

# Modelowanie procesu przewodzenia ciepła w zasolonych materiałach ściennych

Prof. dr hab. inż. Valeriy Ezerskiy, dr inż. Marta Kosior-Kazberuk, Politechnika Białostocka

W nr 6/2008 „Przeglądu Budowlanego” opublikowano artykuł Autorów, dotyczący współczynnika przewodzenia ciepła zasolonych materiałów ściennych, w którym zaproponowano określenie wartości obliczeniowych tego współczynnika za pomocą wskaźników poprawkowych uzyskanych metodą podziału soli na grupy na podstawie stopnia ich wpływu na przewodność cieplną materiału. We wspomnianym artykule nie podano opisu modelowania procesu przewodzenia ciepła. Ze względu na żywe zainteresowanie Czytelników tematem, w niniejszej pracy, Autorzy prezentują zasady opracowania modelu matematycznego przewodności cieplnej materiału kapilarno-porowatego zawierającego wilgoć i sole.

## 1. Wprowadzenie

Przyczyną gromadzenia się soli w ścianach zewnętrznych obiektów murowanych może być oddziaływanie wód gruntowych, pyłów przemysłowych, opadów atmosferycznych, a także materiałów uzupełniających braki rodzimego materiału muru. W większości przypadków, największy wpływ mają zmineralizowane wody gruntowe przenikające w części nadziemne budynków w wyniku zniszczenia izolacji przeciwwilgociowej pomiędzy fundamentem a ścianą [1–3]. W efekcie, w głąb materiału ściany przedostają się łatwo roz-

puszczalne sole, takie jak NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub> i inne. Nawet przy braku widocznych poważnych zniszczeń ścian zewnętrznych średnia zawartość soli w murze z cegły nierzadko stanowi 3–4% (wagowo), a w warstwach zewnętrznych – kilkakrotnie więcej. Sole mogą występować w postaci roztworu lub w stanie stałym.

Obecność soli w porach powoduje istotne zmiany charakterystyk cieplnych materiału ściennego, a przede wszystkim wartości współczynnika przewodzenia ciepła [4–6]. Przy opracowaniu projektów restauracji i rekonstrukcji obiektów, rozwiązanie takich problemów jak poprawa stanu wilgotnościowego i ocieplenie dodatkowe ścian wymaga informacji o zmianach przewodności cieplnej materiału w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Przyjmując, że przewodność cieplna roztworów wodnych większości soli jest mniejsza, a przewodność cieplna kryształów soli jest 10–20-krotnie większa od przewodności cieplnej czystej wody, można przypuszczać, że wpływ soli na przewodność cieplną materiału ściennego jest złożony i zależy od rodzaju soli oraz jej stanu skupienia.

W pracy przedstawiono opis modelu matematycznego przewodności cieplnej zawilgoconego muru zawierającego sole, a także wyniki badania zmian współczynnika przewodzenia ciepła zawilgo-

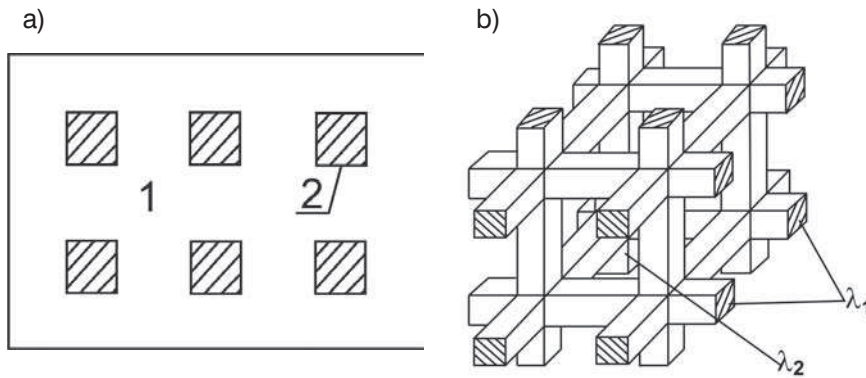
conej cegły ceramicznej oraz muru ceglanego zawierających pospolitą sól NaCl, przeprowadzonych przy wykorzystaniu modelu.

Zastosowanie modelowania matematycznego pozwala uwzględnić realną strukturę zasolonego materiału ściennego, wymaga mniejszych nakładów finansowych i czasu w porównaniu do podejścia eksperymentalnego. Oprócz tego, proponowana metoda pozwala uniknąć niedokładności, które mają miejsce przy eksperymentalnym określaniu współczynnika przewodzenia ciepła związanych z niekontrolowanymi migracjami roztworów i zmianami stanu skupienia soli w trakcie przygotowania i badania próbek.

