównie od rodzaju materiału (tworzywa budującego szkielet oraz specyfiki porów), od zawartości wilgoci, temperatury, kierunku przepływu ciepła, wieku [3]. Wpływ poszczególnych czynników, jak również liczne, wieloaspektowe badania dotyczące przewodności cieplnej opisano szczegółowo w [12]. Czynnikiem najsilniej oddziałującym na przewodność cieplną danego materiału jest stopień jego zawilgocenia. Wysoka wilgotność skutkuje wzrostem wartości współczynnika λ, a tym samym pogorszeniem właściwości izolacyjnych danego materiału [1]. Natomiast w przypadku materiału suchego przewodność cieplna wzrasta wraz ze wzrostem gęstości objętościowej. Związek między współczynnikiem przewodzenia ciepła a gęstością wyraża wartość pośrednią między przewodnością cieplną szkieletu oraz składnika wypełniającego przestrzeń porowatą [6].

3. Pojemność cieplna

Do podstawowych właściwości termicznych materiałów budowlanych zalicza się, obok współczynnika przewodzenia ciepła, również ciepło właściwe c [J/(kg·K)]. Ciepło właściwe informuje o ilości energii, jaką należy dostarczyć do 1 kg danego materiału, aby zwiększyć jego temperaturę o 1 stopień. Wzór definicyjny przybiera postać

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \tag{2}$$

gdzie:

- Q – ilość dostarczonego ciepła [J],
- m – masa materiału [kg],
- ΔT – wzrost temperatury [K].

Ciepło właściwe ma priorytetowe znaczenie z punktu widzenia pojemności cieplnej C [J/K], opisanej wzorem

$$C = c \cdot m \tag{3}$$

z którego wynika, że wielkość C jest wprost proporcjonalna do masy m oraz ciepła właściwego c danego materiału.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Często pojemność cieplną definiuje się w sposób objętościowy bazując na gęstości objętościowej, co przedstawia zależność:

$$C = c \cdot \rho \tag{4}$$

W tym przypadku tzw. objętościowa pojemność cieplna C wyrażona jest w [J/(m^3·K)]. Wielkość ta jest definiowana jako energia potrzebna do podwyższenia temperatury jednostki objętości materiału o 1 K. Z powyższego zapisu wynika, że im wyższa gęstość objętościowa materiału, tym więcej ciepła jest on w stanie zgromadzić.

Pojemność cieplna to zdolność pobierania i akumulowania ciepła pochodzącego z otoczenia. Materiały charakteryzujące się wysoką pojemnością cieplną potrafią wchłaniać nadwyżki ciepła, dzięki czemu wnętrze nie będzie się nadmiernie nagrzewało i nie będzie potrzeby jego chłodzenia. Zakumulowane ciepło emitowane jest z przegród w okresie chłodnym, co redukuje ilość energii potrzebnej do ogrzewania.

4. Opis eksperymentu

4.1. Cel i zakres badań

Badania dotyczące przewodności cieplnej oraz pojemności cieplnej przeprowadzono na czterech rodzajach bloczków z betonu komórkowego. Wybrano następujące odmiany bloczków: 350, 400, 500, 600. Najpierw przeprowadzono badania na próbkach wilgotnych (bloczki magazynowane na otwartym placu składowym). A następnie wykonano pomiary na próbkach suchych, po wysuszeniu w suszarce w temperaturze podnoszonej stopniowo do 105°C.

Badania miały na celu wyznaczenie dla wytypowanych odmian betonu komórkowego wzajemnych relacji między gęstością objętościową a współczynnikiem przewodzenia ciepła oraz objętościową pojemnością cieplną.

4.2. Opis metody badań

Istnieje bardzo wiele metod pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła. Ze względu na zmienność strumienia w czasie można je podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody stacjonarne (ustalonego strumienia cieplnego) oraz metody niestacjonarne (nieustalonego strumienia cieplnego) [5]. W niniejszym artykule badania przeprowadzono metodą niestacjonarną.

Do przeprowadzenia badań posłużono się przenośnym aparatem pomiarowym ISOMET 2104. Jest to urządzenie służące do bezpośredniego pomiaru właściwości termofizycznych szerokiej gamy materiałów izotropowych. Pomiar jest oparty na analizie odpowiedzi termicznej materiału na impuls cieplny. Przepływ ciepła jest emitowany przez elektryczny opornik znajdujący się w sondzie, która jest bezpośrednio przyłożona do badanej próbki. Wyznaczanie przewodności cieplnej oraz objętościowej pojemności cieplnej oparte jest na zapisach cyklicznie badanej temperatury jako funkcji czasu w założeniu, że rozprzestrzenianie się ciepła występuje w nieograniczonym ośrodku. Szeroki zakres pomiarów urządzeniem ISOMET pozwala na mierzenie różnorodnych materiałów o niezwykle różnych właściwościach. Urządzenie to jest wyposażone w różnego typu czujniki: w kształcie igły (do materiałów porowatych), w postaci włókna (do materiałów miękkich) oraz jako sondy płaskie (do materiałów twardych).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Pomiary właściwości termofizycznych aparatem ISOMET mogą być, tak samo jak wszystkie inne pomiary, zależne od warunków prowadzenia pomiarów. Najbardziej znaczący wpływ na uzyskiwane wyniki wywierają następujące czynniki: jakość kontaktu cieplnego sondy pomiarowej i badanego przedmiotu, wahania temperatury, ograniczone wymiary badanej próbki, niejednorodność materiału, anizotropia badanej próbki oraz wilgotność badanego materiału.

