

# WPLYW ZAWARTOŚCI WILGOCI NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA BETONU KOMÓRKOWEGO METODĄ STACJONARNĄ

GAWIN Dariusz <sup>1</sup>

KOŚNY Jan <sup>2</sup>

WILKES Kenneth <sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Politechnika Łódzka*

<sup>2,3</sup> *Oak Ridge National Laboratory, USA*

## EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE ACCURACY OF STEADY STATE THERMAL CONDUCTIVITY TEST FOR A CELLULAR CONCRETE

In this paper some results of numerical simulations and experimental investigations concerning steady state tests of thermal conductivity for cellular concretes with various initial relative humidity are presented. Effect of the material density, specimen thickness, temperature difference and moisture content on the tests accuracy, as well as physical phenomena during the test have been numerically analysed. Results of the experimental measurements for three types of cellular concrete of various moisture content have been discussed.

### STRESZCZENIE

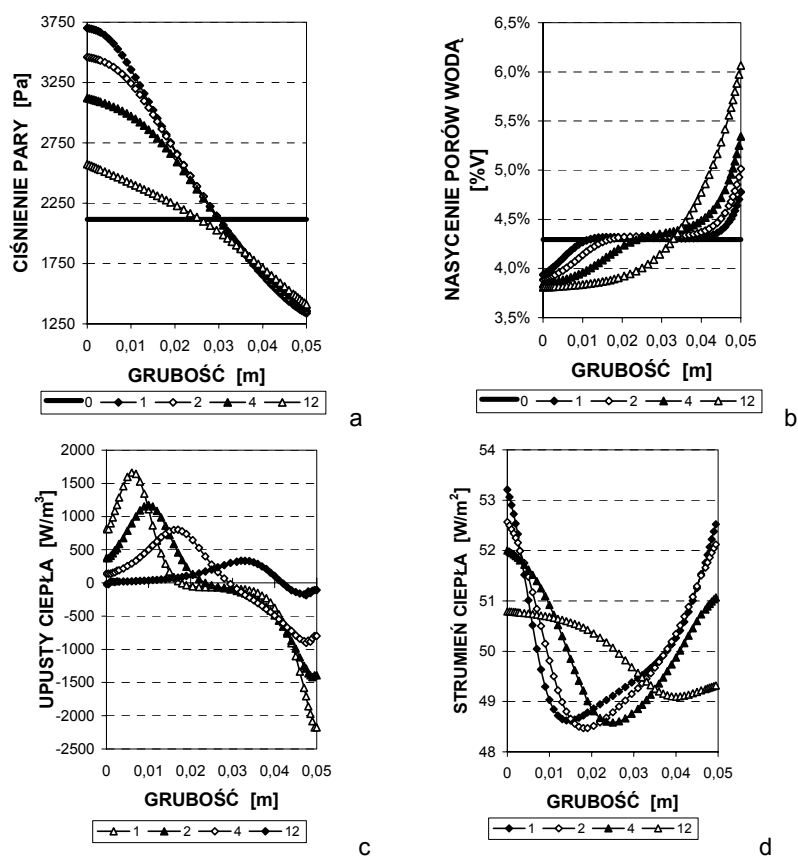
W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych i badań doświadczalnych dotyczące badań współczynnika przewodzenia ciepła metodą stacjonarną dla betonów komórkowych o różnej początkowej wilgotności względnej. Numerycznie przeanalizowano wpływ gęstości materiału, grubości próbki, różnicy temperatur i zawartości wilgoci na dokładność pomiaru, a także przebieg zjawisk fizycznych podczas badań. Omówiono wyniki badań doświadczalnych dla trzech typów betonu komórkowego o różnej wilgotności.