## 2. Podstawy teoretyczne modelowania przewodności cieplnej zasolonych materiałów ściennych

W najbardziej złożonych warunkach eksploatacji przegród budowlanych w materiale ściennym może znajdować się roztwór wodny soli, mieszanina pary wodnej i powietrza oraz kryształy soli [7, 8].

Materiały ścienne i wodne roztwory soli będące ciałami heterogenicznymi różnią się między sobą strukturą. Według Dulniewa [9], twarde materiały kompozytowe (cegła, beton) mają strukturę z zamkniętymi wtrąceniami jednego materiału w drugim. Natomiast roztwory soli, wg tej samej klasyfikacji, mają



**Rys. 1.** Modele systemów heterogenicznych: a) struktura z wtrąceniami: 1 – składnik ciągły, 2 – wtrącenia; b) struktura ze składnikami wzajemnie przenikającymi się

strukturę o wzajemnie przenikających się składnikach.

Badając przewodność cieplną układów, ich chaotyczną strukturę zastępuje się uporządkowanym modelem, który powinien wyrażać podstawowe właściwości geometryczne rozpatrywanej struktury, a także uwzględniać wszystkie czynniki wpływające na proces przenoszenia ciepła. W dowolnej uporządkowanej strukturze można wyróżnić element podstawowy, którego powtarzanie pozwala utworzyć całą objętość struktury wyjściowej (rys. 1). Po obliczeniu efektywnej przewodności cieplnej elementu podstawowego, jej wartość można rozszerzyć na całą uporządkowaną strukturę.

Ścisłe sformułowanie problemu określenia efektywnej przewodności cieplnej układu sprowadza się do analizy pola temperaturowego występującego w systemie ciał i wymaga rozwiązania złożonych układów równań. W tym celu powszechnie stosuje się zasadę uogólnionego przewodzenia, bazującą na analogii pomiędzy równaniami różniczkowymi stacjonarnego strumienia ciepła, prądu elektrycznego, indukcji elektrycznej i magnetycznej czy ruchu masy. Na podstawie tej zasady autorzy prac [9–11] otrzymali przybliżone wyrażenia określające efektywną przewodność cieplną systemów dwuskładnikowych o zróżnicowanej strukturze.

Po analizie i ocenie przybliżonych zależności opracowanych przez

różnych badaczy, Autorzy wybrali i przedstawili tylko te z nich, które charakteryzują się dużą dokładnością oceny opisywanego zjawiska. Te zależności zostały wykorzystane do opracowania modelu przewodzenia ciepła zasolonego materiału.

Współczynnik przewodzenia ciepła materiału z zamkniętymi wtrąceniami można obliczyć wg wzorów przedstawionych w pracach [9, 10]:

$$\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_u) \quad (1)$$

$$\lambda_a = \frac{\lambda_1 \left[ 1 - (1 - \nu) \left( 1 - \sqrt[3]{m_2^2} \right) \cdot \sqrt[3]{m_2} \right]}{1 - (1 - \nu) \cdot \sqrt[3]{m_2^2}} \quad (2)$$

$$\lambda_u = \frac{\lambda_1 \left[ \nu + (1 - \nu) \cdot \sqrt[3]{m_2^2} \right]}{\nu + (1 - \nu) \left( 1 - \sqrt[3]{m_2^2} \right) \cdot \sqrt[3]{m_2^2}} \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda_a, \lambda_u$  – efektywne przewodności cieplne systemu, odpowiednio przy adiabatycznym i izotermicznym przecięciu elementu podstawowego,

$\lambda_1, \lambda_2$  – współczynniki przewodzenia ciepła, odpowiednio składnika ciągłego i składnika rozproszonego, przy czym  $\nu = \lambda_1/\lambda_2$

$m_2$  – stężenie objętościowe składnika rozproszonego.  
Do obliczeń efektywnej przewodności cieplnej dwuskładnikowej twardej mieszaniny z zamkniętymi wtrąceniami proponuje się zależ-

ność, zaczerpniętą z pracy [11], która zapewnia wysoką dokładność zarówno przy małej, jak i dużej koncentracji wtrąceń,

$$\lambda = \lambda_1 \left[ 1 - \frac{m_2}{\frac{1}{1 - \vartheta} - \frac{1 - m_2}{3}} \right] \quad (4),$$

gdzie  $\vartheta = \lambda_2/\lambda_1$ .