4.3. Przebieg badań

W badaniach zastosowano sondę przylgową. Materiały badane sondą tego rodzaju muszą mieć gładką, płaską powierzchnię o średnicy co najmniej 60 mm. Zalecana minimalna grubość badanego materiału to 10–15 mm, w zależności od jego przewodnictwa.

Pierwsze badania wykonano bezpośrednio na bloczkach przywiezionych z placu składowego. Powierzchnie bloczków wyrównano przez szlifowanie, tak aby w trakcie badania sonda dokładnie przylegała do powierzchni badanego materiału i aby tym samym uniknąć wystąpienia niezamierzonych błędów pomiarowych. Przed rozpoczęciem właściwych badań zmierzono wymiary rzeczywiste bloczków, wyznaczono ich objętość, a następnie zważono i obliczono gęstość bloczków [7]. Po tych wstępnych pomiarach dokonano właściwych badań przewodności cieplnej oraz objętościowej pojemności cieplnej.

Po zakończeniu pierwszego etapu badań wycięto z środkowej części każdego typu bloczka próbki o grubości ok. 5 cm, które następnie poddano suszeniu do stałej masy. W odniesieniu do wszystkich próbek suszenie zrealizowano w ten sam sposób, korzystając z programowalnej suszarki laboratoryjnej, ustawionej na następujące cykle czasowo-temperaturowe: 12 h – temp. 50°C, następnie 12 h – temp. 75°C, następnie 6×12 h – temp. 105°C, następnie 12 h – temp. 75°C, następnie 12 h – temp. 50°C.

Po zakończeniu suszenia ustalono masę próbek suchych oraz określono wilgotność [8] bloczków pochodzących ze składu materiałów budowlanych, które to bloczki przebadano w pierwszym etapie. Następnie przystąpiono do realizacji drugiego zasadniczego etapu eksperymentu, tj. pomiarów przewodności cieplnej oraz objętościowej pojemności cieplnej próbek w stanie suchym (il. 1).

Il.1. Pomiary aparatem ISOMET 2104

Ill. 1. Measurements with the instrument ISOMET 2104

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4.4. Wyniki badań i ich analiza

Badania przeprowadzone z zastosowaniem aparatu ISOMET 2104 pozwoliły na ocenę zależności przewodności cieplnej oraz pojemności cieplnej od gęstości objętościowej, jak również na ocenę wzajemnej zależności tych podstawowych parametrów termicznych w grupie badanych odmian betonu komórkowego.

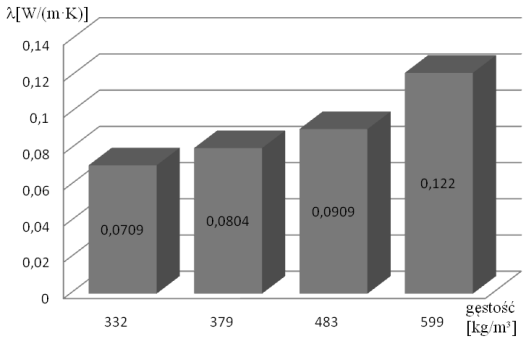
W tabeli 1 zebrano wyniki badań przeprowadzonych na wytypowanych czterech odmianach betonu komórkowego w stanie suchym.

Tabela 1

Wyniki badań współczynnika przewodności cieplnej, objętościowej pojemności cieplnej oraz gęstości objętościowej dla próbek w stanie suchym

Odmiana BK	Współczynnik λ [W/(m·K)]	Pojemność cieplna c·ρ [J/(m³·K)]	Średnie λ [W/(m·K)]	Średnie c·ρ [J/(m³·K)]	Gęstość w stanie suchym [kg/m³]
350	0,0710	$5{,}03*10^5$	0,0709	$5{,}00 \cdot 10^5$	332
	0,0710	$5{,}01*10^5$			
	0,0706	$4{,}95*10^5$			
400	0,0801	$5{,}70*10^5$	0,0804	$5{,}69 \cdot 10^5$	379
	0,0808	$5{,}70*10^5$			
	0,0804	$5{,}66*10^5$			
500	0,0908	$5{,}95*10^5$	0,0909	$5{,}94 \cdot 10^5$	483
	0,0912	$5{,}94*10^5$			
	0,0908	$5{,}92*10^5$			
600	0,121	$6{,}41*10^5$	0,122	$6{,}45 \cdot 10^5$	599
	0,123	$6{,}47*10^5$			
	0,123	$6{,}48*10^5$			

Na ilustracjach 2, 3, 4 przedstawiono graficzne zestawienie danych zebranych w tabeli 1. Na il. 2 przedstawiono wzrost współczynnika przewodzenia ciepła wraz ze wzrostem gęstości objętościowej.

