ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Paweł KRAUSE*
Politechnika Śląska

# WSKAŹNIK HAMOWANIA PRZEPŁYWU CIEPŁA W ELEMENTACH BETONOWYCH O MAŁEJ MASYWNOŚCI

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę warunków dojrzewania betonu w osłonie termoizolacyjnej w oparciu o skorygowaną liczbę kryterialną Biota. Bazuje ona na zaproponowanym przez autora wskaźniku hamowania przepływu ciepła ($H_{PC}$), uzależnionym od oporu hamowania przepływu ciepła oraz masywności betonu. Wyznaczenie $H_{PC}$ wymagało przeprowadzenia badań eksperymentalnych w celu określenia optymalnego oporu cieplnego termoizolacji, zapewniającego warunki dojrzewania betonu zbliżone do normalnych.

# THE INDEX OF HEAT FLOW RESTRAIN IN SMALL MASSIVE CONCRETE UNITS

**Summary.** In the paper the analysis of concrete curing conditions under thermoinsulation cover, on the basis of corrected criterial Biot number, is presented. The number is based on the index of heat flow restrain ($H_{PC}$), proposed by author. The experimental research were carried out to get the index. Their main aim was to define the optimal thermal resistance of curing conditions of concrete similar to normal environment.

## 1. Wprowadzenie

Proces dojrzewania betonu zależy w istotny sposób od temperatury otoczenia. Podstawowe trudności stwarza obniżona temperatura środowiska zewnętrznego, powodując konieczność stosowania określonych zabiegów technologicznych lub w skrajnych przypadkach zaprzestania wykonywania monolitycznych robót betonowych. Istnieją zróżnicowane metody ograniczania wpływu niskiej temperatury otoczenia na warunki dojrzewania betonu. Większość stosowanych metod wiąże się z dostarczeniem dodatkowej energii cieplnej do dojrzewającego betonu. Dzieje się to w sytuacji, gdy sam beton jest źródłem ciepła, które należy umiejętnie wykorzystać. Istota zagadnienia dotyczy

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Janusz Szwabowski

energooszczędnego podejścia do rozpatrywanego zagadnienia, z uwzględnieniem specyfiki zjawisk zachodzących w okresie dojrzewania betonu. Ważne jest także zapewnienie korzystnych warunków dojrzewania betonu, z punktu widzenia zmienności temperatury w czasie. Można stwierdzić, że uwzględnienie postulatów dotyczących wykorzystania jedynie wewnętrznego źródła ciepła oraz zapewnienie zbliżonych warunków dojrzewania betonu w całej jego objętości będzie możliwe w przypadku układu izolowanego termicznie [5]. Wiąże się to z koniecznością zastosowania osłony termoizolacyjnej, zwiększającej opór cieplny pomiędzy betonem a otoczeniem.

## 2. Wymiana ciepła w układzie

Intensywność wymiany ciepła w przyjętym układzie *BIS* (Beton – Izolacja – Środowisko) analizowano w oparciu o liczbę kryterialną Biota. Stanowi ona bezwymiarowy zapis przewodzenia ciepła i jest kryterium podobieństwa warunków brzegowych III rodzaju [1,9].

$$-\lambda(grad\ t)_F = \alpha(t_F - t_e) \tag{1}$$

Po pomnożeniu obu stron równania (1) przez wymiar charakterystyczny $l_0$ oraz prowadzeniu przekształceń otrzymuje się zależność wyrażoną za pomocą liczby $B_i$

$$-l_0\ (grad\ t)_F = B_i\ (t_F - t_e) \tag{2}$$

Uwzględnia ona łączny wpływ trzech wielkości: współczynnika przejmowania ciepła, wymiaru charakterystycznego oraz współczynnika przewodzenia ciepła [1,3,4,10].

$$B_i = \frac{\alpha \cdot l_0}{\lambda} \tag{3}$$

gdzie:

$\alpha$ – współczynnik przejmowania ciepła,

$l_o$ – wymiar charakterystyczny obiektu badań,

$\lambda$ – współczynnik przewodzenia ciepła betonu.

Wymiar charakterystyczny modelowanego obiektu wyznacza się z warunku geometrycznego. W przypadku dojrzewającego betonu można go zapisać w postaci

$$l_0 = \frac{V}{F} = \frac{1}{M_p} \tag{4}$$

gdzie:

$V$ – objętość elementu,

$F$ – powierzchnia elementu,

$M_p$ – wskaźnik masywności.