Efektywną przewodność cieplną materiału zawierającego dwa wzajemnie przenikające się składniki, przy  $\vartheta > 0$ , można z wystarczającą dokładnością ocenić wg wzoru cytowanego w pracy [9]:

$$\lambda_a = \lambda_1 \left[ c^2 + \vartheta(1 - c)^2 + \frac{2\vartheta c(1 - c)}{1 - c + \vartheta c} \right] \quad (5)$$

gdzie:

$c$  – funkcja porowatości, którą oblicza się wg wzoru:

$$c = 0,5 + A \cos(\varphi/3),$$

$$270^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ,$$

$$\text{dla } m_2 \leq 0,5, A = -1,$$

$$\varphi = \arccos(1 - 2m_2),$$

$$\text{dla } 0,5 < m_2 \leq 1, A = 1,$$

$$\varphi = \arccos(2m_2 - 1),$$

$\lambda_1, \lambda_2$  – współczynniki przewodzenia ciepła, odpowiednio pierwszego i drugiego komponentu,

$m_2$  – stężenie objętościowe składnika.

Przedstawione wzory pozwalają również obliczyć efektywną przewodność cieplną mieszaniny składającej się z trzech i więcej składników. W tym przypadku strukturę mieszaniny wieloskładnikowej kolejno sprowadza się do struktury dwuskładnikowej. Kolejność uwzględniania wtrąceń może być dowolna. Jednakże, przestawienie numeracji indeksów elementu podstawowego i wtrąceń we wzorach (2), (3), (4) jest niedopuszczalne ze względu na geometryczne różnice komponentów.

Przewodność cieplną roztworów solnych można najdokładniej określić stosując prawo cieplne mieszaniny dwóch cieczy: rozpuszczalnika (wody) i hipotetycznego roztworu soli o 100% stężeniu. Strukturę takiego układu można przedstawić w postaci modelu o składnikach przenikających się wzajemnie.

Zmienioną przewodność cieplną soli w hipotetycznym roztworze  $\lambda_u$  można określić wg wzoru [10]:

$$\lambda_u = 9,3 \cdot 10^{-2} \cdot p \sqrt{\rho \cdot T_{st}} (M)^{-5} \quad (6)$$

gdzie:

$M$  – masa molekuly soli,

$P$  – liczba atomów w molekule soli,

$T_{st}$  – temperatura topnienia soli, K

$\rho$  – gęstość soli, kg/m<sup>3</sup>.

Mając wartość  $\lambda_u$ , określoną na podstawie wzoru (6), można obliczyć przewodność cieplną roztworu  $\lambda_r$  dowolnej soli w dowolnym rozpuszczalniku o przewodności  $\lambda_s$ , stosując wzór (5).

Obecność wilgoci lub roztworów wodnych soli w przestrzeni porowej materiałów ściennych znacznie komplikuje proces przewodzenia ciepła. Para wodna znajdująca się w porach materiału, przekazuje ciepło przez dyfuzję od cieplej do chłodniejszej powierzchni elementu. Przy czym, na chłodniejszej powierzchni odbywa się kondensacja wilgoci z wydzielaniem ilości ciepła równej ciepłu wytworzenia pary wodnej. Współczynnik przewodzenia ciepła mieszaniny powietrza i pary  $\lambda_{pw}$  w porach materiału można określić wg wzoru [10]:

$$\lambda_{pw} = \lambda_o + d_t (c_1 - c_2) \cdot q_t \quad (7)$$

gdzie:

$\lambda_o$  – współczynnik przewodzenia ciepła suchego powietrza, W/(m<sup>2</sup>K),

$d_t$  – współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu o temperaturze  $t$ , m<sup>2</sup>/s,

$\Delta c = (c_1 - c_2)$  – różnica stężeń pary wodnej w powietrzu przy gradiencie temperatury 1K,

$q_t$  – ciepło parowania wody w temperaturze  $t$ , J/kg.

Obecność roztworu soli w porach materiału powoduje zmianę składowej dyfuzyjnej strumienia ciepła, ponieważ sole, obniżając prężność pary wodnej, wpływają na różnicę stężenia pary wodnej

$\Delta c$ . Intensywność tego wpływu zależy od rodzaju soli oraz stężenia roztworu. Największy wpływ na  $\Delta c$  wykazują roztwory nasycone. Zmianę  $\Delta c$ , w tym przypadku, można przyjąć jako proporcjonalną do punktu higroskopijności roztworu nasyconego soli  $\varphi_r^n$ .

Sole mają również wpływ na ciepło parowania wody z roztworów. Ciepło parowania jednego mola wody z roztworu  $\Delta H_r$ , kJ/mol w danej temperaturze można wyznaczyć ze wzoru:

$$\Delta H_r = \Delta H_w + \frac{\Delta h_2 - \Delta h_1}{n} \quad (8)$$

gdzie:

$\Delta H_w$  – ciepło parowania jednego mola wody w danej temperaturze, kJ/mol,

$\Delta h_2 - \Delta h_1$  – różnica entalpii roztworów, odpowiednio końcowego i wyjściowego, kJ/mol,

$n$  – liczba wyparowanych moli wody.