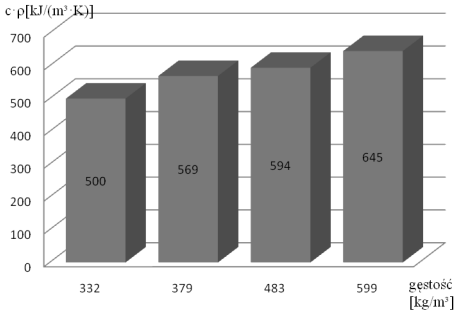


Il. 2. Przewodność cieplna a gęstość objętościowa

Ill. 2. Thermal conductivity vs bulk density

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

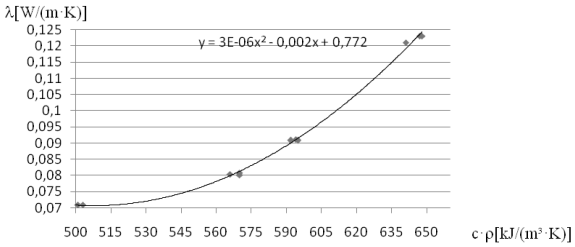
Na ilustracji 4 przedstawiono wzrost pojemności cieplnej wraz ze wzrostem gęstości objętościowej.



Il. 3. Pojemność cieplna a gęstość objętościowa

Ill. 3. Heat capacity vs bulk density

Na ilustracji 4 przedstawiono zależność współczynnika przewodzenia ciepła i objętościowej pojemności cieplnej.



Il. 4. Przewodność cieplna a pojemność cieplna

Ill. 4. Thermal conductivity vs heat capacity

5. Wnioski

Analiza otrzymanych za pomocą aparatu Isomet 2104 wyników wskazuje, że wraz ze wzrostem wartości współczynnika λ wzrasta pojemność cieplna. W przypadku bloczków ściennych z betonu komórkowego im niższa klasa gęstości, a zatem lepsza izolacyjność cieplna, tym gorsza akumulacyjność cieplna.

Beton komórkowy składa się z olbrzymiej liczby porów powietrza, przez co ma bardzo dobre właściwości izolacji termicznej. Z drugiej jednak strony powietrze ma niewielką objętościową pojemność cieplną, co powoduje obniżenie akumulacyjności cieplnej betonu komórkowego – tym wyraźniejsze, im niższa jest jego gęstość objętościowa.

W ostatnim czasie producenci bloczków z betonu komórkowego zaczęli stosować materiały zmiennofazowe w mikrokapsułkach dodawane do bloczków w trakcie produkcji. Pozwala to zwiększyć objętościową pojemność cieplną przy jednoczesnym zapewnieniu dobrej izolacyjności cieplnej i paroprzepuszczalności. Jednak produkt w postaci bloczków z betonu komórkowego z dodatkiem materiału akumulującego ciepło jest na razie niedostępny na polskim rynku budowlanym ze względu na wysokie koszty produkcji.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Literatura

[1] Autoclaved aerated concrete. Properties, Testing and Design. RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC,1993.
[2] Dyrektywa 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
[3] Ickiewicz I., Sarosiek W., Ickiewicz J., *Fizyka budowli. Wybrane zagadnienia*, Politechnika Białostocka, Białystok 2000.
[4] Jerman M., Keppert M., Vyborny J., Černy R., *Kumulacja oraz transfer ciepła i wilgoci w betonie komórkowym na przykładzie dwóch różnych materiałów pochodzenia przemysłowego*, Cement-wapno-beton, 1/2011, 18-29.
[5] Małolepszy J., *Materiały budowlane. Podstawy technologii i metody badań.* Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2004.
[6] Płoński W., Pogorzelski J.A., *Fizyka budowli*, Arkady, Warszawa 1979.
[7] PN-EN 678:1998 Oznaczanie gęstości w stanie suchym autoklawizowanego betonu komórkowego.
[8] PN-EN 1353:1999 Oznaczanie wilgotności autoklawizowanego betonu komórkowego.
[9] PN-EN-ISO 12524:2003 Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno--wilgotnościowe. Stabelaryzowane wartości obliczeniowe.
[10] PN-EN-ISO 10456:2004 Materiały i wyroby budowlane. Procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
[11] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12.04.2004 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. Nr 75, poz. 690, z późniejszymi zmianami.
[12] Siwińska A., *Związek między izotermą sorpcji a współczynnikiem przewodzenia ciepła porowatego materiału budowlanego*, praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2008.
[13] Wnuk R., *Budowa domu pasywnego w praktyce*, Opolgraf S.A., Warszawa 2006.
[14] Wnuk R., *Instalacje w domu pasywnym i energooszczędnym*, Opolgraf S.A., Warszawa 2007.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