### 1. WSTĘP

Materiały, z których zbudowane są przegrody budowlane, zwykle zawierają w porach pewną ilość wilgoci, która wpływa na pogorszenie ich własności izolacyjnych. Podczas symulacji komputerowych procesów cieplno-wilgotnościowych w elementach budowlanych niezbędna jest zatem znajomość właściwości termicznych w funkcji zawartości wilgoci, np. [1]. Do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych najczęściej stosuje się metody stacjonarne, które, jak powszechnie uważa się, nie nadają się jednak do badań materiałów zawilgoconych. Stąd często stosowane są w tym celu metody niestacjonarne, które charakteryzują się jednak mniejszą dokładnością, która ponadto silnie zależy od spełnienia szeregu warunków, np. w przypadku laserowej metody impulsowej dotyczących kształtu impulsu cieplnego czy grubości optycznej ośrodka [2]. Ich niespełnienie może być przyczyną istotnych błędów pomiarowych, których źródła czasem trudno zidentyfikować, np. [3]. Dlatego też można zauważyć dążenie do stosowania metody stacjonarnej także dla materiałów zawilgoconych, choć w ich przypadku występują pewne zjawiska fizyczne, jak np. termodyfuzja wilgoci, czy przepływ ciepła utajonego, które mogą być po-

tencjalnym źródłem dodatkowych błędów pomiarowych. Może to być szczególnie istotnych dla materiałów o otwartej strukturze wewnętrznej, jak np. betony komórkowe. Celem niniejszego referatu jest ilościowa ocena wpływu zawartości wilgoci na dokładność pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego metodą stacjonarną, korzystając z wyników symulacji numerycznych, jak i badań doświadczalnych wykonanych w Laboratorium Badań Materiałowych ORNL w Oak Ridge (Tennessee) w USA.

## 2. ZJAWISKA FIZYCZNE ZACHODZĄCE PODCZAS BADAŃ W APARacie PŁYTOWYM



Rys.1. Wyniki symulacji zjawisk cieplno-wilgotnościowych w próbce betonu komórkowego ( $d=5\text{ cm}$ ,  $\Delta T=20\text{ K}$ ,  $\varphi=75\%$ ) podczas badań metodą stacjonarną: a) ciśnienie pary wodnej, b) zawartość wilgoci, c) źródła i upusty ciepła przemian fazowych, d) strumień ciepła.

Fig.1. Simulation results of hygro-thermal phenomena in a cellular concrete specimen ( $d=5\text{ cm}$ ,  $\Delta T=20\text{ K}$ ,  $\varphi=75\%$ ) during steady state tests: a) vapour pressure, b) moisture content, c) latent heat sources and sinks related to phase changes, d) heat flux.

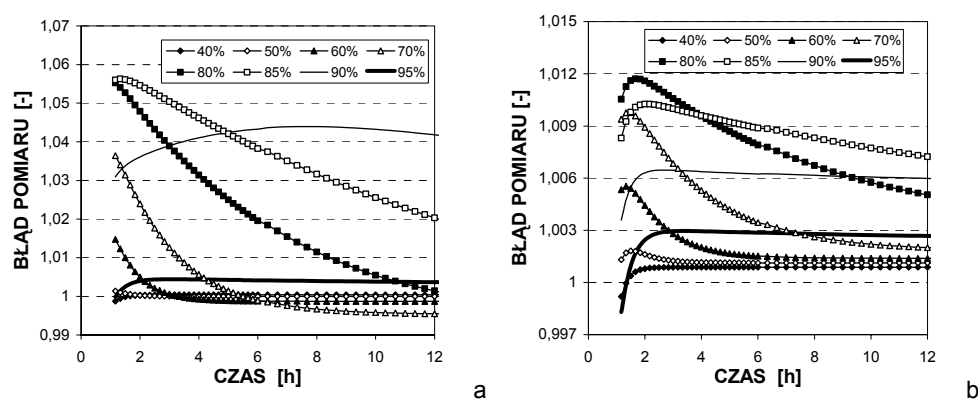
Istota badania współczynnika przewodzenia ciepła w aparacie płytowym polega na zmierzeniu strumienia ciepła przepływającego przez próbkę materiału o znanej grubości, w warunkach ustalonego przepływu ciepła, który osiągany jest po czasie zależnym od grubości próbki, pojemności cieplnej jej materiału oraz zastosowanej różnicy temperatur między płytami grzejącą i chłodzącą. Badanie takie trwa zwykle od dwóch do kilku godzin. Gradient temperatury, występujący w próbce, wywołuje termo-dyfuzyjny przepływ pary wodnej w kierunku płyty chłodzącej, Rys. 1a, w wyniku czego wzrasta koncentracja wilgoci w jej pobliżu, Rys. 1b. Skutkiem tego jest przepływ wody w kierunku płyty grzejącej, równoważący przepływ masy pary wodnej. Dodatkowo, obserwuje się odparowywanie ciekłej wody w cieplejszej strefie próbki i kondensację pary wodnej w obszarach chłodniejszych, Rys. 1c, czemu towarzyszą upusty i źródła ciepła oraz zróżnicowanie wartości strumienia ciepła po grubości próbki, Rys. 1d. Podobne zjawiska występują w tzw. rurach cieplnych (ang. *heat pipe*), wykorzystywanych do transportu ciepła w warunkach braku siły grawitacji. Skutkiem wymienionych zjawisk fizycznych jest przepływ strumienia ciepła utajonego (odparowywanie wody – przepływ pary wodnej – kondensacja), który zwiększa strumień ciepła odczuwalnego i konwekcyjnego, w wyniku czego Fourierski strumień ciepła jest zmienny w czasie i przestrzeni, Rys. 1d. Nie są więc spełnione podstawowe założenia metody stacjonarnej wyznaczania wartości współczynnika przewodzenia ciepła w aparacie płytowym, co może być źródłem istotnych błędów pomiaru dla materiałów zawilgoconych.