Przyjmując, że współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu  $d_t$  przy zadanej temperaturze nie zależy od rodzaju soli ani stężenia roztworu, można zapisać wzór, który określa współczynnik przewodzenia ciepła mieszaniny pary i powietrza w porach materiału zawierającego roztwór soli:

$$\lambda_{rd} = \lambda_o + \frac{d_t \cdot \Delta c \cdot \varphi_r^n \cdot \Delta H_r}{100 \cdot \Delta H_w} \quad (9)$$

Uwzględniając obecność roztworu nasyconego soli oraz mieszaniny pary i powietrza w materiale, substancję w porach można rozpatrywać jako dwuskładnikowy system o strukturze z wtęrczeniami. Zauważmy, że wzory (2) i (3) zapewniają górne i dolne oszacowanie składowej dyfuzyjnej współczynnika przewodzenia ciepła mieszaniny pary i powietrza. W celu otrzymania bardziej dokładnej oceny do drugiego składnika tych wzorów należy wprowadzić współczynnik poprawkowy, zależny od zawilgocenia materiału i dobierany na podstawie porównania obliczeniowych wartości

przewodności cieplnej materiału z wartościami eksperymentalnymi. Wartości współczynników przewodzenia ciepła kryształów soli przyjmuje się na podstawie danych literaturowych lub można je obliczyć wg wzorów zaproponowanych przez Missenarda [10].

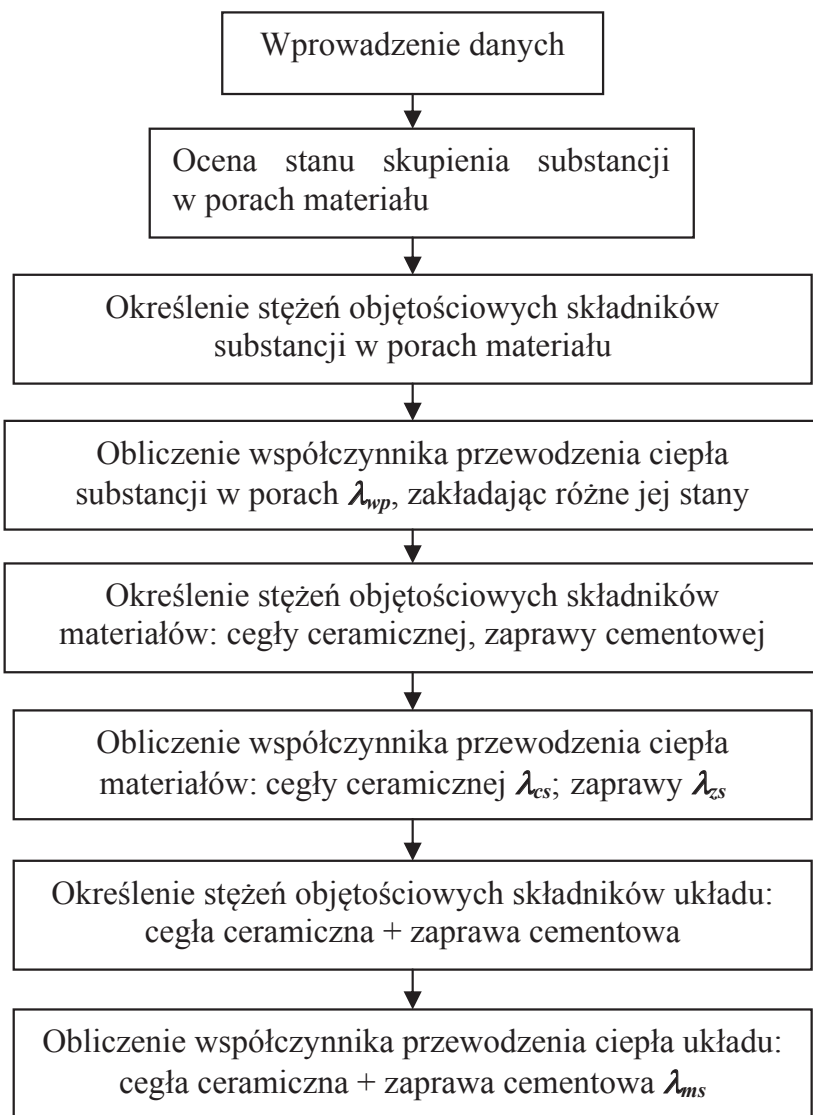
Podany opis przewodności cieplnej materiału kapilarno-porowatego wskazuje, że zbudowanie ściślej zależności współczynnika przewodzenia ciepła materiału zasolonego od wszystkich znaczących czynników jest zadaniem złożonym. Stąd, w celu uzyskania informacji o współczynniku przewodzenia ciepła materiału zasolonego celowe jest zastosowanie modelowania matematycznego i przeprowadzenie eksperymentu obliczeniowego za pomocą modelu.