Ze względu na występowanie w modelowanym układzie izolacji termicznej pomiędzy dojrzewającym betonem a środowiskiem zewnętrznym ulegają zmianom warunki wymiany ciepła na powierzchni ciała. Zaproponowano przyjęcie wielkości nazwanej jako opór hamowania przepływu ciepła $R_h$. Uwzględnia ona występowanie oporu przejmowania ciepła oraz oporu przewodzenia ciepła przez warstwę osłony termoizolacyjnej [8]

$$R_h = \frac{1}{\alpha} + \Sigma \frac{d_{oti}}{\lambda_{oti}} \tag{5}$$

gdzie:

$\alpha$ – współczynnik przejmowania ciepła,

$d_{oti}$ – grubość i-tej warstwy osłony termoizolacyjnej,

$\lambda_{oti}$ – współczynnik przewodzenia ciepła i-tej warstwy osłony termoizolacyjnej.

Na podstawie przeprowadzonych analiz [2,6,8] założono, że zmiana pozornego współczynnika przewodzenia ciepła dojrzewającego betonu odbywa się według zależności

$$\lambda_{pb} = \lambda_{sb}(2 - exp\ a\ \tau^b) \tag{6}$$

gdzie:

$a,b$ – wielkości zależne od rodzaju cementu,

$\lambda_{sb}$ – współczynnik przewodzenia ciepła stwardniałego betonu (2,0 W/mK),

$\tau$ – czas dojrzewania.

Po uwzględnieniu przyjętych założeń dla modelowanego układu BIS otrzymano skorygowaną liczbę kryterialną Biota

$$B_{ih} = \frac{1}{M_p R_h \lambda_{pb}}. \tag{7}$$

Ze względu na fakt, iż opór hamowania przepływu ciepła istotnie zależy od wskaźnika masywności elementu, przyjęto określenie iloczynu modułu powierzchniowego oraz oporu hamowania jako wskaźnika hamowania przepływu ciepła $H_{PC}$ [8]

$$H_{PC} = M_p \cdot R_h. \tag{8}$$

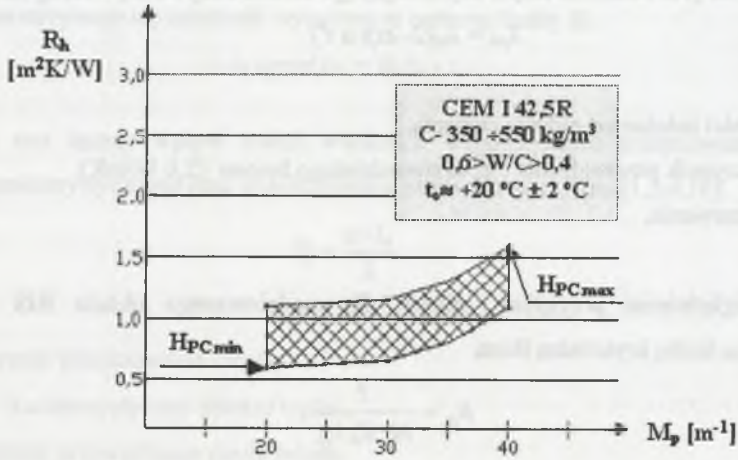
Wobec powyższego skorygowana liczba kryterialna Biota przyjmuje postać:

$$B_{ih} = \frac{l}{H_{PC}\lambda_{pb}}. \tag{9}$$

## 3. Wyniki badań eksperymentalnych

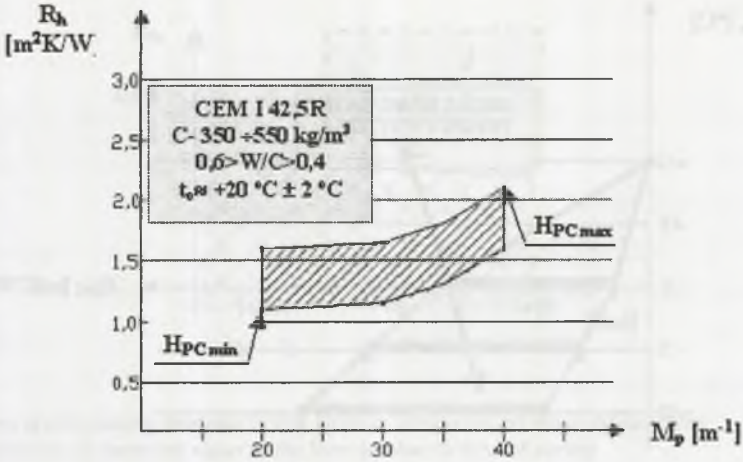
W celu wyznaczenia skorygowanej liczba kryterialnej Biota niezbędne było eksperymentalne wyznaczenie wskaźnika hamowania przepływu ciepła $H_{PC}$. Dla betonu dojrzewającego w niskich temperaturach otoczenia istotne jest określenie oporu hamowania przepływu ciepła, zapewniającego warunki wiązania i twardnienia zbliżone do normalnych. Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwiły określenie zależności pomiędzy $R_h$ i $M_p$ dla temperatury otoczenia wahającej się od ok. 0°C do –12°C [7,8]. Wskaźnik $H_{PC}$ wyznaczono dla betonu wykonanego na cemencie *CEM I 42,5R* w ilości nie mniejsze niż 350 kg/m$^3$. Temperatura początkowa betonu wynosiła 20°C.