### 3. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH.

W celu oszacowania dokładności pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła metodą stacjonarną, wykonano komputerowe symulacje zjawisk cieplno-wilgotnościowych w próbkach z betonu komórkowego o gęstościach  $\rho=400 \text{ kg/m}^3$  (AAC 400) i  $\rho=600 \text{ kg/m}^3$  (AAC 600), o grubościach  $d= 2.5, 5, 7.5$  i  $10 \text{ cm}$ , dla różnych początkowych zawartości wilgoci (odpowiadających wilgotności względnej powietrza w porach  $\varphi= 40, 50, 60, 70, 80, 85, 90$  i  $95\%$ ) i różnicach temperatur między płytami aparatu wynoszących  $\Delta T= 5, 10$  i  $20 \text{ K}$ . Obliczenia wykonano za pomocą programu komputerowego HMTRA, który bazuje na modelu matematycznym zjawisk cieplno-wilgotnościowych w kapilarno-porowatych materiałach budowlanych oraz metodzie jego numerycznego rozwiązania omówionych w [1]. Przykładowe wyniki tych obliczeń pokazano na Rysunkach 1 i 2 oraz w Tablicach 1 i 2, zaś szersze ich omówienie, wraz z podaniem własności materiałowych i warunków brzegowych przyjętych podczas symulacji komputerowych, przedstawiono w [4].

Numeryczna analiza niestacjonarnych procesów cieplno-wilgotnościowych w próbkach z betonu komórkowego, wykazała, że strumień ciepła podczas badań w aparacie płytowym zmienia się w początkowej ich fazie, zwłaszcza dla wilgotności względnych z zakresu od ok. 70% do ok. 90%, Rys. 2. Podczas obliczeń znana jest „rzeczywista” wartość współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda_r$  materiału o określonej zawartości wilgoci oraz wartości temperatur i strumieni ciepła na powierzchniach próbki, które są potrzebne do wyznaczenia „zmierzonej” wartości tego współczynnika  $\lambda_m$ . W związku z tym możliwe jest oszacowanie błędu pomiaru (rozumianego tutaj jako stosunek  $\lambda_m/\lambda_r$ ), który jest następstwem zmienności strumienia ciepła w czasie i przestrzeni, redystrybucji rozkładu wilgoci oraz strumieni: ciepła utajonego i przenoszonego konwekcyjnie, ale nie uwzględnia niedoskonałości przyrządów pomiarowych. Na Rys. 2 pokazano wyniki takiego oszacowania dla próbek analizo-