### 3. Model matematyczny przewodności cieplnej zawilgoczonego i zasolonego muru ceglano-ceglanego

Celem opracowania modelu matematycznego było zbadanie zależności współczynnika przewodzenia ciepła materiałów ściennych (cegły ceramicznej i muru ceglano-ceglanego) od zawartości wilgoci oraz rodzaju i zawartości soli w materiale. Czynniki te w pełni wyrażają cechy charakterystyczne związane z eksploatacją elementów ściennych obiektów murowanych i poddają się dostatecznie dokładnej kontroli podczas badań terenowych stanu ścian.

Algorytm modelu matematycznego obejmuje cztery główne bloki obliczeń. W pierwszym bloku oblicza się współczynnik przewodzenia ciepła substancji w porach  $\lambda_{wp}$ . W blokach drugim, trzecim i czwartym – odpowiednio, współczynnik przewodzenia ciepła cegły ceramicznej  $\lambda_{cs}$ , zaprawy cementowej  $\lambda_{zs}$  i muru ceglano-ceglanego  $\lambda_{ms}$ , uwzględniając obecność wilgoci i soli.

Współczynnik przewodzenia ciepła substancji w porach oblicza się biorąc pod uwagę stan skupienia jej składników. Rozpatruje się



**Rys. 2.** Uogólniony schemat blokowy obliczania współczynnika przewodzenia ciepła zasolonego muru

osiem wariantów składu substancji w porach. W pierwszym, najprostszym przypadku przyjmuje się wypełnienie porów tylko suchym powietrzem. W ostatnim wariancie, w skład substancji w porach wchodzi mieszanina pary i powietrza, roztwór nasycony i kryształy soli. Uogólniony schemat blokowy obliczania współczynnika przewodzenia ciepła zasolonego muru ceglanego przedstawiono na rysunku 2. W trakcie przekształcania algorytmu obliczeniowego w opis matematyczny procesu przenikania ciepła, wprowadzono dodatkowe wzory i założenia, które dotyczą składników substancji w porach, ich stanu skupienia i stężeń objętościowych.

Założono, że przenikanie ciepła poprzez dyfuzję pary wodnej ma miejsce wówczas, gdy w kapilarach materiału rozpocznie się kondensacja wilgoci, która może zwilżać strefy powierzchni porów wokół otworów wylotowych kapilar, a układ może być rozpatrywany jako tak zwany schemat Krischera [12]. Jako wartość graniczną wilgotności w przyjęto wilgotność sorpcyjną  $w_{80}$  przy względnej wilgotności powietrza  $\varphi_p = 80\%$ , określoną dla materiału badanego za pomocą izoterm sorpcji. Oczywiście jest, że po całkowitym wypełnieniu porów wodą lub roztworem składowa dyfuzyjna strumienia ciepła zniknie, a przy pewnym objętości-

wym stężeniu wody lub roztworu  $m_{2w}$  w stosunku do objętości porów  $m_{2p}$ , składowa ta osiągnie maksymalną wartość. Przyjęto, że taki stan nastąpi, gdy  $m_{2wr} = 0,5 m_{2p}$ . W obliczeniach przyjęto założenie, że przy zawartości wilgoci w materiale  $w_r$  mniejszej od wilgoci sorpcyjnej, przy określonej wilgotności względnej powietrza  $\varphi_p$  odpowiadającej punktowi higroskopijności  $\varphi_g$  badanej soli, roztwory solne nie powstają.

W celu opisu zmiany stanu skupienia soli wprowadzono pojęcie roztworu quasi-rzeczywistego, którego stężenie  $c_r^k$  przewyższa wartość stężenia roztworu nasyconego  $c_n$ . Założono, że przy spełnieniu warunku  $c_r^k > c_n$  w porach zaczyna się krystalizacja soli. Przy obliczaniu stężeń objętościowych składników substancji w porach uwzględniono właściwości fizyko-chemiczne soli i ich roztworów, porowatość badanego materiału, zawartości masowe wilgoci i soli, a także opisane wyżej założenie.

Przewodność cieplną substancji w porach, bez uwzględniania soli krystalicznej, obliczono wg wzoru (1). Kryształy soli wraz ze szkieletem materiału rozpatrywano jako dwuskładnikową mieszaninę twardą, której przewodność cieplną określono wg wzoru (4). W etapie końcowym obliczono przewodności cieplne zawilgoconych materiałów zawierających sole – cegły ceramicznej i zaprawy cementowej – wg wzoru (1), a muru ceglanego – wg wzoru (4).

