

## **WPLYW SOLI NA EFEKTYWNA PRZEWODNOŚĆ CIEPLNA ŚCIAN BUDOWLI ZABYTKOWYCH**

Jerzy WYRWAŁ  
Politechnika Opolska, Opole

### **1. Wprowadzenie**

Większość ścian budowli zabytkowych wykazuje objawy nadmiernego zawilgocenia spowodowanego brakiem odpowiednich izolacji przeciwwodnych i przeciwwilgociowych. Jedną z głównych przyczyn zniszczeń ścian takich budowli są higroskopijne sole rozpuszczalne w wodzie (głównie chlorki, azotany i siarczki). Szkodliwy wpływ tych związków chemicznych na budowlę zwiększa się wraz ze zwiększaniem się ich ilości w wodzie zawartej w ścianach. Z uwagi na dobrą rozpuszczalność w wodzie, sole wnikać do ściany rozkładają się równomiernie po jej grubości. Na skutek sezonowych zmian zawilgocenia ścian budowli zabytkowych, z zawartych w ich porach roztworów solnych (o przewodności cieplnej niższej, niż przewodność cieplna wody) wytrącają się kryształy soli, które charakteryzują się przewodnością cieplną znacznie większą od przewodności cieplnej szkieletu ściany. Warto jednak zaznaczyć, że chociaż sole mogą istotnie podnosić przewodność cieplną wypełnionego nimi materiału porowatego, to wpływ ich roztworów wodnych na tę jego cechę jest bardziej złożony. W badaniach zawilgoconych i zasolonych materiałów ściennych stwierdzono zarówno podwyższenie wartości współczynnika przewodności cieplnej, jak również jego obniżenie [1].

Zasolone i zawilgocone ściany powodują zwiększanie się strat ciepła ze stykających się z nimi pomieszczeń i pogorszenie w nich warunków higieniczno-sanitarnych. Zapewnienie prawidłowych warunków eksploatacji takich pomieszczeń wymaga przyjmowania prawidłowych wartości efektywnej przewodności cieplnej zawilgoconych ścian z uwzględnieniem zawartych w ich porach soli i ich roztworów.

W niniejszej pracy omówiono wpływ zasolenia na przewodność cieplną materiałów porowatych (wykorzystując nieliczne, dostępne w literaturze prace z tego zakresu) i zaproponowano uogólnienie znanej z literatury formuły MAXWELLA-EUCKENA – dobrze modelującej współczynnik efektywnego przewodzenia ciepła w zawilgoconych materiałach budowlanych – na przypadek materiałów zawilgoconych i zasolonych; bardzo często spotykanych w ścianach budowli zabytkowych.

### **2. Wpływ soli i ich roztworów na przewodność cieplną materiałów porowatych**

Przewodność cieplna materiałów porowatych zawierających kryształy soli jest wyższa od materiałów nie zawierających soli. Wynika to z wysokiej przewodności cieplnej soli; np. w przypadku chlorku sodu, NaCl, o temperaturze 16 °C, wynosi ona 6.5 W/(mK). Natomiast

przewodność cieplna materiałów zawilgoconych wodnymi roztworami soli jest niższa od przewodności cieplnej materiałów zawilgoconych czystą wodą, przy takiej samej koncentracji objętościowej obu cieczy w materiale. Wynika to z obniżania się przewodności cieplnej wodnych roztworów soli wraz ze zwiększaniem się ich stężenia. Na przykład, względną przewodność cieplną wodnego roztworu chlorku sodu o temperaturze 20 °C (odniesioną do przewodności cieplnej czystej wody) w funkcji jego stężenia masowego można obliczyć ze wzoru [2]

$$k_{NaCl}(C_{NaCl}, k_W) = f(C_{NaCl})k_W, \quad (1)$$

gdzie

$$f(C_{NaCl}) = 1 - 2.1857 \cdot 10^{-3} C_{NaCl} + 1.0248 \cdot 10^{-5} C_{NaCl}^2. \quad (2)$$

Powyższa zależność może być wykorzystana przy stężeniu roztworu chlorku sodu w przedziale od 5%M do 25%M.

Przykładowe wartości względnej przewodności cieplnej roztworów wodnych chlorku sodu, a także chlorku wapnia,  $CaCl_2$ , i siarczanu sodowego,  $Na_2SO_4$ , w funkcji ich stężenia molowego i masowego zawiera tablica 1.