wanych betonów komórkowych o najczęściej stosowanej podczas badań laboratoryjnych grubości  $d=5\text{cm}$  oraz dla różnicy temperatur  $\Delta T=20\text{K}$ . Jak widać, w przypadku betonu komórkowego o gęstości  $\rho=600\text{kg/m}^3$  błąd ten dla całego zakresu wilgotności jest stosunkowo niski (nie przekracza 1.5%), podobnie jak betonu AAC 400 dla niskich wilgotności względnych ( $\varphi\leq 60\%$ ) oraz zbliżonych do 95%. Ten ostatni, nieco zaskakujący rezultat można wytłumaczyć przeciwnym kierunkiem zmian wyników pomiaru współczynnika  $\lambda_m$  wskutek redystrybucji wilgoci - zmniejszenie jego wartości, oraz występowania „efektu rury cieplnej” (ang. *heat pipe effect*), powodującego wzrost  $\lambda_m$ . Wyniki obliczeń pokazują [4], że próby ograniczenia wpływu niepożądanych zjawisk cieplno-wilgotnościowych przez zmniejszenie gradientu temperatury, tj. zmniejszenie różnicy temperatur  $\Delta T$  lub zwiększenie grubości próbki  $d$ , nie przynoszą spodziewanych, pozytywnych rezultatów w całym analizowanym zakresie wilgotności, Tablice 1 i 2.



Rys.2. Numeryczna analiza błędu pomiaru wsp. przewodzenia ciepła metodą stacjonarną dla betonu komórkowego o różnym zawilgoceniu, dla gęstości: a)  $400\text{ kg/m}^3$ , b)  $600\text{ kg/m}^3$ .

Fig.2. Numerical analysis of test error of steady state thermal conductivity method for a cellular concrete of various moisture content, with density: a)  $400\text{ kg/m}^3$ , b)  $600\text{ kg/m}^3$ .

Należy jednak podkreślić, że wyznaczony numerycznie błąd pomiarów, wywołany obecnością wilgoci w porach, nawet dla materiału o stosunkowo otwartej strukturze wewnętrznej, jak beton komórkowy o gęstości  $\rho=400\text{kg/m}^3$  nie przekracza 6% i praktycznie może być pominięty wobec innych możliwych źródeł błędu, jak np. kontaktowe opory cieplne czy „poprzeczny” konwekcyjny przepływ ciepła na styku powierzchni próbki i płyt aparatu, niejednorodności materiału czy próbek „niedokładności” geometryczne. Możliwe jest także odpowiednie korygowanie wyników pomiarów doświadczalnych za pomocą wyników obliczeń numerycznych (o ile znane są dostatecznie wiarygodne dane materiałowe do ich przeprowadzenia), jak zaproponowano w [4].

Tablica 1: Wpływ czasu pomiaru, różnicy temperatur i wilgotności względnej na błąd pomiaru [%] wsp. przewodzenia ciepła betonu AAC 400 przy grubości próbki  $d=5\text{cm}$ .

Table 1: Effect of the measurement time, temperature difference and relative humidity on the test error [%] of thermal conductivity for the AAC 400 cellular concrete for  $d=5\text{cm}$

Czas pomiaru [h]	$\Delta T$ [K]	$\varphi=70\%$	$\varphi=80\%$	$\varphi=85\%$	$\varphi=90\%$	$\varphi=95\%$
2	6	2.9	4.9	4.6	2.1	0.0
	10	2.8	4.9	4.8	2.4	0.1
	20	2.2	4.6	5.4	3.7	0.4
4	6	1.5	4.0	4.1	2.1	0.1
	10	1.3	3.8	4.3	2.5	0.2
	20	0.6	3.1	4.6	4.1	0.4
6	6	0.7	3.2	3.7	2.0	0.1
	10	0.5	2.9	3.9	2.5	0.2
	20	-0.1	2.0	3.8	4.3	0.4

Tablica 2: Wpływ czasu pomiaru, grubości próbki i wilgotności względnej na błąd pomiaru [%] wsp. przewodzenia ciepła betonu AAC 400 przy różnicy temperatur  $\Delta T=20\text{K}$ .