#### 4. Dane do badania przewodności cieplnej za pomocą modelu matematycznego

Model matematyczny w formie ujednoczonego cyklicznego algorytmu obliczeniowego zrealizowano w postaci programu za pomocą którego przeprowadzono eksperyment obliczeniowy. Jako zmienne niezależne przyjęto zawartości wilgoci i soli w materiale ściennym. Realizując eksperyment obliczeniowy uwzględniono: cegłę cera-

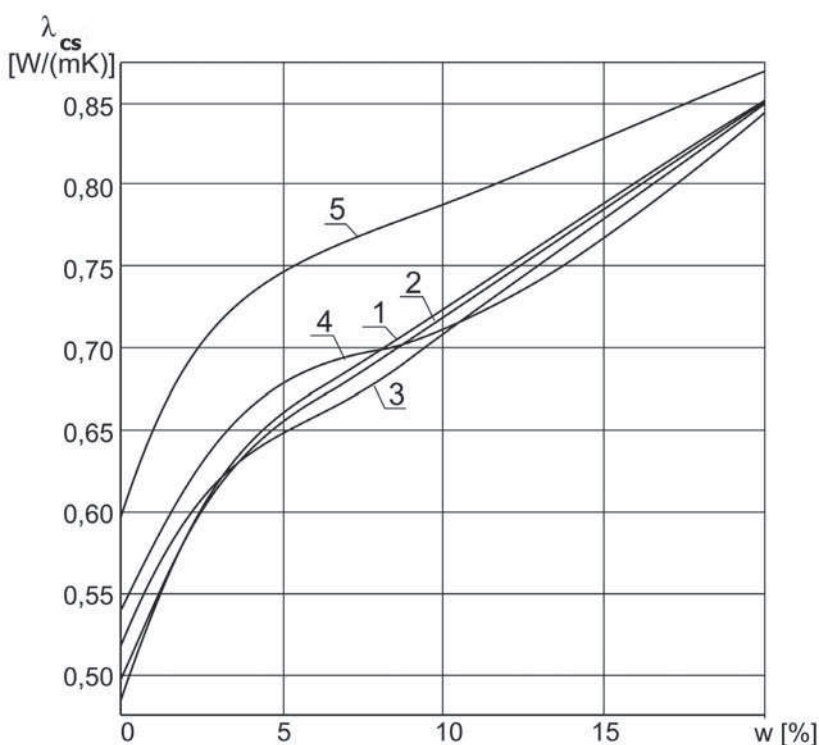
miczną o porowatości 50% i gęstości 1300 kg/m<sup>3</sup> oraz materiały składowe muru ceglanego: zaprawę cementową i cegłę ceramiczną o gęstości 1800 kg/m<sup>3</sup>, porowatości 31% i współczynnika przewodzenia ciepła szkieletu 2,326 W/(mK). Jako sól, wprowadzono NaCl o współczynniku przewodzenia ciepła kryształów 8,3 W/(mK). W wyniku eksperymentu obliczeniowego otrzymano dane o przewodności cieplnej mieszaniny pary wodnej i powietrza, roztworów soli oraz substancji w porach dla różnych wariantów jej składu, a także dane dotyczące cegły ceramicznej, zaprawy cementowej i muru ceglanego w zależności od zawartości wilgoci (od 0 do 9%) i soli NaCl (od 0 do 6,5%) w materiale.

### 5. Analiza wyników badania

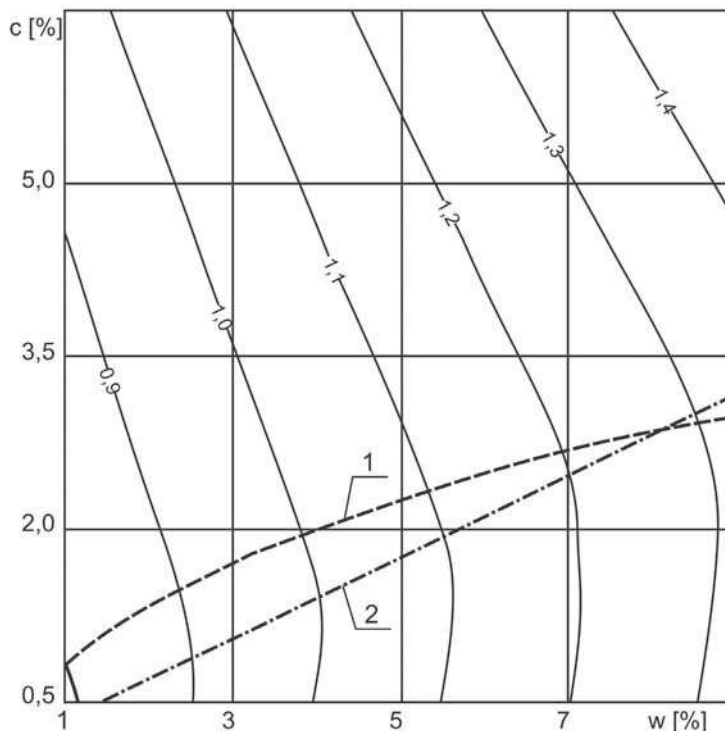
Wyniki obliczeń współczynnika przewodzenia ciepła cegły ceramicznej o gęstości 1300 kg/m<sup>3</sup>  $\lambda_{cs}$  dla wybranych punktów rozpatrywanej przestrzeni czynników przedstawiono na rysunku 3.