Na podstawie uzyskanych wyników badań oraz ich metrologicznej i statystycznej analizy przedstawiono w postaci graficznej zależność wskaźnika masywności elementu betonowego od oporu hamowania – rys. 1-3 [8].



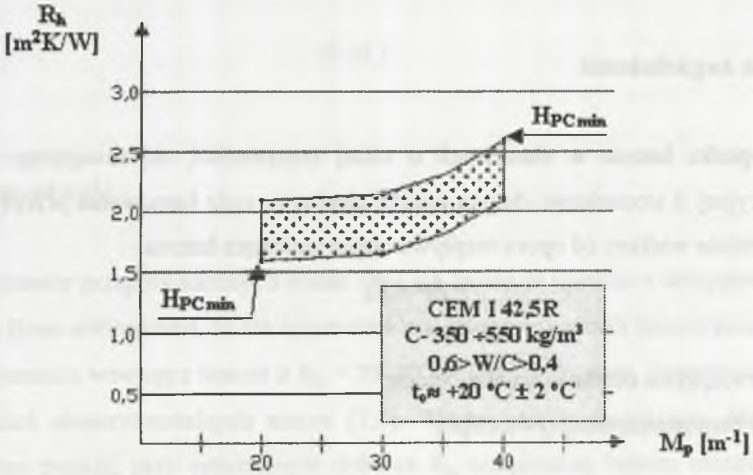

Rys. 1. Zależność oporu hamowania przepływu ciepła od wskaźnika masywności elementu betonowego dojrzewającego w temperaturze $t_e$ = -2°C ± 2°C

Fig. 1. Dependence of the resistance restrain of heat flow to the index of massive concrete unit curing at temperature $t_e$ = -2°C ± 2°C




Rys. 2. Zależność oporu hamowania przepływu ciepła od wskaźnika masywności elementu betonowego dojrzewającego w temperaturze $t_e$ = -6°C ± 2°C

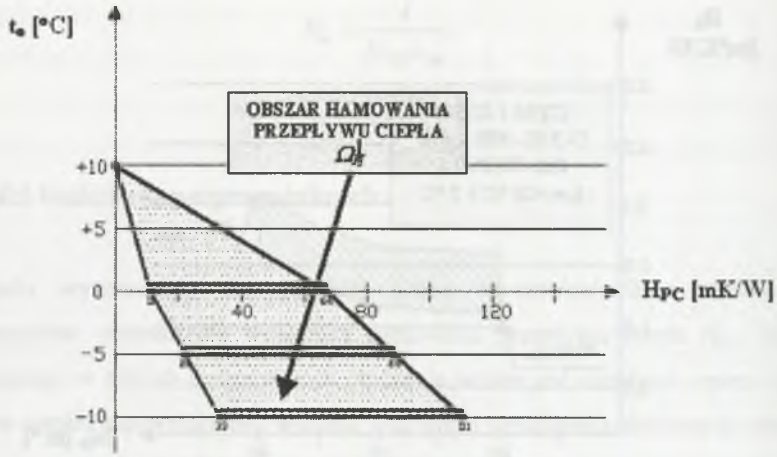
Fig. 2. Dependence of the resistance restrain of heat flow to the index of massive concrete unit curing at temperature $t_e$ = -6°C ± 2°C




Rys. 3. Zależność oporu hamowania przepływu ciepła od wskaźnika masywności elementu betonowego dojrzewającego w temperaturze $t_e$ = -10°C ± 2°C

Fig. 3. Dependence of the resistance restrain of heat flow to the index of massive concrete unit curing at temperature $t_e$ = -10°C ± 2°C

Analiza zależności oporu hamowania przepływu ciepła od modułu powierzchniowego betonu umożliwia określenie obszaru hamowania przepływu ciepła, gwarantującego zapewnienie warunków normalnych wiązania oraz warunków zbliżonych do normalnych twardnienia w pierwszej dobie dojrzewania – rys. 4.