Table 2: Effect of the measurement time, specimen thickness and relative humidity on the test error [%] of thermal conductivity for the AAC 400 cellular concrete for  $\Delta T=20\text{K}$ .

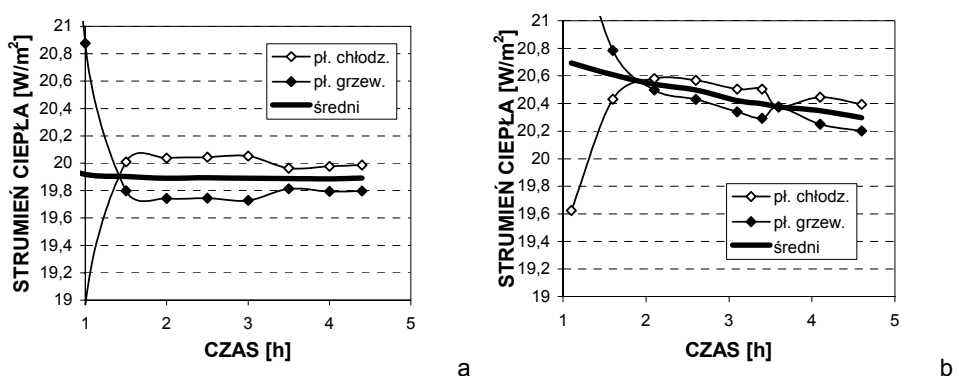
Czas pomiaru [h]	$d$ [cm]	$\varphi=70\%$	$\varphi=80\%$	$\varphi=85\%$	$\varphi=90\%$	$\varphi=95\%$
2	2.5	-0.3	1.2	3.2	4.4	0.4
	5.0	2.2	4.6	5.4	3.7	0.4
	7.5	3.8	5.7	5.7	3.1	0.2
	10.0	4.6	6.0	5.6	2.8	0.3
4	2.5	-0.5	-0.3	1.3	3.8	0.3
	5.0	0.6	3.1	4.6	4.1	0.4
	7.5	2.5	4.9	5.5	3.6	0.4
	10.0	3.9	5.7	5.7	3.2	0.3
6	2.5	-0.5	-0.6	0.4	3.0	0.3
	5.0	-0.1	1.8	3.7	4.4	0.4
	7.5	1.3	3.9	5.1	3.9	0.4
	10.0	2.7	5.0	5.5	3.5	0.4

Dokładność metod niestacjonarnych, stosowanych obecnie dla materiałów budowlanych, jak np. laserowej metody impulsowej, metody liniowej sondy grzewczej (ang. *hot wire method*) czy metody płaskiej sondy grzewczej (ang. *plane heat source method*), jest wyraźnie gorsza od metod stacjonarnych, a ponadto ich stosowanie może być problematyczne ze względu na małe wymiary próbek, co w przypadku niejednorodnych materiałów, jak np. beton zwykły o grubym kruszywie czy beton komórkowy o dużych porach (niskiej gęstości) praktycznie uniemożliwia ich stosowanie.