Tablica 1. Względna przewodność cieplna wodnych roztworów soli w temperaturze 25 °C wg [3,4]

Stężenie roztworu soli		$k_{CaCl_2}/k_W$	$k_{NaCl}/k_W$	$k_{Na_2SO_4}/k_W$
[mol/kg]	[%M]			
0.0	0.00	1.000	1.000	1.000
1.0	5.85	0.983	0.994	0.998
1.5	8.78	0.975	0.989	0.997
2.0	11.70	0.968	0.985	–
3.0	17.55	0.954	0.976	–
4.0	23.40	0.943	0.968	–
5.0	29.30	–	0.961	–
6.0	35.10	–	0.956	–

Z badań przeprowadzonych w przypadku takich gruntów, jak glina i piasek, nasyconych roztworami wybranych soli (chlorku wapnia, chlorku magnezu,  $MgCl_2$ , chlorku sodu, siarczanu sodowego), wynika, że ich przewodność cieplna – w porównaniu z gruntami nasyconymi czystą wodą – maleje nawet o 20% w przypadku nasycenia roztworem soli o stężeniu 1 mol/kg [5].

Wyniki podobnych badań przeprowadzonych na próbkach piasku i piasku gliniastego, zawilgoconych wodnymi roztworami chlorku sodu i chlorku wapnia, o koncentracji objętościowej od 0.03 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> do 0.12 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, w przypadku piasku, i 0.09 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> do 0.30 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, w przypadku piasku gliniastego, przedstawiają tablice 2 i 3 [6]. Przyczyn dużego obniżenia się przewodności cieplnej tych materiałów przy zwiększaniu się stężenia roztworów soli (znacznie większego, niż wynikałoby to z danych zawartych w tablicy 1) autorzy upatrują w zmianach mikrostruktury gruntu spowodowanych jego zasoleniem i interakcją układu roztwór-szkielet materiału.

### 3. Modelowanie efektywnej przewodności cieplnej zasolonych materiałów porowatych

Jednym ze sposobów oszacowania stopnia wpływu zawilgocenia i zasolenia materiału na jego efektywną przewodność cieplną jest modelowanie matematyczne. W literaturze można znaleźć wiele postaci analitycznych modeli efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła zawilgoconych materiałów porowatych. Przegląd i omówienia najczęściej spotykanych modeli można znaleźć w [7], zaś ich analizę i weryfikację w przypadku kilku wybranych materiałów budowlanych zawiera [8].

Tablica 2. Przewodność cieplna gruntu w funkcji stężenia wodnego roztworu chlorku wapnia,  $\text{CaCl}_2$ , wg [6]

Stężenie roztworu soli [kg/kg]	Przewodność cieplna [W/(mK)]	
	piasek	piasek gliniasty
0.010	1.10	0.57
0.015	0.91	0.52
0.020	0.89	0.47
0.025	0.87	0.45
0.030	0.83	0.42

Tablica 3. Przewodność cieplna gruntu w funkcji stężenia wodnego roztworu chlorku sodu,  $\text{NaCl}$ , wg [6]

Stężenie roztworu soli [kg/kg]	Przewodność cieplna [W/(mK)]	
	piasek	piasek gliniasty
0.01	1.16	0.59
0.03	0.99	0.54
0.05	0.94	0.51
0.07	0.91	0.48
0.09	0.88	0.46

Modelując efektywną przewodność cieplną zawilgoconych i zasolonych materiałów porowatych należy wziąć pod uwagę następujące czynniki na nią wpływające [1, 7]:

- 1) właściwości szkieletu materiału (gęstość, porowatość, koncentracja objętościowa, współczynnik przewodzenia ciepła),
- 2) właściwości kryształów soli zawartych w materiale (rodzaj, gęstość, współczynnik przewodzenia ciepła, rozpuszczalność i higroskopijność),
- 3) właściwości roztworów soli zawartych w materiale (rodzaj, gęstość, współczynnik przewodzenia ciepła, stężenie, ciśnienie pary wodnej nad powierzchnią roztworu nasyconego i rozcieńczonego, higroskopijność, ciepło parowania wody),
- 4) właściwości wody i suchego powietrza wypełniających pory materiału (współczynnik przewodzenia ciepła, podciąganie kapilarne wody, dyfuzja pary wodnej),
- 5) zawartość soli i zawilgocenie materiału (koncentracje soli, wody i suchego powietrza).