Rys. 4. Obszar hamowania przepływu ciepła ΩH zapewniający warunki dojrzewania betonu zbliżone do normalnych w czasie 24 h od zaformowania
Fig. 4. The restrain area of heat flow for curing conditions of concrete similar to normal environment after 24 hour after moulding

## 4. Analiza zagadnienia

W przypadku betonu w elementach o małej masywności, dojrzewającego w osłonie termoizolacyjnej o stosunkowo dużym oporze cieplnym, opór hamowania przepływu ciepła jest wielokrotnie większy od oporu rozpływu ciepła wewnątrz betonu.

$$R_b << R_h \tag{10}$$

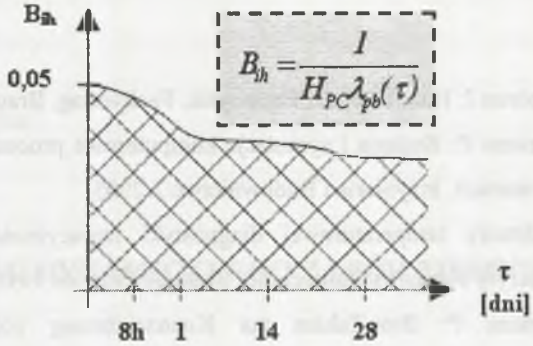
gdzie:

$R_b$ – opór rozpływu ciepła wewnątrz betonu,

$R_h$ – opór hamowania przepływu ciepła.

Związane jest to ze zjawiskiem, iż dopływające do powierzchni osłony termoizolacyjnej ciepło napotyka na duży opór cieplny $R_{ot}$ przy relatywnie małym oporze odpływu ciepła od powierzchni $R_\alpha$ oraz rozpływu wewnątrz betonu $R_b$. Dzięki temu ciepło rozchodzi się z łatwością wokół ciała, nie dopuszczając do istnienia dużych gradientów temperatury.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano obszar zmienności skorygowanej liczby kryterialnej Biota $B_{ih}$ dla betonu w elementach o małej masywności dojrzewających w warunkach obniżonych temperatur otoczenia.




Rys. 5. Zakres skorygowanej wartości liczby Biota w zależności od czasu dojrzewania
Fig. 5. Dependence of corrected value of the Biot number to time of curing

Przyjmowane wartości skorygowanej liczby kryterialnej Biota dla betonu w analizowanych elementach o małej masywności nie przekraczały $B_{ih} = 0{,}05$. Wyniki analiz wskazują, iż w rozpatrywanym układzie *BIS* spełniony jest warunek dla małych liczb Biota [1,3,9,10].

$$B_i < 0{,}1 \tag{11}$$

## 5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz ich analiz w oparciu o skorygowaną liczbę kryterialną Biota stwierdzono, że dla optymalnie przyjętego wskaźnika hamowania przepływu ciepła temperatura wewnątrz betonu o $M_p = 20 \div 40$ m$^{-1}$ jest wyrównana. Potwierdziły to także wyniki badań eksperymentalnych autora [7,8]. W związku z powyższym dla każdego pomiarowego punktu, przy optymalnym doborze $R_h$, temperaturę betonu można traktować jedynie jako funkcję czasu $\tau$. Pozwala to na uproszczenie modelu zjawiska już na etapie jego formułowania. Założenie jednorodności rozkładu temperatury dla małych liczb Biota stanowi dobre przybliżenie nieustalonej wymiany ciepła, o błędzie nie przekraczającym *5%* w porównaniu z obliczeniami dokładnymi [1,9].

LITERATURA

1. Bobran H.W., Bobran J: Handbuch der Bauphysik. Fachverlag, Braunschweig1990.
2. Klemczak B., Krause P: Badania i symulacje komputerowe procesu twardnienia betonu w niskich temperaturach. Inżynieria i Budownictwo 2/2005.
3. Krause H.: Podstawy temperaturowej diagnostyki izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993.
4. Krause H., Krause P: Biot-Zahlen zur Kennzeichnung von Temperaturfeldern in Aussenbauteilen. Bauphysik Heft 5, 2002.
5. Krause P: Egzotermia mieszanki betonowej w osłonie termoizolacyjnej. III Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice-Wisła 2002.
6. Krause P: Charakterystyki termiczne twardniejącego betonu. IV Konferencja Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice-Wisła 2003.
7. Krause P.: Temperatury twardnienia betonu w osłonach termoizolacyjnych w warunkach zimowych. V Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice - Wisła 2004.
8. Krause P.: Wpływ oporu cieplnego osłony termoizolacyjnej na warunki dojrzewania betonu w niskich temperaturach otoczenia. Rozprawa doktorska. Maszynopis. Gliwice 2005.
9. Taler J., Duda P.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. WNT, Warszawa 2003.
10. Wiśniewski S., Wisniewski T.: Wymiana ciepła. WNT, Warszawa 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Klemm