#### 4. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

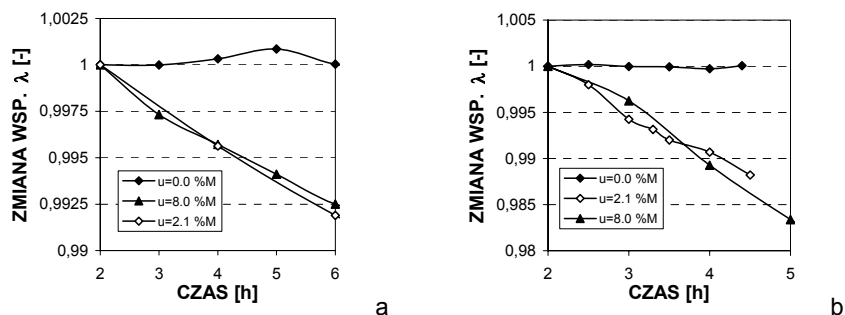
W celu sprawdzenia praktycznej przydatności metody stacjonarnej do badań zawilgoczonych materiałów budowlanych, a także eksperymentalnego zweryfikowania wniosków płynących z analiz numerycznych, wyznaczono wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla trzech odmian betonów komórkowych o gęstościach  $\rho \approx 400, 500$  i  $600 \text{ kg/m}^3$  i różnych zawartościach wilgoci. Badania przeprowadzono w Laboratorium Badań Materiałowych Oak Ridge National Laboratory w Oak Ridge (Tennessee), które jest jednym z wiodących ośrodków w Stanach Zjednoczonych zajmującymi się badaniami materiałów budowlanych, w tym termoizolacyjnych. Pomiary wykonano na aparacie płytowym typu LASER 300 na próbkach o wymiarach  $\sim 30 \text{ cm} \times \sim 30 \text{ cm} \times \sim 5 \text{ cm}$ , które po higroskopijnym zawilgoceniu do zadanego poziomu przez okres ok. 6-8 tygodni (do ustalenia się masy próbki) były izolowane folią polietylenową i przechowywane dodatkowo przez okres 1-2 tygodni do ustalenia się jednorodnego rozkładu wilgoci (także między pomiarami dla tego samego stanu zawilgocenia). Średnią zawartość wilgoci w próbkach określano na podstawie pomiarów masy próbek zawilgoczonych i wysuszonych do stałej masy. Podczas badań, prowadzonych dla różnicy temperatur płyt grzejnej i chłodzącej  $\Delta T \approx 5 \text{ K}$  lub  $\sim 10 \text{ K}$ , rejestrowano zmiany temperatury i wartości strumienia ciepła na powierzchni próbek przez okres ok. 4 - 6 godzin. Przykładowe wyniki pomiaru strumienia ciepła dla próbek AAC 400 w dwóch stanach zawilgocenia pokazano na Rys. 3. Jak widać strumień ciepła dla materiału zawilgoczonego maleje w miarę upływu czasu pomiaru, co potwierdza wyniki obliczeń numerycznych. Na Rys. 4 pokazano względne zmiany zmierzonych wartości współczynnika przewodzenia ciepła tego samego materiału dla dwóch wartości różnicy temperatur  $\Delta T$ , które jest także jakościowo zgodne z przewidywaniami symulacji komputerowych.

Na Rys. 5 pokazano, uzyskane z pomiarów, zależności współczynnika  $\lambda_m$  od masowej zawartości wilgoci dla trzech analizowanych odmian betonu komórkowego.



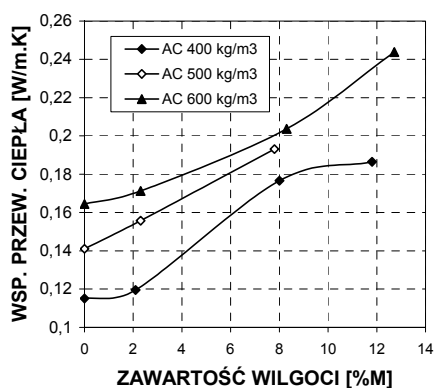
Rys.3. Wyniki pomiarów strumienia ciepła podczas badań aparatem płytowym betonu komórkowego o gęstości  $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$  o wilgotności: a) 0%M, b) 2.1%M ( $\varphi \approx 75\%$ ).

Fig.3. Results of heat flux measurements during heating plate apparatus tests for a cellular concrete with different moisture content: a) 0%M, b) 2.1%M ( $\varphi \approx 75\% \text{ RH}$ ).



Rys.4. Względne zmiany współczynnika przewodzenia ciepła betonu AAC 400 podczas pomiarów metodą stacjonarną dla różnicy temperatur: a)  $\Delta T \approx 5K$ , b)  $\Delta T \approx 9K$ .

Fig.4. Relative changes of thermal conductivity of the AAC 400 concrete during steady state test for temperature difference: a)  $\Delta T \approx 5K$ , b)  $\Delta T \approx 9K$ .



Rys.5. Wyniki pomiarów metodą stacjonarną współczynnika przewodzenia ciepła betonów komórkowych w różnych stanach zawilgocenia.

Fig.5. Results of thermal conductivity steady state tests for cellular concretes with different moisture content.