Analizując wykres zależności na rysunku 3, stwierdzono, że współczynnik przewodzenia ciepła cegły ceramicznej, w porach której znajduje się powietrze i kryształy soli, wzrasta liniowo wraz ze wzrostem zawartości NaCl. Szybkość tego wzrostu zależy nie tylko od przewodności cieplnej kryształów soli, lecz także od porowatości materiału i gęstości kryształów, ponieważ gęstość kryształów określa stężenie objętościowe soli w porach. Wypełnienie solą przestrzeni porowej do 6,5% masy materiału zwiększa wartość współczynnika przewodzenia ciepła cegły o 25%.

Obecność wilgoci w materiale zmienia charakter wpływu soli na współczynnik  $\lambda_{cs}$  cegły. W porach materiału powstają roztwory soli, których współczynnik przewodzenia ciepła zmniejsza się wraz ze wzrostem ich stężenia. Zmniejszenie ilości soli krystalicznej i zwiększenie objętości roztworu odbywa się stopniowo wraz



**Rys. 3.** Współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda_{cs}$ , W/(mK) cegły ceramicznej o gęstości 1300 kg/m<sup>3</sup> w zależności od zawartości wilgoci  $w$ , % oraz soli (NaCl)  $c$ , %: 1 -  $c = 0$ ; 2 -  $c = 1\%$ ; 3 -  $c = 2\%$ ; 4 -  $c = 4\%$ ; 5 -  $c = 8\%$



**Rys. 4.** Izolinie współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda_{ms}$ , W/(mK) muru ceglanego  $\rho = 1800$  kg/m<sup>3</sup> zawierającego NaCl przy zmianie zawartości wilgoci  $w$ , % i soli  $c$ , %: 1 - linia zerowego wpływu soli, powyżej której przy określonej wilgotności obecność soli powoduje zwiększenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła; 2 - linia rozdziału faz substancji wewnątrz porów, powyżej której w porach materiału znajduje się roztwór nasycony i kryształy soli, poniżej - roztwór nienasycony

ze wzrostem zawilgocenia materiału. W rezultacie, efekt zwiększenia przewodności cieplnej cegły spowodowany obecnością kryształów soli pochłania efekt zmniejszenia przewodności spowodowany powstaniem roztworów soli i zmniejszeniem wartości składowej dyfuzyjnej przenikania ciepła  $\lambda_{rd}$ . Moment pełnego pochłaniania jednego efektu przez drugi następuje przy pewnej zawartości soli krystalicznej i roztworu nasyconego. Wówczas, przewodność cieplna cegły zawierającej wilgoć i sole, nie różni się od przewodności cieplnej cegły zawilgoconej bez soli (pod warunkiem jednakowej w nich zawartości wilgoci). Przy wzroście zawilgocenia, ilość roztworu nasyconego zwiększa się kosztem rozpuszczania kryształów soli. Przy pełnej rozpuszczalności kryształów soli efekt zmniejszenia wartości  $\lambda_{cs}$  cegły jest największy. Jednakże, zmiana wartości współczynnika przewodzenia ciepła nie przekracza 5% w stosunku do współczynnika dla cegły niezasolonej.

Dalszy wzrost zawilgocenia materiału prowadzi do rozcieńczenia roztworu w wyniku czego przy tej samej wilgotności wartość współczynnika przewodzenia ciepła cegły zasolonej zbliża się do wartości współczynnika dla cegły niezasolonej. Jednakże, taki proces może mieć miejsce przy ograniczonej zawartości soli w materiale (7–8% masowo), ponieważ przy większym zasoleniu i przy ograniczonej objętości porów, wilgoci pochłanianej przez materiał cegły, może nie wystarczyć do całkowitego rozpuszczenia soli. Wówczas efekt zmniejszenia przewodności cieplnej nie będzie miał miejsca. Największe znaczenie praktyczne ma analiza współczynnika przewodzenia ciepła muru ceglanego w zakresie dopuszczalnej wilgotności eksploatacyjnej w okresie zimowym. Według danych literaturowych dopuszczalne zawilgocenie muru z cegły ceramicznej wynosi 2–3% [1]. Obliczenia prze-