Ponieważ uwzględnienie tych wszystkich czynników w analitycznym modelu przewodności cieplnej jest praktycznie niemożliwe, to w ujęciu fenomenologicznym uwzględnia się tylko wybrane z nich. I tak, modelując efektywną przewodność cieplną zawilgoconych materiałów porowatych najczęściej przyjmuje się, że przewodność ta jest

funkcją koncentracji objętościowych poszczególnych faz materiału porowatego, czyli szkieletu, wody i suchego powietrza,  $w_S, w_W, w_A$ , oraz ich przewodności cieplnych,  $k_S, k_W, k_A$ , [7]. W takim przypadku efektywną przewodność cieplną materiału porowatego można przedstawić w postaci

$$k_{eff} = k_{eff}(w_S, w_W, w_A; k_S, k_W, k_A), \quad (3)$$

skąd, po uwzględnieniu relacji łączących koncentracje objętościowe faz materiału z jego porowatością  $\epsilon$

$$w_S = 1 - \epsilon, \quad w_A = \epsilon - w_W, \quad (4)$$

dostajemy zależność

$$k_{eff} = k_{eff}(w, \epsilon; k_S, k_W, k_A), \quad w \in [0, \epsilon]. \quad (5)$$

gdzie  $w \equiv w_W$ . Różne postacie zaczerpniętych z literatury analitycznych postaci powyższej funkcji można znaleźć np. w [7] i [8].

W przypadku zawilgoconych i zasolonych materiałów porowatych, z których wykonane są ściany budowli zabytkowych, można przyjąć, że szereg fizyczno-chemicznych cech kryształów i roztworów soli w nich zawartych jest ustabilizowana [1]. Dlatego w dalszych rozważaniach założono, że wpływ roztworu soli rodzaju  $R$  na przewodność cieplną takich materiałów zależy od jego koncentracji objętościowej  $w_R$  oraz przewodności cieplnej  $k_R$ , przy czym ta ostatnia powiązana jest ze stężeniem roztworu  $c_R$  i przewodnością cieplną wody zależnością analogiczną do związku (1), a mianowicie

$$k_R(c_R, k_W) = f(c_R)k_W. \quad (6)$$

Uogólniając zatem zależność (5) na przypadek zawilgoconych i zasolonych materiałów porowatych, przy wykorzystaniu relacji (6), można przedstawić ją w postaci

$$k_{eff} = k_{eff}[w_R, \epsilon; k_S, f(c_R)k_W, k_A], \quad w_R \in [0, \epsilon]. \quad (7)$$

Powyzsza funkcja osiąga wartość maksymalną (najbardziej niekorzystną) w przypadku, gdy pory materiału są wypełnione roztworem. W takim przypadku  $w_R \equiv \epsilon$  i w konsekwencji zależność (7) przyjmuje ostateczną postać

$$k_{eff} = k_{eff}[\epsilon; k_S, f(c_R)k_W] \quad (8)$$

która pozwala wykorzystać szereg znanych z literatury modeli efektywnej przewodności cieplnej dwufazowych ośrodków porowatych.

Z przeprowadzonych w [8] analiz i weryfikacji wynika, że w przypadku rozpatrywanych tam w pełni zawilgoconych materiałów budowlanych (ośrodki dwufazowe) dobrze "przewiduje" ich efektywną przewodność cieplną model MAXWELLA-EUCKENA (*ME*).

Wykorzystując zależność (8) można ten model uogólnić, zapisując go w następującej postaci:

$$k_{eff}^{ME} = f(c_R)k_W \frac{3 + 2(1 - \epsilon) \left( \frac{k_S}{f(c_R)k_W} - 1 \right)}{3 + (1 - \epsilon) \left( \frac{f(c_R)k_W}{k_S} - 1 \right)}, \quad (9)$$

przydatnej do obliczenia strat ciepła przez ściany budowli zabytkowych zbudowanych z materiałów, których pory wypełnione są roztworami soli.

W tabelicy 4 przedstawiono wartości efektywnego współczynnika przewodności cieplnej zaprawy cementowej i betonu, nasyconych roztworem chlorku sodu, obliczone przy wykorzystaniu zależności (2) i (9). Do obliczeń przyjęto  $k_W = 0,608$  W/(mK), zaś wartości  $\epsilon$  i  $k_S$  zaczerpnięto z pracy [9].