## 5. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione wyniki badań i obliczeń numerycznych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków dotyczących dokładności badań współczynnika  $\lambda$  wilgotnego betonu komórkowego w aparacie płytowym metodą stacjonarną:

1. Podczas badań materiałów zawierających wilgoć występują niestacjonarne zjawiska cieplno-wilgotnościowe, które prowadzą do redystrybucji wilgoci i zwiększenia mierzonego strumienia ciepła, co może być dodatkowym źródłem błędów pomiaru, zwłaszcza dla betonu komórkowego o niższej gęstości w zakresie wilgotności względnej powietrza od ok. 60% do ok. 90%.
2. Według przeprowadzonych analiz, błąd ten nie przekraczał 6% i 1.5% dla betonów

komórkowych o gęstościach, odpowiednio,  $\rho=400$  i  $600 \text{ kg/m}^3$ . W związku z tym, mimo nieustalonego charakteru przepływu ciepła, metodę stacjonarną można uznać za wystarczająco dokładną dla tego materiału w higroskopijnym stanie zawilgocenia.

3. Skracanie czasu pomiaru oraz zmniejszanie wartości gradientu temperatury w próbce na ogół nie prowadzi do poprawy dokładności pomiaru, a w pewnych sytuacjach może nawet ją pogarszać. Symulacje komputerowe mogą być przydatne przy wyborze właściwych warunków badania oraz ewentualnego korygowania ich wyników o błąd będący następstwem niestacjonarnych zjawisk ciepłno-wilgotnościowych w próbkach.
4. Przeprowadzone badania doświadczalne potwierdziły (co najmniej jakościowo) wyniki analiz numerycznych i pozwoliły na wyznaczenie współczynników przewodzenia ciepła betonów komórkowych o różnych gęstościach i zawartościach wilgoci. Jak należało oczekiwać, wartość tego współczynnika silnie rośnie wraz ze wzrostem zawartości wilgoci i dla wilgotności wynoszącej ok. 12%M jest ona wyższa o ok. 45% dla  $\rho=600 \text{ kg/m}^3$  i o ok. 65% dla  $\rho=400 \text{ kg/m}^3$  w stosunku do materiału suchego.

## LITERATURA

- [1] GAWIN D., *Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepłno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych*, Zeszyty naukowe PŁ, Nr 853, Łódź, 2000.
- [2] KONIORCZYK P., *Radiacyjno-kondukcyjna wymiana ciepła w ośrodkach o dużej grubości optycznej* (rozprawa habilitacyjna), WAT, Warszawa, 1999.
- [3] GAWIN D., JABŁOŃSKI M., WOJTATOWICZ T., ROŻNIAKOWSKI K., Wyniki badań własności termicznych wybranych materiałów budowlanych, *Mat. VII Konf. Nauk.-Techn. "Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce"*, 125-135, Łódź, 1999
- [4] GAWIN D., KOŚNY J., WILKES K., Thermal Conductivity of Moist Cellular Concrete – Experimental and Numerical Study, *Proc. 9th Int. Conf., Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX'* (CD), ASHRAE (ed.), 1-10, Clearwater (Florida), USA, 2004



Dr hab. inż. Dariusz Gawin, profesor w Katedrze Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych Politechniki Łódzkiej. Tematyka zainteresowań: modelowanie procesów wymiany masy i energii w budynku, higro-termo-chemo-mechanika i trwałość materiałów budowlanych. [gawindar@p.lodz.pl](mailto:gawindar@p.lodz.pl)



Dr inż. Jan Kośny, senior researcher w Oak Ridge National Laboratory, USA. Tematyka zainteresowań: badania doświadczalne właściwości termicznych elementów budowlanych i modelowanie wymiany energii w budynkach i przegrodach budowlanych. [kjo@ornl.gov](mailto:kjo@ornl.gov)



Dr inż. Kenneth Wilkes, distinguished researcher w Oak Ridge National Laboratory, USA. Tematyka zainteresowań: badania doświadczalne właściwości termicznych i wilgotnościowych materiałów budowlanych. [wilkeske@ornl.gov](mailto:wilkeske@ornl.gov)