prowadzone przy zastosowaniu modelu wykazały, że przy takim zawilgoceniu współczynnik przewodzenia ciepła muru zaczyna wzrastać przy zawartości soli NaCl przekraczającej 1,3÷1,7%, co pokazano na rysunku 4. Dalej, zwiększenie zawartości soli o 1% powoduje przyrost wartości  $\lambda_{ms}$  o około 0,04 W/(mK). Na przykład, przy wilgotności muru  $w = 3\%$  i zawartości NaCl  $c=6,5\%$ , współczynnik  $\lambda_{ms}$  wynosi 1,11 W/(mK), co o blisko 20% przewyższa wartość współczynnika przewodzenia ciepła muru, który nie zawiera soli ( $\lambda_{cs} = 0,93$  W/(mK)).

Należy uwzględnić, że opisany wyżej efekt zmniejszenia  $\lambda_{ms}$  (tj. poprawa właściwości materiału ściennego) ma określoną ograniczoną wartość zależną tylko od zdolności roztworu do obniżania przewodności cieplnej mieszaniny cieczy i pary wodnej w porach materiału.

Natomiast efekt zwiększenia wartości  $\lambda_{ms}$  (tj. pogorszenie właściwości materiału) zależy przede wszystkim od stężenia objętościowego soli krystalicznej w porach. Stężenie objętościowe soli jest teoretycznie nieograniczone, ponieważ sól zapełniwszy przestrzeń porową może dostawnie otoczyć materiał. Dlatego w obliczeniach cieplnych zasolonych ścian zaleca się brać pod uwagę tylko te wartości  $\lambda_{ms}$ , które przy tej samej wilgotności przekraczają wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiału niezasolonego.

## 6. Wnioski

1. Przeprowadzona analiza wykazała wysoką efektywność wykorzystania modelowania matematycznego do oceny i prognozowania współczynnika przewodzenia ciepła materiałów ściennych podlegających oddziaływaniu soli.

2. Analiza wyników eksperymentu obliczeniowego wykazała złożoną zależność pomiędzy wartością współczynnika przewodzenia ciepła ceramicznych materiałów

ściennych a rodzajem soli, zawartością wilgoci i soli w porach oraz stanem skupienia soli.

3. Stwierdzono, że w warunkach dopuszczalnego zawilgocenia eksploatacyjnego muru ceglanego (2÷3%) jego współczynnik przewodzenia ciepła zaczyna wzrastać przy zawartości NaCl większej niż 1,3÷1,7%. Dalszy przyrost wartości współczynnika wynosi 0,04 W/(mK) przy wzroście zawartości soli w materiale o 1%.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Hoła J., Matkowski Z., Wybrane problemy dotyczące zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian w istniejących obiektach muryrowych Mat. XXIV Konferencji Naukowo-Technicznej „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, 26–29 maja 2009, s. 73–92
- [2] Kunzel H. M., Kiessel K., Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, Vol. 40, s. 159–167
- [3] Ahl J., Salt diffusion in brick structures. Journal of Material Science, 2003, Vol. 38, s. 2055–2061
- [4] Solymez M. S., On the effective thermal conductivity of building bricks. Building and Environment, 1999, Vol. 34, s. 1–5
- [5] Dawson D. M., Briggs A., Prediction of the thermal conductivity of insulation materials. Journal of Material Science, 1981, Vol. 16, s. 3346–3356
- [6] Alawadhi E. M., Thermal analysis of a building brick containing phase change material. Energy and Building, 2008, Vol. 40, s. 351–357
- [7] Lubelli B., Van Hees R. P. J., Brocken H. J. P., Experimental research on hygroscopic behaviour of porous specimens contaminated with salts. Construction and Building Materials, 2004, Vol. 18, s. 339–348
- [8] Espinosa R. M., Franke L., Deckelmann G., Phase changes of salts in porous materials: Crystallization, hydration and deliquescence. Construction and Building Materials, 2008, Vol. 22, s. 1758–1773
- [9] Dulniew G. N., Zarichniak Yu. P., Tjeploprovodnost' smiesei i kompozycionnych materialov. Spravochnaja kniga – L., Energia, 1974, s. 264
- [10] Missenard A., Conductivite thermique des solidem, liquides, gaz et de leurs melanges. Editions Eyrolles, Paris, 1985, 340 s.
- [11] Odelevskiy W. I., Raschet obobshchennoj provodimosti geterogennyh sistem. Zh.T.F. 1951, 21, s. 667–685
- [12] Krischer O., Rohalter H., Die Wärmeübertragung durch Diffusion des Wasserdampfes in den Poren von Baustoffen unter Einwirkung eines Temperaturgefälles. Gesundheits – Ingenieur, Berlin, 1937 – N 41, s. 39–46