Tablica 4. Przewodność cieplna materiałów budowlanych w funkcji stężenia wodnego roztworu chlorku sodu, NaCl

Stężenie roztworu soli [kg/kg]	Efektywna przewodność cieplna [W/(mK)]	
	zaprawa cementowa $\epsilon = 0.23, k_S = 3.43$	beton $\epsilon = 0.17, k_S = 4.52$
0.00	2.61	3.65
0.06	2.60	3.64
0.12	2.60	3.64
0.24	2.59	3.63

Z powyższej tabelicy wynika, że chlorek sodu zawarty w roztworze wypełniającym pory rozpatrywanych materiałów, nawet przy wysokim jego stężeniu, w znikomym stopniu zmienia ich przewodność cieplną wyznaczoną z modelu *ME*. Gdyby jednak z roztworu tego wytraściły się kryształy soli (o przewodności cieplnej  $k_{NaCl} = 6.5$  W/(mK)) i wypełniły pory materiału (przypadek raczej mało prawdopodobny w warunkach realnych), to przewodność cieplna zaprawy wzrosłaby do wartości  $k_{eff} = 4.0$  W/(mK), zaś betonu do wartości  $k_{eff} = 4.8$  W/(mK).

#### 4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych w pracy analiz wpływu wybranych soli i ich roztworów wodnych na przewodność cieplną zasolonych i zawiłgoconych materiałów porowatych – przy wykorzystaniu uogólnionego modelu MAXWELLA-EUCKENA – wynika, że wodne roztwory soli zawartych w takich materiałach w znikomym stopniu zmieniają ich przewodność cieplną. Zupełnie inna sytuacja występuje w przypadku soli wykrystalizowanych w porach, gdyż zwiększając przewodność cieplną wypełnionych nimi materiałów w stopniu znaczącym, w takim samym stopniu mogą zwiększyć straty ciepła z pomieszczeń budowli zabytkowych.

## Oznaczenia symboli

- $c$  – stężenie roztworu soli, concentration of salt solution, [kg/kg],
- $C$  – stężenie roztworu soli, concentration of salt solution, [%M=100%kg/kg],
- $k$  – współczynnik przewodności cieplnej, heat conduction coefficient, [W/(mK)],
- $w$  – koncentracja objętościowa, volume concentration, [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>],
- $\epsilon$  – porowatość, porosity [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].

Indeksy dolne (subscripts)

- $eff$  – efektywny, effective,
- $S$  – szkielet, skeleton,
- $W$  – woda, water,
- $R$  – roztwór soli, salt solution.

## Literatura

- [1] Jezierski W., Kosior-Kazberuk M.: Współczynnik przewodzenia ciepła zasolonych materiałów ściennych, Przegląd Budowlany, 6, 2008, 38-41.
- [2] Yusufova V. D., Pepinov R. I., Nikolaev V. A., Guseinov G. M.: Thermal conductivity of aqueous solutions of NaCl, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 29, 4, 1975, 1225-1229.
- [3] Jamieson D.T., Irving J.B., Tudhope J.S.: Liquid thermal conductivity, National Engineering Laboratory, Edinburgh 1975.
- [4] Ozbek H., Philips S.L.: Thermal conductivity of aqueous NaCl solutions from 20 C to 330 C, LBL 9086, Department of Energy, University of California 1979.
- [5] Noborio K., McInnes K. J.: Thermal conductivity of salt-affected soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 1993, 329-334.
- [6] Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C.: Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter, Soil Sci. Soc. Am. J., 64, 2000, 1285-1290.
- [7] Wyrwał J., Marynowicz A., Świrska J.: Wybrane modele efektywnej przewodności cieplnej porowatych materiałów budowlanych I: przegląd. Roczniki Inżynierii Budowlanej, Komisja Inżynierii Budowlanej Oddziału PAN w Katowicach, 7, 2007, 135-140.
- [8] Wyrwał J., Marynowicz A., Świrska J.: Effective thermal conductivity of porous building materials – analysis and verifications. Baufizik, 30, 6, 2008, 431-433.
- [9] Khan M.I.: Factor affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models, Building and Environment, 37, 2002, 607-614.

## THE INFLUENCE OF SALT ON EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF MONUMENTAL BUILDING WALLS

### Summary

Modeling energy transfer in salt-affected monumental building walls requires knowledge of heat, salt, and water interaction. Effective thermal conductivity is a very important parameter in the thermal performance analysis of building walls. In this paper the effect of soluble salts on the effective thermal conductivity of porous materials is investigated and the MAXWELL-EUCKEN model is evaluated.

